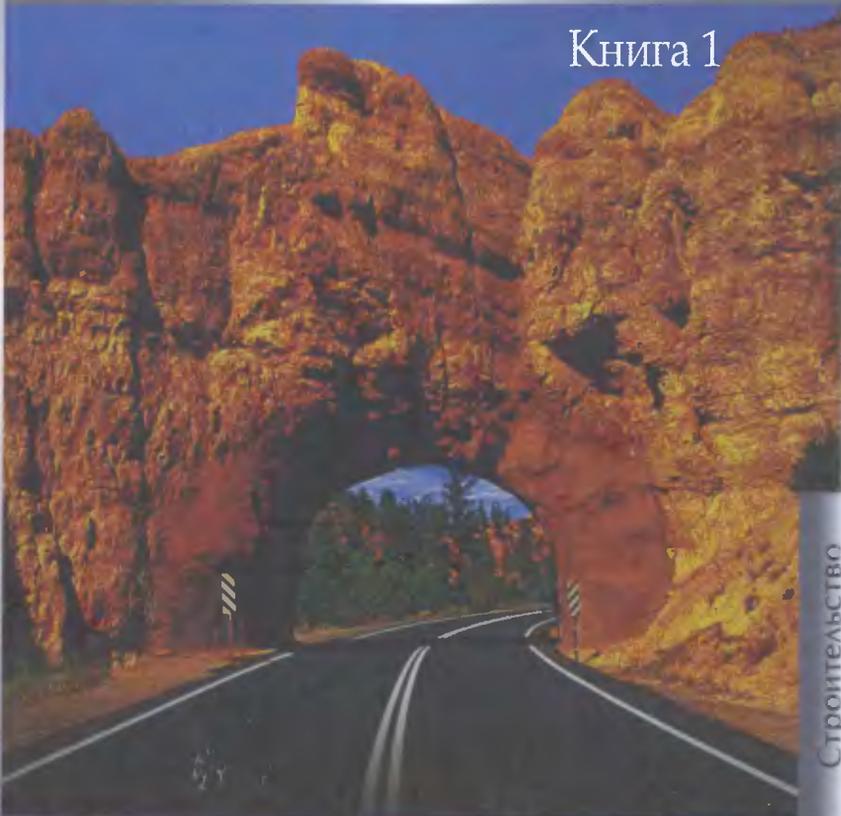


ДЛЯ ВЫСШИХ
УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ

Г.А. Федотов, П.И. Поспелов

Изыскания и проектирование автомобильных дорог

Книга 1



Строительство
и архитектура



Г.А. Федотов, П.И. Поспелов

Изыскания и проектирование автомобильных дорог

Книга 1

*Допущено
УМО вузов Российской Федерации
по образованию в области железнодорожного
транспорта и транспортного строительства
в качестве учебника для студентов вузов,
обучающихся по специальности
«Автомобильные дороги и аэродромы»
направления подготовки «Транспортное строительство»*



Москва «Высшая школа» 2009

УДК 625
ББК 39.311
Ф 34

Рецензенты:

д-р техн. наук, проф. *Б.Ф. Перевозников*; д-р техн. наук, проф. *В.В. Сильянов*
(кафедра изысканий и проектирования дорог Московского автомобильно-дорожного института — Государственного технического университета)

Федотов Г.А.

Ф 34 Изыскания и проектирование автомобильных дорог. В 2 кн.
Кн. 1: Учебник/Г.А. Федотов, П.И. Поспелов. — М.: Высш. шк.,
2009. — 646 с.: ил.

ISBN 978-5-06-006056-0

В учебнике изложены основы изысканий и проектирования автомобильных дорог. В книге 1 даны основные требования, предъявляемые к геометрическим элементам автомобильных дорог в плане и продольном профиле, современные методы проектирования земляного полотна и дорожных одежд с учетом природных факторов при проектировании. Рассмотрены выбор направления трассы на местности и определение положения проектной линии продольного профиля. Даны методы обоснования размеров малых водопропускных сооружений на дорогах, современные методы проектирования пересечений и примыканий автомобильных дорог в одном и разных уровнях. В настоящем издании рассмотрены используемые в Российской Федерации системы автоматизированного проектирования (САПР-АД).

Для студентов автодорожных и строительных вузов и факультетов. Может быть использован студентами техникумов и колледжей, а также инженерно-техническими работниками проектно-изыскательских организаций и фирм.

УДК 625
ББК 39.311

ISBN 978-5-06-006056-0 (кн. 1) © ОАО «Издательство «Высшая школа», 2009
ISBN 978-5-06-005760-7

Оригинал-макет данного издания является собственностью издательства «Высшая школа», и его репродуцирование (воспроизведение) без согласия издательства запрещено.

Проектирование автомобильных дорог — учебная дисциплина, рассматривающая принципы технико-экономического обоснования генеральных размеров всех сооружений дорог на основе комплексного учета их хозяйственного значения, природных условий, требований эффективности и безопасности автомобильных перевозок, методы выбора направления дороги на местности и разработки проекта ее строительства.

Автомобильные дороги играют огромную роль не только в социально-экономическом развитии отдельных регионов, но и страны в целом. Говорят, что «дороги — это кровеносные артерии государства».

Автомобильные дороги — чрезвычайно сложные, капиталоемкие и в то же время одни из наиболее рентабельных инженерных сооружений. Вкладывать большие средства в дорожное строительство в конечном итоге всегда оказывается очень выгодным. В одной из наиболее экономически развитых стран мира — США, характеризующейся высокой плотностью сети автомобильных дорог с твердым покрытием, в связи с этим говорят, что «мы строим дороги не потому, что мы богаты, но мы богаты потому, что строим дороги». В связи с чрезвычайно высокой капиталоемкостью автомобильных дорог во все времена инженеры-дорожники искали пути снижения стоимости строительства, но не в ущерб качеству принимаемых проектных решений. Проектирование автомобильных дорог должно быть направлено на достижение их высоких транспортно-эксплуатационных качеств, при минимальных, по возможности, материалоемкости и стоимости строительства. Правильно спроектированная дорога обеспечивает безопасное движение с расчетными скоростями, высоким уровнем удобства как одиночных автомобилей, так и транспортных потоков даже в самые напряженные периоды работы дорог, надежность и дол-



Р и с. 1. Автомобильные дороги федерального значения:

а — двухполосная дорога М-18 «Кола»; *б* — четырехполосная автомагистраль М-5 «Урал»

говечность земляного полотна, дорожных одежд, искусственных сооружений и т.д.

При оценке вариантов проектных решений предпочтение отдают не только самым экономичным инженерным решениям, но и чаще всего тем, которые обеспечивают наиболее высокие уровни удобства и безопасности движения, гармоничное вписывание полотна дорог в окружающий ландшафт и оказывают наименьшее отрицательное воздействие на окружающую среду. Обязательными элементами проектных решений являются мероприятия по охране окружающей среды, рациональному использованию и воспроизводству природных ресурсов.

Основными разделами курса являются:

автомобильные дороги и их роль в экономическом развитии страны; дана характеристика исключительной роли автомобильного транспорта и сетей автомобильных дорог с твердым покрытием (рис. 1).

Даны общие понятия об элементах плана, продольного и поперечных профилей полотна автомобильных дорог и об определении их параметров, в существенной степени влияющих на материалоемкость и сметную стоимость строительства, об элементах инженерного оборудования и организации движения на дорогах, во многом определяющих уровни удобства и безопасность движения.

Инженеры-дорожники должны знать законы движения как одиночных автомобилей, так и транспортных потоков по автомобильным дорогам и об их влиянии на методы определения геометрических параметров и генеральных размеров элементов автомобильных дорог.

Даны современная классификация автомобильных дорог, расчетные скорости, нагрузки и габариты подвижного состава, нормы проектирования геометрических элементов автомобильных дорог и основные мероприятия по охране окружающей среды при проектировании, строительстве и эксплуатации автомобильных дорог;

понятие о современной технологии производства проектных работ. В связи с уже произошедшим в стране переходом на технологии и методы системного автоматизированного проектирования автомобильных дорог и сооружений на них инженер-дорожник обязан знать принципиальные основы построения систем автоматизированного проектирования автомобильных дорог и сооружений на них (САПР-АД) и технологию современного производства проектно-изыскательских работ, которая радикально отлична от технологии традиционной, геоинформационные системы (ГИС) и об их использовании в проектировании, о цифровом и математическом моделировании местности, являющимся основой системного автоматизированного проектирования. В разделе даны описания и характеристики получивших наибольшее распространение в стране систем автоматизированного проектирования автомобильных дорог CAD «Credo» и «IndorCAD/Road»;

учет природных факторов при проектировании. Автомобильные дороги как в течение каждого годового цикла, так и на протяжении всего срока их службы подвержены опасным активным воздействиям многочисленных природных факторов (нагреванию и оттаиванию, увлажнению осадками, подтоплению поверхностными водами, вредному воздействию подземных вод, гололеду, снегозаносам, пучинообразованию и т.д.). Эти особенности работы автомобильных дорог в течение каждого годового цикла следует учитывать при проектировании дорог, их строительстве и эксплуатации;

система дорожного водоотвода. Поверхностный сток от таяния снега и дождей весьма опасен для большинства сооружений автомобильных дорог. Дорожники говорят: «Вода — злейший враг дороги». По сути своей дорога является гидротехническим сооружением, поэтому инженер-дорожник должен в совершенстве владеть знаниями гидрологии, гидравлики и теории русловых потоков. Система поверхностного дорожного водоотвода представлена большим числом сооружений, наиболее ответственные из них — водопропускные сооружения. Малые водопропускные сооружения (трубы и малые мосты) устраивают в местах пересечений дорог с ручьями, суходолами, оврагами и балками. Учитывая их большое число (в среднем на 1 км дороги в средней полосе приходится одно малое водопропускное сооружение), инженер-дорожник должен уметь грамотно определять

отверстия для безопасного пропуска даже самых высоких паводков, которые могут пройти на данном водосборе в течение расчетного срока службы автомобильной дороги.

При высоких уровнях грунтовых вод, для исключения переувлажнения грунтового основания дорожных одежд, прибегают к их понижению, устраивая дренажи, поэтому специалист-дорожник должен владеть и теорией движения грунтовых вод.

При проектировании системы поверхностного водоотвода инженер-дорожник должен знать и широко использовать методы компьютерного, математического моделирования поверхностного стока с водосборов и работы водопропускных сооружений на автомобильных дорогах;

трасса автомобильной дороги. Инженеры-дорожники должны в совершенстве владеть методами выбора направления трассы автомобильных дорог на местности и современными методами проектирования их плана и продольного профиля. Чтобы поездки по дорогам и труд водителей были безопасны, легки и приятны, проектировщики прокладывают трассу на местности с увязкой ее с окружающим ландшафтом в соответствии с определенными эстетическими требованиями.

Современные автомобильные дороги должны обеспечивать необходимые уровни удобства и безопасности автомобильного движения. Для этого при проектировании учитывают психофизиологические особенности восприятия водителями дорожных условий и представляют водителям всю необходимую информацию о впереди лежащих участках, обеспечивая высокие безопасные скорости движения, требуемую пропускную способность и исключая возможность серьезных и систематических дорожно-транспортных происшествий.

Инженер-дорожник должен владеть методами проектирования наиболее дорогих и ответственных узлов автомобильных дорог — пересечений и примыканий дорог в одном и разных уровнях с учетом современных принципов конструктивных решений участков ответвлений и примыканий на съездах развязок движения.

В настоящее время уже недостаточно строительства собственно автомобильных дорог с твердым покрытием для обеспечения круглогодичного проезда. В состав комплекса сооружений автомобильных дорог должны входить элементы оборудования и различные устройства для обслуживания движения: станции технического обслуживания, автозаправочные станции, придорожные столовые и гостиницы, площадки отдыха, моечные пункты, гаражи, средства организации движения (дорожные знаки, разметки, направляющие устройства и ограждения, освещение и т.д.). Оборудование и обустройство

ройства также являются неотъемлемой частью проектов автомобильных дорог.

При проектировании плана автомобильных дорог инженер-дорожник должен владеть современными методами автоматизированного компьютерного проектирования геометрии автомобильных дорог и развязок движения с использованием принципов клотоидного трассирования и свободной геометрии (сплайн-трассы, кривые Безье, различного рода переходные кривые, обеспечивающие наилучшие условия движения автомобилей с переменными скоростями);

земляное полотно и дорожные одежды. Земляное полотно относится к числу наиболее объемных, сложных и разнообразных по своей конструкции элементов автомобильных дорог. От качества проектирования земляного полотна во многом зависят стоимость строительства автомобильных дорог, надежность эксплуатации, эксплуатационные расходы, эстетические достоинства дорог и безопасность движения.

К одному из основных требований, предъявляемых к земляному полотну, относится обеспечение его прочности в целом и устойчивости отдельных его элементов под действием собственного веса, многократных воздействий нагрузок от подвижного состава и природных факторов. Для грамотного решения этих важных задач инженер-дорожник должен владеть знаниями грунтоведения и механики грунтов, а также математического моделирования земляного полотна на базе метода конечных элементов (МКЭ).

При проектировании линии продольного профиля автомобильных дорог, учитывая высокую стоимость земляного полотна, инженер-проектировщик должен уметь использовать математические методы оптимизации проектных решений.

Дорожные одежды являются одними из наиболее дорогих (стоимость их часто составляет более половины стоимости дороги в целом) и ответственных элементов автомобильных дорог, в значительной степени определяющих их стоимость и транспортно-эксплуатационные качества. Дорожная конструкция должна удовлетворять целому ряду противоречивых требований: прочности, ровности, шероховатости, беспыльности, долговечности и экономичности.

Для грамотного конструирования и расчета этих дорогих и ответственных элементов автомобильных дорог инженер-дорожник должен владеть теорией упругих полупространств, знать разнообразные конструкции дорожных одежд нежесткого и жесткого типов, уметь привязывать конкретные конструкции к источникам дешевых местных дорожно-строительных материалов и владеть теорией математической оптимизации проектных решений;



Р и с. 2. Мостовой переход через р. Ветлуга

проектирование мостовых переходов. Неотъемлемой и весьма дорогостоящей частью автомобильных дорог являются мостовые переходы — комплексы специальных сооружений, воздвигаемых на пересечениях дорог с постоянными водотоками (рис. 2).

В среднем на каждые 15 километров трассы автомобильной дороги в средней полосе приходится один средний или большой мостовой переход. Транспортные сооружения в виде мостовых переходов призваны обеспечивать круглогодичный беспрепятственный пропуск транспортных потоков в течение многих десятилетий, в том числе и в периоды максимального стока — периоды прохождения паводков на пересекаемых реках.

Гидрологические, гидравлические и русловые расчеты мостовых переходов представляют собой одну из наиболее сложных и важных частей проектов мостовых переходов, поскольку определяют не только генеральные размеры сооружений (отверстия мостов, глубины фундирования мостовых опор, размеры регулиционных и укрепительных сооружений, отметки бровок земляного полотна на подходах, отметки проезда на мостах и т.д.), но и дают возможность оценить те вредные последствия, которые будут иметь место вследствие нарушения бытового режима протекания речного паводкового потока подходами к мосту (ухудшение условий судоходства, размывы переходов коммуникаций, подтопление вышележащих населенных пунктов и объектов и т.д.). Для решения этих проблем широко используют методы математического моделирования развивающихся во времени и пространстве физических процессов, практическая реализация которых немислима без использования современной компьютерной техники и сложнейших программных продуктов.

К местам удачного пересечения водотоков предъявляются жесткие требования, в ряде случаев вынуждающие при трассировании автомобильных дорог существенно отклоняться от кратчайшего направления с соответствующими экономическими потерями в связи с перепробегами автотранспорта.

Грамотное проектирование этих особых, ответственных и дорогостоящих участков автомобильных дорог требует от инженера-дорожника глубоких знаний гидрологии, гидравлики, теории русловых потоков, математики и вычислительной техники;

проектно-изыскательские работы. Современные технологии системного автоматизированного проектирования автомобильных дорог требуют всесторонней оценки многочисленных вариантов и подвариантов проектных решений по широкому набору технико-экономических показателей: пространственной плавности и ясности трассы, скоростям движения расчетных автомобилей и транспортных потоков, уровням удобства и безопасности движения, степени загрязнения окружающей среды транспортным шумом, загрязнения придорожной полосы отходами транспортного движения, экономической эффективности инвестиций в дорожное строительство и т.д.

Организация проектно-изыскательских работ в рамках системного автоматизированного проектирования (на уровне САПР-АД) претерпела радикальные изменения по сравнению с традиционной ручной рутинной технологией. Современная технология изысканий автомобильных дорог предполагает сбор всех видов необходимой для проектирования исходной информации о местности (топографо-геодезической, инженерно-геологической, гидрометеорологической, экономической и т.д.) на широкой полосе варьирования конкурентоспособных вариантов трассы с соответствующим многократным увеличением объемов и стоимости полевых изыскательских работ, которая должна быть собрана в строго фиксированные сроки. Решение этой проблемы обеспечивается широким использованием современных технических средств и технологий: ГИС-технологий, электронной тахеометрии, спутниковой навигации, воздушного и наземного лазерного сканирования местности, аэрокосмической и наземной цифровой фотограмметрии, современных геофизических методов инженерно-геологической разведки и т.д.;

проектирование дорог в сложных природных условиях. Многообразие природных условий России — резкое различие особенностей рельефа, климатических, почвенно-грунтовых, инженерно-геологических, гидрогеологических, гидрометеорологических и других природных условий различных районов — не допускает трафаретных решений и требует от инженера-дорожника технически правильных и



Р и с. 3. Автомагистраль М-4
«Дон»

экономически целесообразных инженерных решений при изысканиях и проектировании автомобильных дорог в различных регионах нашей страны.

Инженер-дорожник должен знать специфические особенности работы автомобильных дорог в различных природно-климатических условиях: в районах распространения вечномёрзлых и многолетнемерзлых грунтов, в заболоченных районах, в районах склоновой эрозии и оврагообразования, в закарстованных районах, в горной местности, в засушливых районах;

проектирование автомагистралей, городских улиц и дорог. Автомагистрали — многополосные, скоростные автомобильные дороги с разделительной полосой, предназначенные для

интенсивных дальних пассажирских и грузовых автомобильных перевозок без помех со стороны местного транспорта и встречных автомобилей (рис. 3).

Это весьма совершенные и чрезвычайно дорогостоящие автомобильные дороги, обязательными требованиями, предъявляемыми к которым, являются выделение для встречных потоков автомобилей самостоятельных проезжих частей, отсутствие пересечений в одном уровне и запрещение движения тихоходных транспортных средств. Проектирование автомагистралей имеет свои специфические особенности, и это касается прежде всего плана трассы, продольного и поперечных профилей.

Разделение единой проезжей части на две самостоятельные дает проектировщику возможность легче приспособлять широкое земляное полотно к рельефу местности, применяя самостоятельное трассирование разных направлений и ступенчатое расположение проезжих частей на косогорах.

Учитывая, что строительство автомагистралей у нас в стране становится обычным делом, специфические особенности их проектирования инженер-дорожник обязан знать.

Проектирование городских улиц и дорог имеет существенные отличия от принципов проектирования загородных автомобильных до-

рог. Особенности проектирования городских улиц и дорог состоят прежде всего в стесненных условиях трассирования (наличие городской застройки), сложившейся планировке дорожно-уличной сети, наличии развитой сети подземного хозяйства, взаимодействии основных транзитных транспортных потоков с местным движением и другими видами городского транспорта (автобусы, троллейбусы, трамваи), наличии тротуаров для интенсивного пешеходного движения, зеленых насаждений и велосипедных дорожек.

Проектирование городских улиц и дорог всегда сопровождается планировкой улиц, перекрестков и площадей, что составляет неотъемлемую часть общей архитектурной планировки городов.

Развязки движения в одном и разных уровнях приходится проектировать в исключительно стесненных условиях плотной городской застройки, что накладывает определенные условия на принимаемые принципиальные планировочные решения городских пересечений и примыканий.

Все сказанное свидетельствует о том, насколько широк круг вопросов, которые должны решать инженеры-дорожники при проектировании автомобильных дорог, и насколько высоки и разносторонни требования, предъявляемые к этим специалистам в настоящее время. Инженеру-дорожнику необходимо профессионально владеть рядом самостоятельных дисциплин, таких как физика, математика, климатология, гидрология, гидравлика, теория русловых потоков, инженерная геодезия, инженерная геология, инженерная геофизика, грунтоведение, механика грунтов и т.д.

В переходный период становления системного автоматизированного проектирования автомобильных дорог в России был оправдан принцип подготовки студентов, при котором обучение шло по учебнику профессоров В.Ф. Бабкова и О.В. Андреева «Проектирование автомобильных дорог», в 2 томах, где были изложены традиционные методы и технологии изысканий и проектирования дорог с параллельным использованием монографии профессора Г.А. Федотова «Автоматизированное проектирование автомобильных дорог». Поскольку системное автоматизированное проектирование автомобильных дорог в стране с использованием систем САПР-АД стало уже объективной реальностью, назрел вопрос написания единого современного учебника «Изыскания и проектирование автомобильных дорог», основой которого являются новые технологии и методы изысканий и проектирования автомобильных дорог на уровне САПР-АД. При этом авторы учли многолетний опыт написания подобных учебников такими выдающимися учеными-дорожниками и педагогами, как профессора В.Ф. Бабков и О.В. Андреев.

В учебнике также нашли отражение методы проектирования, которые мало изменились в связи с переходом на САПР-АД, а также те методы традиционного проектирования, которые инженеры в настоящее время используют наряду с новыми.

Изложение материала в учебнике построено таким образом, чтобы максимально облегчить самостоятельную работу студентов при изучении основ современных изысканий и проектирования автомобильных дорог и сооружений на них.

Учебник рассчитан на студентов вузов, обучающихся по специальностям «Автомобильные дороги и аэродромы», «Мосты и транспортные тоннели» направления «Строительство», а также на инженерно-технических работников проектно-изыскательских институтов и фирм.

Учебник подготовлен заслуженным деятелем науки и техники РФ, академиком Российской академии транспорта, доктором технических наук, профессором Г.А. Федотовым и доктором технических наук, профессором П.И. Пospelовым.

Авторы выражают глубокую благодарность сотрудникам кафедры изысканий и проектирования дорог МАДИ-ГТУ профессорам В.В. Сильянову, В.И. Пуркину, Ю.М. Ситникову и другим за ценные замечания и помощь в подготовке и оформлении рукописи учебника.

Раздел первый

АВТОМОБИЛЬНЫЕ ДОРОГИ И ИХ РОЛЬ В НАРОДНОМ ХОЗЯЙСТВЕ

Глава 1

ОБЩИЕ ПОНЯТИЯ ОБ АВТОМОБИЛЬНЫХ ДОРОГАХ

1.1. Единая транспортная сеть страны

Транспорт является одной из важнейших отраслей экономики страны, обеспечивает перевозку людей и транспортировку различных грузов на значительные расстояния, а также доставку и распределение промышленной и сельскохозяйственной продукции во все районы нашей огромной страны и за рубеж. Транспортный процесс осуществляется различными видами транспорта, использующими различные пути сообщения и находящимися в тесном взаимодействии при осуществлении перевозок. В транспортной системе страны трудится около 14% общего числа трудоспособного населения и расходуется до 10% потребляемых в стране энергоресурсов.

Обширная территория Российской Федерации расположена в резко различающихся природно-климатических зонах, где весьма неравномерно распределены жизненно необходимые природные ресурсы — нефть, газ, лес, каменный уголь и другие полезные ископаемые. К разным регионам страны преимущественно приурочены различные формы ведения сельского хозяйства — зерноводство, овощеводство, хлопководство, виноградарство, животноводство и т.д. Различные виды промышленного производства размещены в разных районах Российской Федерации, равно как и плотность населения, весьма неравномерно. Все это объективно определяет необходимость интенсивных транспортных сообщений между разными регионами и населенными пунктами страны.

Транспортные расходы оказывают существенное влияние на конечную стоимость продукции, что в условиях рыночной экономики требует рациональной организации транспортных связей. Транс-

портные затраты составляют существенную часть стоимости промышленной и сельскохозяйственной продукции, в среднем около 15% от себестоимости производства, в том числе 26% для продуктов нефтедобычи, 24% для продукции лесной промышленности, 15% для угля и до 60% для строительных материалов.

Перевозка промышленного сырья и последующее распределение промышленных изделий и продуктов сельскохозяйственного производства, а также многочисленные и разнообразные пассажирские связи создают пересекающую территорию страны сеть транспортных потоков. Хозяйственное освоение экономически слаборазвитых и незаселенных регионов страны требует непрерывного развития различных видов транспорта и соответствующих им путей сообщения.

Транспортная сеть страны складывается из ряда различных видов транспорта, каждый из которых имеет определенную рациональную область применения и которые при выполнении общего объема перевозок работают совместно и дополняют друг друга:

наземный: железнодорожный и автомобильный;

водный: речной и морской;

подземный: трубопроводный и метро;

воздушный;

космический — новый, перспективный вид транспорта.

Железнодорожный транспорт используют преимущественно для срочных и регулярных перевозок на большие расстояния пассажиров и больших объемов груза, обслуживает главным образом межрегиональные транспортные связи. Использовать железнодорожный транспорт для короткопробежных перевозок (до 200—300 км) экономически нецелесообразно. Именно поэтому средняя дальность железнодорожных перевозок составляет 945 км. В качестве путей сообщения для осуществления железнодорожных перевозок используют железные дороги, общая протяженность которых на территории бывшего СССР составляла 145 тыс. км.

Для оценки относительной себестоимости транспортировки пассажиров и грузов различными видами транспорта условно принимают себестоимость перевозки 1 т груза на 1 км пути по железной дороге за 1,0.

Автомобильный транспорт используют преимущественно для короткопробежных внутренних перевозок пассажиров и грузов «от двери к двери». Средняя дальность автодорожных перевозок составляет 21 км. Однако при развитой сети автомагистралей — дорог, рассчитанных на движение автомобилей с высокими скоростями, автомобильный транспорт используют для перевозок большегрузными автомобилями грузов на расстояния до 2—3 тыс. км. Из-за отсутствия

потерь времени на маневровых станциях, как на железнодорожном транспорте, средняя скорость перевозок автомобилями выше. В зависимости от объемов пассажирских и грузовых перевозок в качестве путей сообщения для осуществления автомобильных перевозок используют автомобильные дороги с твердым покрытием различной капитальности, общая протяженность которых составляла на территории бывшего СССР 1300 тыс. км.

Преимуществом автомобильного транспорта является также то, что он меньше связан с постоянными путями сообщения и при необходимости перевозки грузов можно осуществлять по простейшим грунтовым или улучшенным дорогам, используя для этих целей не только автомобильный, но также и гужевой транспорт.

Условная себестоимость автомобильных перевозок существенно превышает себестоимость перевозок по железным дорогам и составляет 20,0. Кроме того, одной из острейших проблем, которые возникают при автомобильных перевозках, является неизбежная аварийность на автомобильных дорогах. Потери народного хозяйства от дорожно-транспортных происшествий (ДТП) достаточно высоки.

Тем не менее автомобильный транспорт имеет огромное значение для развития экономики и социального развития страны и интенсивно развивается в связи со следующим:

высокая приспособляемость подвижного состава к разнообразным видам выполняемых перевозок в связи с огромным разнообразием типажа автомобилей различного назначения;

менее жесткие требования автомобильного транспорта, по сравнению с железнодорожным, к качеству путей сообщения;

большая скорость транспортных потоков, особенно на автомагистралях;

высокая маневренность, обеспечивающая возможность непосредственного подвоза пассажиров и грузов от мест погрузки к местам назначения;

высокая приспособляемость автомобильного транспорта к перевозкам относительно мелких партий грузов;

возможность увеличения грузоподъемности автомобилей при использовании автоприцепов и формировании автопоездов.

Отдельно можно выделить *городской* транспорт: грузовые и легковые автомобили, метро, автобусы, трамваи и троллейбусы, осуществляющие массовые и неравномерные во времени пассажирские и грузовые перевозки, обеспечивающие жизнедеятельность городов, а также *внутрихозяйственный* транспорт, имеющий свои специфические особенности: внутризаводской, лесовозный, карьерный и сельскохозяйственный.

Водный транспорт: речной и морской.

Речной транспорт (речные суда различного водоизмещения, самоходные и прицепные баржи, суда типа «река—море») в качестве путей сообщения использует реки, озера, водохранилища, судоходные каналы. Себестоимость перевозок речным транспортом соизмерима с железнодорожным (условная себестоимость речного транспорта 1,06). Средняя дальность возки — 375 км. Речной транспорт обеспечивает мощные межрегиональные грузовые перевозки. Сравнительно невысокая скорость речного транспорта привела к тому, что в настоящее время его роль в пассажирских перевозках стала несущественной. Однако огромна роль водного транспорта во вновь осваиваемых районах Севера (северный завоз), Сибири и Дальнего Востока.

Негативно сказываются на развитии водного транспорта вынужденные перерывы навигации: ледостав, ледоход, железнодорожные и автодорожные мосты, негативные последствия гидростроительства.

Морской транспорт (морские суда различной грузоподъемности и назначения, морские паромы) использует в качестве путей сообщения океаны, моря, проливы, заливы, устья больших материнских рек, морские каналы. Условная себестоимость перевозок в связи с огромной грузоподъемностью морских судов невысока — 0,80. Средняя дальность транспортировки грузов — 3863 км.

Различают морские перевозки международные между портами разных государств и каботажные между портами одного и того же государства.

Несмотря на сравнительно невысокие скорости сообщения, пассажирские и грузовые перевозки морским транспортом широко используют и они имеют большие перспективы дальнейшего развития.

Как речной, так и морской виды водного транспорта требуют строительства очень дорогих оборудованных портов, обслуживание которых осуществляют главным образом автомобильным транспортом.

Трубопроводный транспорт, самый молодой, дешевый и безопасный вид транспорта, представлен газопроводами, нефтепроводами, нефтепродуктопроводами, водоводами различного диаметра. Условная средняя себестоимость транспортировки материалов — 0,4. Средняя дальность транспортировки — 2306 км. Однако трубопроводный транспорт в связи с нередкими повреждениями трубопроводов таит в себе немалую экологическую опасность.

Воздушный авиационный транспорт (самолеты, вертолеты) один из молодых, скоростных и интенсивно развивающихся видов транспорта, несмотря на огромную условную себестоимость перевозок

(62,5), широко используют для скоростных пассажирских перевозок, перевозки почты и срочных ценных, остродефицитных партий грузов на большие расстояния. Средняя дальность возки — 1836 км. В условиях Российской Федерации с ее огромными территориями авиационный транспорт имеет большое значение как для внутренних, так и международных перевозок.

Авиационный транспорт требует больших капитальных вложений на строительство аэропортов, аэродромов и подъездных автомобильных и железных дорог к ним.

Космический — только начинающий развиваться самый скоростной вид транспорта, который в относительно недалеком будущем обязательно займет свое рациональное место в мировом транспортном процессе.

Безопасность и надежность работы всех видов транспорта требуют наличия двух служб: ремонтно-строительной, осуществляющей строительство, содержание, ремонт и реконструкцию наземных подъездных путей сообщения, и службы организации движения транспортных средств, обеспечивающей безопасное и комфортабельное их движение.

Следует особо отметить, что автомобильно-дорожный транспорт обеспечивает функционирование всех видов транспорта общей транспортной системы страны.

1.2. Роль автомобильных дорог и автомобильного транспорта в экономике и социальном развитии страны

Все виды транспорта транспортной системы страны могут эффективно функционировать лишь в сочетании с другими видами транспорта и обслуживающими его подъездными путями. Поступление и прием пассажиров и грузов на железнодорожные станции, аэропорты, речные и морские порты и пристани осуществляют главным образом по подъездным путям автомобильным транспортом, который является наиболее эффективным видом транспорта для перевозок на сравнительно короткие расстояния.

В связи с развитием в последние десятилетия сети многополосных автомагистралей, обеспечивающих высокие и относительно безопасные скорости движения автомобильного транспорта, последний приобрел самостоятельное значение для перевозок на дальние расстояния скоролетящих и срочных грузов, а пассажирские перевозки автомобильным транспортом стали эффективными, в частности в связи с тем, что регулярные пассажирские перевозки автомобильным транспортом можно осуществлять с существенно большей частотой

рейсов, чем другими видами транспорта: железнодорожным, авиационным, водным.

Общий объем грузов и пассажиров, перевозимых автомобильным транспортом, значительно превышает их объем, перевозимый другими видами транспорта. Так, объем грузовых перевозок по автомобильным дорогам почти в 5,9 раза превосходит объем перевозимых грузов по железным дорогам, а общий объем пассажирских перевозок автомобильным транспортом почти 3,2 раза больше объема пассажирских перевозок железнодорожным транспортом.

Большое значение автомобильный транспорт имеет для освоения малонаселенных районов страны, поэтому дорожное строительство имеет первостепенное значение в развитии сельского хозяйства, в освоении больших месторождений полезных ископаемых и развитии новых крупных промышленных районов.

1.3. Сеть автомобильных дорог

Автомобильные дороги — это чрезвычайно сложные, капиталоемкие и в то же время наиболее рентабельные инженерные сооружения. Инвестировать в больших объемах дорожное строительство в конечном итоге всегда оказывается исключительно выгодно, поскольку автомобильные дороги очень быстро себя окупают (несмотря на их исключительно высокую стоимость) и начинают приносить чистую прибыль, решая одновременно и другие важнейшие экономические и социальные проблемы.

Автомобильные дороги, соединяющие города и другие населенные пункты, промышленные и сельскохозяйственные районы с пунктами погрузки и разгрузки других видов транспорта, с аэропортами, железнодорожными станциями, речными и морскими портами и пристанями, образуют *автомобильную сеть* страны. Грузы и пассажиры, перевозимые в разные направления в соответствии с потребностями народного хозяйства и населения, создают грузо- и пассажиропотоки различной мощности.

Начертание сети автомобильных дорог отвечает прежде всего главным направлениям грузовых и пассажирских перевозок. Основу дорожной сети составляют магистральные федеральные дороги, имеющие на большем своем протяжении многополосную проезжую часть с центральной разделительной полосой и усовершенствованные капитальные покрытия, обеспечивающие дальние скоростные грузовые и пассажирские перевозки и связывающие столицу Российской Федерации со столицами республик в составе Российской Федерации, административными центрами краев и областей, а также бес-

печивающие международные автотранспортные связи. При проектировании сети автомобильных дорог стремятся обеспечить связь между важнейшими административными, экономическими и культурными центрами и решить задачи обороны страны.

Развитием сети магистральных автомобильных дорог федерального значения являются скоростные автомобильные дороги и дороги обычного типа, выполняющие те же функции, но уже в масштабах республик Российской Федерации, автономных образований, краев и областей. Республиканские скоростные дороги и дороги обычного типа составляют основу сети автомобильных дорог местного значения.

Чем ниже подчиненность дороги, тем большую роль в выборе ее направления играют конкретные грузо- и пассажиропотоки отдельных городов, населенных пунктов, промышленных и сельскохозяйственных предприятий. Полностью подчиняются конкретным грузопотокам дороги местного значения и внутрихозяйственные дороги, обеспечивающие связь отдельных промышленных, сельскохозяйственных предприятий, предприятий добывающей промышленности и лесного хозяйства с пунктами доставки сырья и вывоза готовой товарной продукции. Особую роль в сети автомобильных дорог играют подъездные автомобильные дороги к аэропортам, железнодорожным станциям, речным и морским портам. Подъездные пути — это, как правило, скоростные дороги, которые при относительно небольшой загруженности движением обеспечивают быструю доставку грузов и пассажиров к пунктам погрузки-выгрузки других видов транспорта и их вывоз.

Чем выше административно-хозяйственное значение автомобильной дороги, тем выше ее совершенство, строительная материалоемкость и стоимость.

Начертание автодорожной сети является важнейшим элементом планирования народного хозяйства и во многом связано с задачами размещения и развития производственных сил и демографического развития страны. Решение этих задач в настоящее время невозможно без использования современного математического аппарата оптимизации проектных решений.

В связи с закономерным интенсивным ростом автопарка страны и загруженности сети автомобильных дорог движением огромное внимание в настоящее время уделяется решению задач совершенствования уже существующей дорожной сети и приспособлению ее к новым условиям скоростного и безопасного движения автотранспортных потоков — реконструкции существующих дорог.

Закономерное развитие сети автомобильных дорог страны связано со строительством новых дорог на вновь осваиваемых огромных территориях Севера, Сибири, Дальнего Востока, и эту задачу необходимо решать ускоренными темпами.

Дорожные сети страны проектируют на основе глубокого анализа развития экономики и демографии страны. Инвестирование огромных средств в развитие автодорожной сети всегда оказывается экономически выгодным и жизненно необходимым для экономического, демографического развития и роста обороноспособности страны.

1.4. Подвижной состав автомобильных дорог

Современные автомобильные дороги рассчитаны преимущественно на пропуск легковых и грузовых автомобилей различных марок. Гусеничные трактора, сверхтяжелые специальные карьерные автомобили, большегабаритная и медленная сельскохозяйственная и строительная техника, а также медленный, мешающий движению быстроходных автомобилей гужевой транспорт должны следовать по параллельным грунтовым дорогам или специальным транспортным путям. Основными видами подвижного состава современных автомобильных дорог являются различные типы автомобилей: легковые, грузовые автомобили разной грузоподъемности, автопоезда и автобусы. Допускается проезд мотоциклов, тракторов на пневматических шинах и отдельных видов сельскохозяйственных машин.

Следует иметь в виду, что автомобильные дороги и искусственные сооружения на них — мосты, путепроводы, эстакады, водопропускные трубы — рассчитывают на пропуск нормируемых ГОСТами нагрузок, причем в количестве не более чем это предусмотрено в проекте. Между тем во всем мире отмечается тенденция к созданию все более скоростных легковых автомобилей и грузовых автомобилей со все возрастающими нагрузками на оси. Экономическая выгода от этого оказывается эфемерной, поскольку многократно поглощается затратами на капитальные ремонты и реконструкции сети дорог.

Каждая автомобильная дорога, как чрезвычайно капиталоемкое инженерное сооружение, призвана безотказно служить в течение ряда десятилетий и при проектировании ее оказывается очень трудно предугадать параметры перспективных автомобилей. Экономически совершенно нецелесообразно строить автомобильные дороги и с заведомо избыточными запасами прочности, которые будут востребованы лишь спустя много десятилетий. Поэтому при проектировании новых автомобилей, а также новых и реконструируемых существующих дорог руководствуются некоторыми обязательными государст-

венными стандартами, регламентирующими как параметры (габариты и нагрузки) новых автомобилей, так и параметры автомобильных дорог.

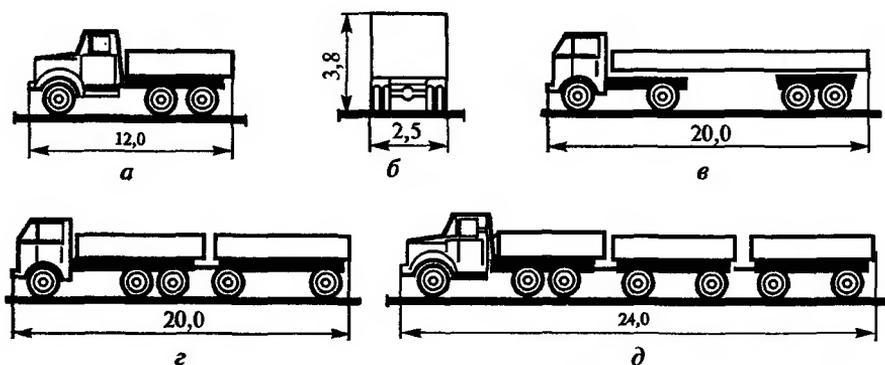
Отмечается закономерная тенденция роста количества автомобилей, проходящих по дорогам в единицу времени, которая в существенной мере влияет как на геометрические параметры автомобильных дорог, так и на требуемую прочность всех дорожных конструкций (в частности, дорожных покрытий), а следовательно, и на стоимость автомобильных дорог в целом. Поэтому перед инженером-дорожником при проектировании новых и реконструкции существующих дорог всегда стоит сложнейшая технико-экономическая задача — определение параметров перспективного (обычно на 20 лет вперед) транспортного потока.

В Российской Федерации требования к габаритам и весам автомобилей нормируются общероссийским стандартом ГОСТ 9314—59. Он предусматривает возможность движения по дорогам высших (I и II) категорий и по дорогам, где специально оговорено в Задании на проектирование, автомобилей и автобусов с предельной нагрузкой на одиночную ось 115 кН (11,5 тс), а при двух спаренных осях — 180 кН (18 тс). Для дорог II—IV категорий — 100 кН (10 тс) и для дорог V категории — 60 кН (6 тс). Среднее давление пневматика на покрытие автомобилей группы А не должно превышать 0,6 МПа (6,0 кгс/см²), а группы Б — 0,5 МПа (5,0 кгс/см²).

Некоторым типам автомобилей с большими нагрузками на оси предоставляют ограниченную возможность проезда по дорогам обычного типа и местным дорогам, в небольшом количестве и только в благоприятные сухие периоды года.

Предельные габаритные размеры автомобилей согласно ГОСТ 9314—59 ограничивают предельную высоту автомобиля до 3,8 м и ширину до 2,5 м (рис. 1.1).

Требования ГОСТ 9314—59 положены в основу нормирования параметров подвижного состава автомобильных дорог. В расчетные зависимости для определения геометрических элементов автомобильных дорог (это, прежде всего, план трассы и проектная линия продольного профиля) входит ряд характеристик, которые меняются у разных автомобилей в широких пределах, таких, как динамические характеристики автомобилей, положение глаз водителя по отношению к проезжей части и его кромки и т.д., что создает определенные трудности при оценке степени удовлетворения дорогой требований автомобильного движения. В РФ расчеты скоростей движения автомобилей ведут, ориентируясь на наиболее совершенные типы отече-



Р и с. 1.1. Предельные габаритные размеры автомобилей и автопоездов, допускаемых к движению по дорогам РФ:

а, б — грузовой автомобиль; *в* — двухосный седельный тягач с полуприцепом; *г* — трехосный тягач с двухосным прицепом; *д* — трехосный тягач с двумя двухосными прицепами (автопоезд)

ственных автомобилей массового производства — легковые автомобили типа ГАЗ-31 «Волга» и грузовые типа ЗИЛ-131.

Мосты, путепроводы, эстакады и водопропускные трубы на автомобильных дорогах проектируют на существенно большие нагрузки (типа Н-14 и НК-80), чем остальные участки дорог, учитывая, что при их строительстве должна быть предусмотрена возможность пропуска по ним единичных тяжелых видов строительной техники.

1.5. Основные характеристики движения по автомобильным дорогам

Отдельные автомобили, различные по конструктивным особенностям, грузоподъемности и техническому состоянию, следуя по дороге в двух противоположных направлениях с разными скоростями, образуют на дороге *транспортные потоки*. Чем больше различных автомобилей движется в транспортном потоке, тем более высокие требования должны предъявляться к строительству дороги. При обосновании параметров элементов автомобильных дорог используют набор различных характеристик расчетного транспортного потока, таких как интенсивность и состав движения, скорость движения, плотность транспортного потока, уровни загрузки движением, уровни удобства движения (уровни обслуживания), пропускная способность дороги.

Интенсивностью движения N называют общее количество автомобилей, проходящих через данное сечение дороги в обоих направлени-

ях в единицу времени. Интенсивность движения обычно измеряют в авт/сут или авт/ч.

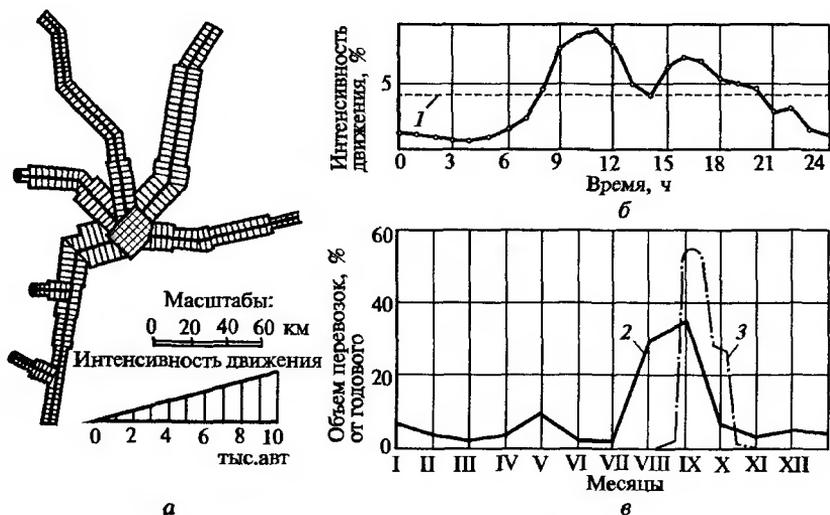
Интенсивность движения, измеряемая в физических единицах (автомобилях независимо от их марки), является во многом условным показателем, поскольку проезд по дороге нескольких тяжелых автомобилей с относительно невысокими скоростями во многом не эквивалентен проезду того же числа легковых автомобилей с высокими скоростями движения. Поэтому часто при расчетах основных параметров дорог используют интенсивность, приведенную к интенсивности расчетного эквивалентного легкового автомобиля, умножая число автомобилей каждого типа на соответствующий коэффициент приведения (табл. 1.1).

Таблица 1.1. Коэффициенты приведения к расчетному легковому автомобилю

Типы транспортных средств	Коэффициент приведения
Легковые автомобили	1
Мотоциклы с коляской	0,75
Мотоциклы и мопеды	0,5
Грузовые автомобили грузоподъемностью, тс:	
2	1,5
6	2
8	2,5
14	3
свыше 14	3,5
Автопоезда грузоподъемностью, тс:	
12	3,5
20	4
30	5
свыше 30	6

Примечания: 1. При промежуточных значениях грузоподъемности транспортных средств коэффициенты приведения следует определять интерполяцией. 2. Коэффициенты приведения для автобусов и специальных автомобилей следует принимать как для базовых автомобилей соответствующей грузоподъемности. 3. Коэффициенты приведения для грузовых автомобилей и автопоездов следует увеличивать в 1,2 раза при пересеченной и горной местности.

Интенсивность движения является одним из важнейших показателей расчетного транспортного потока, определяющего основные параметры дороги. При обосновании числа полос движения на дороге, ширины проезжей части, ширины земляного полотна и общей требуемой прочности дорожной одежды определяют *расчетную перспективную интенсивность* движения на дороге. Как показывают на-



Р и с. 1.2. Интенсивность движения на дорогах:

a — интенсивность движения на разных участках на подходах к большому городу; *б* — изменение интенсивности движения в течение суток; *в* — изменение относительного объема перевозок в течение года; 1 — среднегодовая суточная интенсивность движения; 2 — относительные объемы перевозок зерна в сельскохозяйственных районах; 3 — относительные объемы вывозки сахарной свеклы

блюдения на дорогах, интенсивность движения является чрезвычайно изменчивой величиной как по длине дороги, так и во времени.

Интенсивность движения существенно меняется по длине отдельных участков дороги, закономерно увеличиваясь на подходах к крупным городам, населенным пунктам, железнодорожным станциям, на подходах к большим мостам и т.д. (рис. 1.2, *a*).

Интенсивность движения меняется в течение суток, существенно увеличиваясь в часы «пик» и резко снижаясь в ночное время (рис. 1.2, *б*). На дорогах в сельскохозяйственных районах в периоды посевной и уборки урожая объемы перевозок увеличиваются, а следовательно, и интенсивность движения заметно возрастает (рис. 1.2, *в*). В воскресные и праздничные дни уменьшается движение грузовых автомобилей, а легковых, наоборот, увеличивается. Не остается неизменной интенсивность движения и год от года, закономерно возрастая ежегодно на 3—4%.

В связи с отмеченными закономерными колебаниями величины интенсивности движения в РФ при Обоснованиях инвестиций в объекты дорожного строительства принято оперировать *среднегодовой суточной интенсивностью движения*, при этом в качестве расчетной

принимают двадцатилетнюю перспективную интенсивность движения.

Интенсивность движения является важной, но не исчерпывающей характеристикой движения транспортных потоков.

Пропускная способность дороги (P) — это максимальное количество автомобилей, которое способен пропустить данный участок автомобильной дороги в единицу времени. Пропускная способность дорог ограничена и в тех случаях, когда она исчерпана, осуществляют реконструкцию данного участка дороги (увеличение ее мощности).

Состав движения (p) — это процентное распределение всего транспортного потока по видам транспортных средств (легковые автомобили; грузовые: легкие, средние, тяжелые и сверхтяжелые; автопоезда; автобусы).

Состав транспортного потока, зависящий от района проложения дороги, наличия промышленных предприятий, дня недели и сезона года, оказывает существенное влияние на мощность дорожных одежд, а следовательно, и на сметную стоимость строительства дороги в целом, на выбор средств организации движения и т.д.

В связи с переходом РФ на рыночные отношения за последние годы сильно изменился состав транспортного потока, который в среднем по стране в настоящее время составляет:

легковые автомобили — 70—80%;

грузовые — 20—25%;

автобусы — 5—6%.

Скорость движения (v) — важнейший качественный показатель транспортной работы автомобильной дороги и ее технического состояния.

Коэффициент загрузки движением (z) — это отношение фактической интенсивности движения N к пропускной способности P данного участка или элемента автомобильной дороги:

$$z = \frac{N}{P}.$$

Безразмерная величина z может принимать любые значения от 0 до 1 и оказывает сильнейшее влияние на уровни удобства (уровни обслуживания) и безопасность движения.

Коэффициент скорости движения (C) — это отношение скорости при каком-либо уровне загрузки движением v_z к скорости движения в свободных условиях $v_{св}$:

$$C = \frac{v_z}{v_{св}}.$$

Плотность транспортного потока (q) — это общее количество автомобилей, находящихся на 1 км данного участка дороги. Концентрация плотности транспортного потока на каких-либо участках автомобильной дороги является чутким индикатором повышенной аварийности на этом участке.

Коэффициент насыщения движением (относительная плотность) (ρ) — отношение плотности при каком-либо уровне загрузки q_z к максимальной плотности q_{\max} :

$$\rho = \frac{q_z}{q_{\max}}.$$

Концентрация относительной плотности транспортного потока, приуроченная к определенным местам, свидетельствует о том, что на этом участке будет происходить наибольшее число дорожно-транспортных происшествий (ДТП).

Безопасность движения по данному участку дороги оценивают предложенными проф. В.Ф. Бабковым коэффициентами *безопасности K_b* и *относительной аварийности K_a* (см. гл. 34).

Уровни удобства движения (уровни обслуживания) — это определенное качественное состояние транспортного потока, при котором устанавливаются характерные условия труда водителей, условия комфортабельности поездки, экономичность перевозок, а также определенный уровень аварийности (см. гл. 34).

1.6. Классификация автомобильных дорог

Автомобильные дороги по условиям движения и доступа на них транспортных средств, согласно ГОСТ Р 52398—2005, разделяют на три класса:

- автомагистрالی;
- скоростные дороги;
- дороги обычного типа.

К классу «автомагистраль» относят автомобильные дороги:

имеющие на всем протяжении многополосную проезжую часть (не менее 4 полос) с центральной разделительной полосой;

не имеющие пересечений в одном уровне с автомобильными, железными дорогами, трамвайными путями, велосипедными и пешеходными дорожками;

доступ на которые возможен только через пересечения в разных уровнях, устраиваемые не чаще чем через 5 км друг от друга.

К классу «скоростная дорога» относят автомобильные дороги:

имеющие на всем протяжении многополосную проезжую часть (не менее 4 полос) с центральной разделительной полосой;

не имеющие пересечений в одном уровне с автомобильными, железными дорогами, трамвайными путями, велосипедными и пешеходными дорожками;

доступ на которые возможен через пересечения в разных уровнях и примыкания в одном уровне (без пересечения транспортных потоков прямого направления), устраиваемых не чаще чем через 3 км друг от друга.

К классу «дорога обычного типа» относят автомобильные дороги, не отнесенные к классам «автомагистраль» и «скоростная дорога»:

имеющие единую проезжую часть или с центральной разделительной полосой;

доступ на которые возможен через пересечения и примыкания в разных или одном уровне, расположенных на различном удалении друг от друга на дорогах разных категорий.

Автомобильные дороги по транспортно-эксплуатационным качествам и потребительским свойствам разделяют на пять категорий в зависимости:

от количества и ширины полос движения;

наличия центральной разделительной полосы;

типа пересечений с автомобильными, железными дорогами, трамвайными путями и пешеходными дорожками;

условий доступа на автомобильную дорогу с примыканий в одном уровне.

Основные технические характеристики квалификационных признаков автомобильных дорог представлены в табл. 1.2.

Автомобильные дороги в России в соответствии с действующими нормативами по административному и народно-хозяйственному значению делят:

на общего пользования;

подъездные (к промышленным, сельскохозяйственным предприятиям, аэропортам, железнодорожным станциям, морским и речным портам и т.д.);

внутрихозяйственные;

временные (автозимники, дороги лесозаготовительных предприятий и т.д.).

Т а б л и ц а 1.2. Техническая классификация автомобильных дорог общего пользования

Класс автомобильной дороги	Категория автомобильной дороги	Общее количество полос движения	Ширина полосы движения, м	Центральная разделительная полоса	Пересечения с автомобильными дорогами, велосипедными и пешеходными дорожками	Пересечения с железными дорогами и трамвайными путями	Доступ на дорогу с примыкания в одном уровне
Автомобильная	IA	4 и более	3,75	Обязательна	В разных уровнях		Не допускается
	IB	4 и более	3,75				Допускается без пересечения прямого направления
Скоростная дорога Дорога обычного типа (нескоростная дорога)	IV	4 и более ¹	3,75	Обязательна	Допускаются пересечения в одном уровне со светофорным регулированием	В разных уровнях	
	II	4	3,5	Допускается отсутствие ²	Допускаются пересечения в одном уровне ⁴		
	III	2 или 3 ³	3,75	Не требуется			
	IV	2	3,5				Допускаются пересечения в одном уровне
	V	2 1	3,0 4,5 и более				

Примечания: 1. Более шести полос допускается только на существующих автомобильных дорогах. 2. На дороге категории II требование к наличию разделительной полосы определяется проектом организации дорожного движения. 3. Три полосы движения только для существующих автомобильных дорог. 4. Пересечение 4-полосной дороги категории II с аналогичной осуществляется в разных уровнях. Другие варианты пересечения дорог категории II с дорогами категорий II и III могут осуществляться как в разных уровнях, так и в одном (при условии светофорного регулирования, «отнесенных» левых поворотов или пересечения кольцевого типа).

Глава 2

ЭЛЕМЕНТЫ АВТОМОБИЛЬНЫХ ДОРОГ И СООРУЖЕНИЙ НА НИХ

2.1. Основные элементы автомобильных дорог

Автомобильная дорога — это комплекс различных по назначению и конструкции инженерных сооружений, предназначенных для безопасного движения автомобильного транспорта с расчетными скоростями и нагрузками.

Автомобильные дороги высоких (I—III) категорий имеют капитальные дорожные одежды — самый капиталоемкий элемент: жесткие — с цементобетонными покрытиями и нежесткие — с асфальтобетонными покрытиями. Автомобильные дороги IV—V категорий могут иметь дорожные одежды с покрытиями облегченного капитального, переходного и низшего типов. Дорожные одежды устраивают на спланированном и уплотненном земляном полотне.

В состав комплекса сооружений автомобильных дорог входят: развязки движения в разных уровнях, включающие в себя путепроводы и эстакады (рис. 2.1); мостовые переходы, включающие большие и средние мосты (рис. 2.2), подходы и регулиционные сооружения; малые водопропускные сооружения, такие как малые мосты (рис. 2.3) с укрепленными подмостовыми руслами, трубы круглые (рис. 2.4), прямоугольные (рис. 2.5), гофрированные, фильтрующие насыпи, переливаемые насыпи лоткового типа; сооружения системы дорож-



Р и с. 2.1. Развязка движения в разных уровнях на МКАДе



Р и с. 2.2. Большой мост через р. Волгу в Астрахани



Р и с. 2.3. Малый мост

ного водоотвода (боковые кюветы, нагорные канавы, прикромочные лотки, быстротоки, перепады, водобойные колодцы, дренажные устройства и т.д.); сооружения инженерного обустройства автомобильных дорог (автобусные остановки, площадки отдыха, АЗС, придорожные кемпинги и т.д.), сооружения регулирования движения (дорожные знаки, разметка проезжей части и вертикальная разметка, ограждения, направляющие устройства, устройства освещения, снегозащитные полосы лесонасаждения и т.д.) (рис. 2.6); здания и сооружения автотранспортной службы; на горных дорогах, кроме того,



Р и с. 2.4. Одноочковая металлическая гофрированная труба



Р и с. 2.5. Прямоугольная двухочковая железобетонная труба



Р и с. 2.6. Сооружения инженерного обустройства и организации движения на дороге

сооружают тоннели, лавинозащитные галереи, селепропускные сооружения и т.д.

Автомобильные дороги, их элементы и сооружения проектируют и строят в соответствии с действующими техническими условиями, строительными нормами и правилами (СНиП), государственными общероссийскими стандартами (ГОСТ), сводами правил (СП), отраслевыми дорожными нормами (ОДН), методическими рекомендациями и т.д.

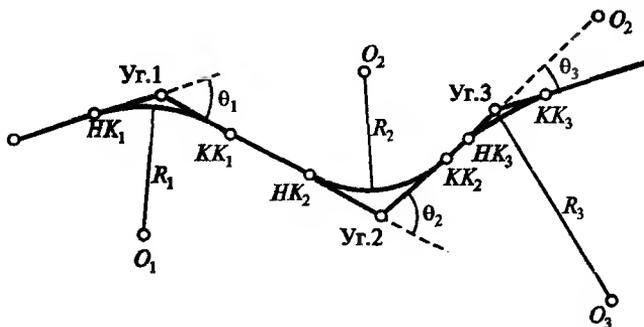
Автомобильная дорога, как и любое другое инженерное сооружение, может быть изображена в виде трех проекций: плана, продольного и поперечных профилей.

2.2. Элементы плана автомобильных дорог

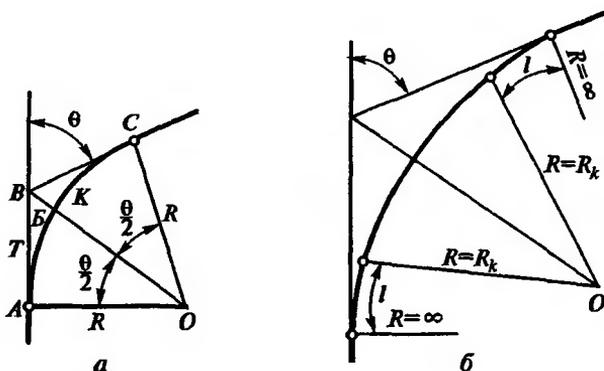
Пространственную ось автомобильной дороги, размещаемую на местности, называют *трассой дороги*.

Проекцию оси автомобильной дороги на горизонтальную плоскость называют *планом трассы*.

Автомобильные дороги должны обеспечивать перевозку пассажиров и грузов с высокими и безопасными скоростями, при этом себестоимость перевозок должна быть, по возможности, малой. Как кажется, на первый взгляд, такому требованию должна удовлетворять дорога, проложенная по кратчайшему направлению между начальной и конечной точками трассы — по «воздушной линии». Однако построить дорогу по кратчайшему направлению обычно не удастся в связи с препятствиями в виде элементов рельефа местности (возвышенности, овраги), водными преградами (реки, озера, болота), населенными пунктами (современные дороги строят в обход последних), заповедниками, в связи с необходимостью проложения дороги через



Р и с. 2.7. Простейшая трасса автомобильной дороги



Р и с. 2.8. Элементы простых закруглений:

a — круговая кривая; *б* — круговая кривая с вспомогательными переходными

участки удобного пересечения рек, железных и автомобильных дорог, удобного входа в города, а также в связи с необходимостью обхода ценных сельскохозяйственных угодий и т.д.

В простейшем случае трассу дороги представляют ломаным тангенциальным ходом с вписанными в углы поворота круговыми кривыми (рис. 2.7).

Закругления трассы в этом самом простом случае представляют следующими элементами (рис. 2.8, *a*): углом поворота θ (влево или вправо), радиусом R , кривой K , тангенсом T и биссектрисой B . Геометрические элементы простых закруглений трассы связаны между собой следующими тригонометрическими соотношениями:

тангенс

$$T = R \operatorname{tg} \frac{\theta}{2};$$

кривая

$$K = R \frac{\pi \theta}{180^\circ};$$

биссектриса

$$B = R \left(\sec \frac{\theta}{2} - 1 \right).$$

Измерение длины трассы автомобильных дорог производят по прямым линиям, т.е. по ломаному тангенциальному ходу. Очевидно, фактическая длина трассы в связи с наличием криволинейных участ-

ков будет меньше, чем измеренная. В связи с этим на каждом закруглении вычисляют величину поправки — домера, представляющего собой разницу длин по прямым (тангенсам) и по кривой:

$$D = 2T - K.$$

Простые закругления в виде круговых кривых, вписанных в угол поворота, действующие нормы проектирования допускают применять при сравнительно больших радиусах кривых:

при $R > 3000$ м — на дорогах IА, IБ и IВ категорий;

при $R > 2000$ м — на дорогах II—V категорий.

При меньших радиусах кривых на участках въезда автомобилей на кривую и выезда с нее начинает проявляться несоответствие фактической траектории движения автомобиля и плана трассы автомобильной дороги. Поэтому в большинстве случаев закругления на автомобильных дорогах представлены существенно более сложными геометрическими элементами с вспомогательными (*переходными*) кривыми переменного радиуса (рис. 2.8, б), учитывающими особенности движения автомобилей по ним.

2.3. Элементы поперечных профилей

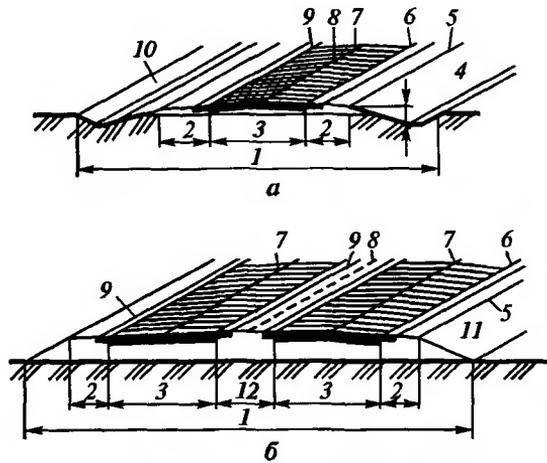
Поперечный профиль — это сечение автомобильной дороги вертикальной плоскостью, перпендикулярной к ее оси.

На верхней части земляного полотна находится *проезжая часть*, т.е. та полоса, на которой устраивают дорожную одежду и непосредственно по которой происходит движение автотранспорта (рис. 2.9, а). На автомагистралях устраивают самостоятельные проезжие части для обеспечения безопасного движения автомобилей в противоположных направлениях с высокими скоростями, предусматривая сооружение между ними *разделительной полосы*, выезд автомобилей на которую запрещен (рис. 2.9, б).

По бокам к проезжей части примыкают *обочины* — укрепленные полосы земляного полотна, предназначенные для временной стоянки автомобилей, размещения дорожно-строительных материалов во время дорожных ремонтных работ и способствующие безопасности движения. Вдоль проезжей части на обочинах устраивают *краевые полосы* — это специальные укрепленные полосы, предназначенные для предотвращения разрушения *кромки* покрытия при случайных съездах колес автомобилей с проезжей части и позволяющие полностью использовать ее для проезда автомобилей. В настоящее время краевые полосы устраивают по типу основной дорожной одежды и выде-

Р и с. 2.9. Элементы поперечного профиля автомобильных дорог:

a — с одной проезжей частью; *b* — с двумя проезжими частями и разделительной полосой; 1 — земляное полотно; 2 — обочина; 3 — проезжая часть; 4 — внутренний откос боковой канавы; 5 — бровка насыпи; 6 — кромка проезжей части; 7 — ось проезжей части; 8 — ось дороги; 9 — краевая полоса; 10 — внешний откос боковой канавы; 11 — откос насыпи; 12 — разделительная полоса

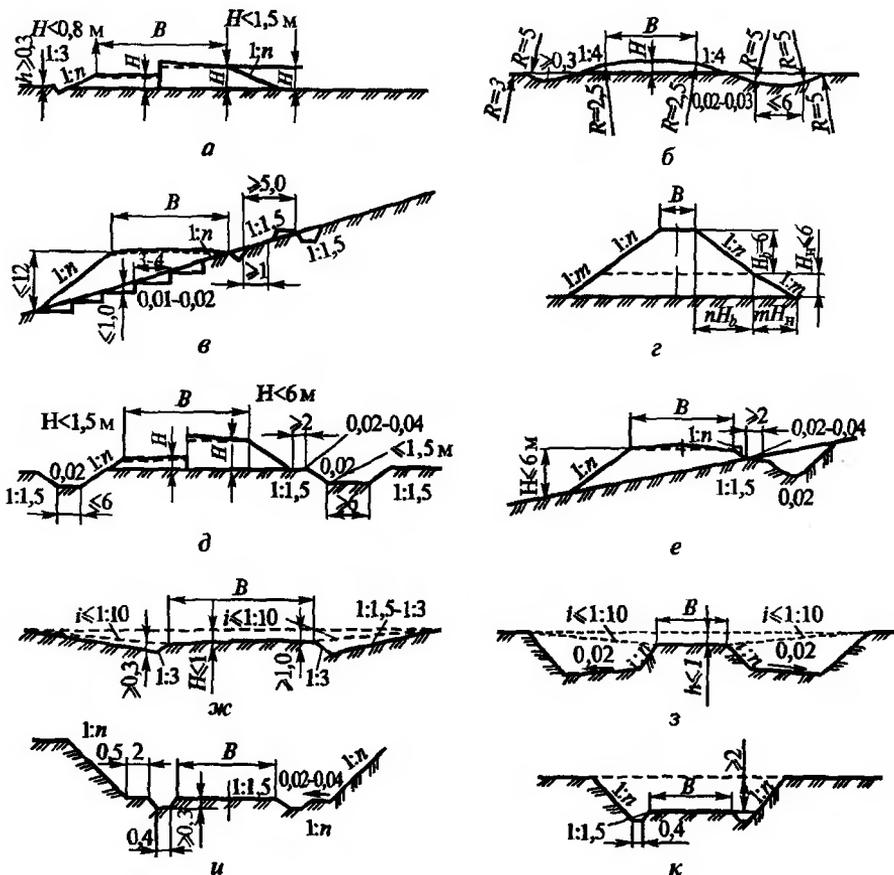


ляют их от основной проезжей части, устраивая сплошную *горизонтальную разметку*.

Проезжую часть можно размещать выше поверхности земли, устраивая земляное полотно в виде *насыпи*, или ниже ее, устраивая *выемки*. Выемки и невысокие насыпи устраивают с *боковыми канавами (кюветами)* для осушения дороги и быстрого отвода от нее воды. Проезжую часть и обочины отделяют от прилегающей местности правильно спланированными наклонными плоскостями или криволинейными поверхностями — *откосами*. В выемках и кюветах различают внутренний и внешний откосы. Линию сопряжения поверхностей обочины и откосов называют *бровкой земляного полотна*. Расстояние между бровками считают *шириной земляного полотна*. Крутизну откосов назначают в зависимости от высоты насыпи или глубины выемки, необходимости обеспечения снегонезаносимости дороги, гармоничного сочетания ее с прилегающим ландшафтом, обеспечения безопасности движения, повышения устойчивости земляного полотна и экономических соображений. Крутизну откосов характеризуют *коэффициентом заложения откоса* — отношением высоты откоса к его горизонтальной проекции — заложению.

Обычная крутизна откосов насыпей и выемок лежит в пределах от 1:1,5 до 1:4. При разработке земляного полотна в прочных скальных грунтах крутизна откосов может быть увеличена до 1:0,2, а внешних откосов мелких выемок для обеспечения снегопереноса через дорогу в зимнее время, наоборот, уменьшена до 1:10.

Для обеспечения стока воды с верхней части земляного полотна проезжей части и обочинам придают поперечные уклоны в обе стороны от оси дороги к бровкам земляного полотна. На кривых в плане от-

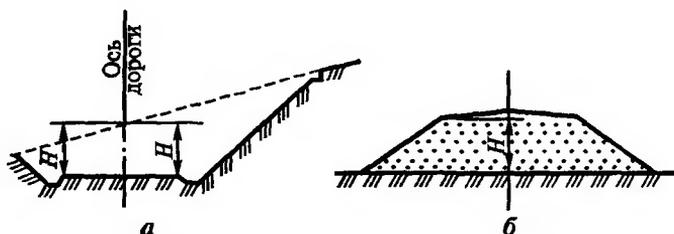


Р и с. 2.10. Принципиальные схемы поперечных профилей типовых насыпей и выемок:

a — насыпь из привозного грунта; *б* — насыпь высотой до 1,5 м; *в* — насыпь на косогоре; *г* — насыпь высотой до 6 м; *д* — насыпь из боковых резервов; *е* — насыпь из бокового резерва на косогоре; *ж* — раскрытая выемка глубиной до 1 м; *з* — выемка, разделанная под насыпь; *и* — выемка глубиной от 2 до 12 м в слабых грунтах; *к* — выемка в глинистых грунтах

носителю небольших радиусов с вспомогательными переходными кривыми (см. рис. 2.8, б) для обеспечения условий безопасного и комфортабельного движения устраивают *виражи*, т.е. верхней части полотна дороги придают односторонний поперечный уклон, направленный в сторону центра закругления.

Поперечные профили земляного полотна автомобильных дорог (кроме случаев индивидуального проектирования) принимают по ти-



Р и с. 2.11. Схема к определению рабочих отметок земляного полотна:

a — в выемке; *б* — в насыпи

повым проектам. Принципиальные типовые проектные решения поперечных профилей насыпей и выемок представлены на рис. 2.10.

Все параметры поперечного профиля земляного полотна (число полос движения, ширина полосы движения, ширина краевых полос и обочин, ширина земляного полотна в бровках, уклоны элементов поперечного профиля и т.д.) нормируются действующими строительными нормами и правилами. Ширину земляного полотна для автомобильных дорог различных категорий принимают: для 4-полосных дорог I категории — 27,5 — 28,5 м, для II — 15 м, для III — 12 м, для IV — 10 м и для V — 8 м.

Разницу между проектной отметкой бровки земляного полотна и высотой (отметкой) поверхности земли по оси дороги, определяющую высоту насыпи или глубину выемки, называют *рабочей отметкой* (рис. 2.11).

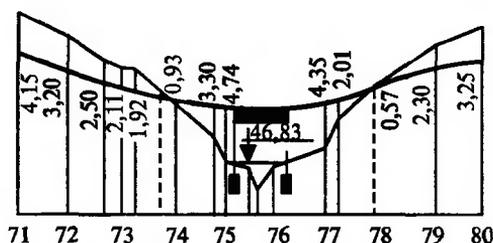
На участках закруглений в плане, при устройстве виражей рабочие отметки обычно исчисляют по внутренней бровке земляного полотна.

2.4. Элементы продольного профиля

Продольный профиль автомобильной дороги — это развернутый в плоскости чертежа продольный разрез по оси дороги (рис. 2.12).

Продольный профиль характеризует, прежде всего, величины продольных уклонов отдельных участков автомобильной дороги и расположение ее проезжей части относительно поверхности земли.

Величина продольного уклона — одна из важнейших характеристик автомобильной дороги, обеспечивающая возможность реализации расчетной скорости движения автомобиля. Поскольку фактические уклоны поверхности земли по оси дороги в ряде случаев превышают предельно допустимые для реализации расчетной скорости, продольные уклоны проезжей части на этих участках делают более



Р и с. 2.12. Продольный профиль автомобильной дороги

пологими, срезая грунт на повышенных участках рельефа и, наоборот, подсыпая его на пониженных.

Участки автомобильных дорог, где проезжая часть в результате срезки грунта расположена ниже поверхности земли, называют *выемками*, а участки, где проезжая часть расположена на искусственно насыпанном и уплотненном грунте, — *насыпями*. Вследствие необходимости устройства насыпей и выемок поверхность дороги не совпадает с поверхностью земли.

Продольный профиль автомобильной дороги изображают в виде специального чертежа (рис. 2.13), являющегося одним из основных документов, по которым осуществляют строительство автомобильной дороги, и представляемого обычно в следующих масштабах: горизонтальный — 1:5000, вертикальный — 1:500, геологический — 1:50.

На горных дорогах, а также при проектировании городских улиц и дорог чертеж продольного профиля строят в более крупных масштабах: горизонтальный — 1:2000, вертикальный — 1:200. В районах с очень спокойным рельефом чертеж продольного профиля, наоборот, иногда строят в более мелких масштабах: горизонтальный — 1:10 000, вертикальный — 1:1000.

Чертеж продольного профиля обязательно содержит следующие данные о местности и проектных решениях:

изображение проектной линии продольного профиля по бровке земляного полотна (красная линия);

изображение профиля земли по оси дороги (черный профиль), представляемое двойной линией (на расстоянии 20 мм одна от другой);

грунтово-геологический разрез по оси дороги;

проектные данные о системе поверхностного водоотвода, искусственных сооружениях (трубах, мостах, путепроводах), съездах и переездах;

рабочие отметки и точки нулевых работ: рабочие отметки (высоты насыпей и глубины выемок) подписывают для насыпей над проект-

Пикет, км	Расстояние, м	Отметка, м		Рабочая отметка, м	
		Фактическая	Проектная	Насыпь	Выемка
73+00	50	221,34	224,03	2,69	-
73+50		221,30	224,03	2,73	-
73+60	10	221,00	224,03	3,03	-
73+76	16	220,98	224,03	3,05	-
74+00	24	219,68	224,03	4,35	-

М 1:5000 по горизонтали
М 1:500 по вертикали
М 1:50 по вертикали — грунты

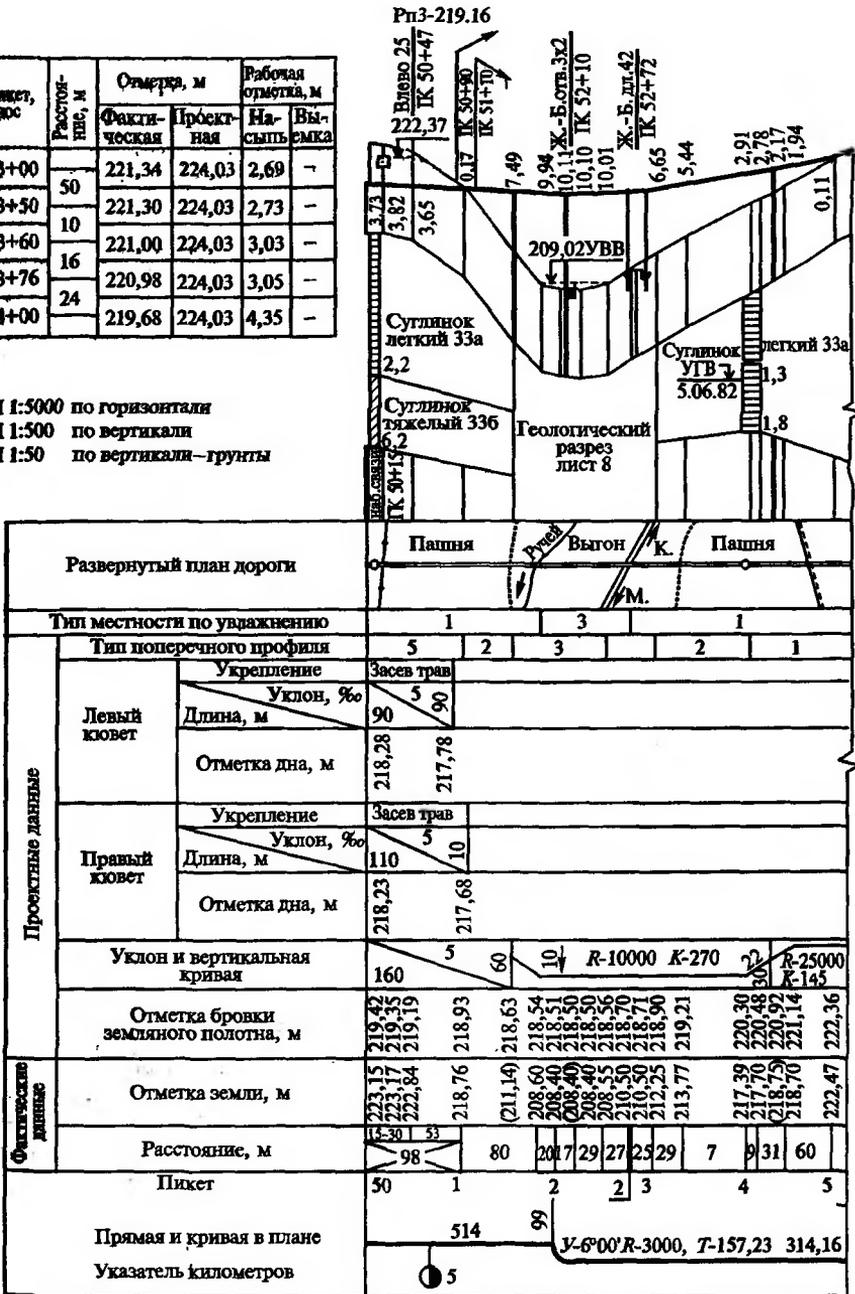
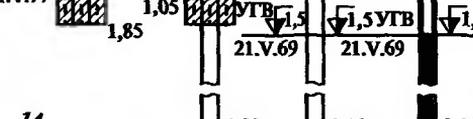
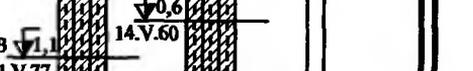
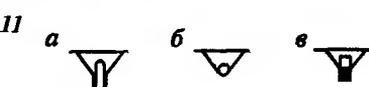
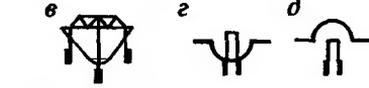
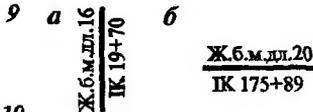
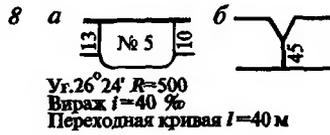
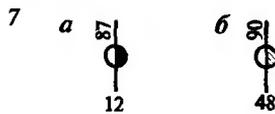
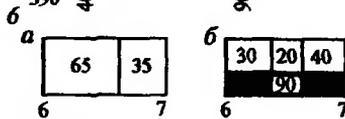
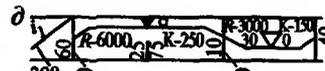
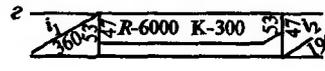
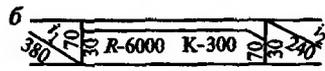
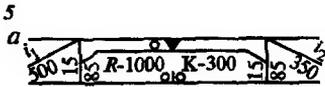
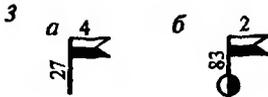
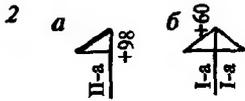
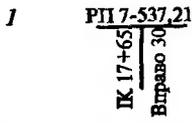


Рис. 2.13. Пример оформления продольного профиля вновь проектируемой автомобильной дороги



Р и с. 2.14. Основные условные обозначения на продольном профиле:

- 1* — репер 7, высота 537,211, расположенный в 30 м вправо от ПК 17+65;
- 2* — автомобильные съезды и переезды: *а* — съезд по типовому проекту II-а влево в 98 м от меньшего пикета; *б* — переезд по типовому проекту I-а в 60 м от пикета;
- 3* — железнодорожные переезды;
- а* — неохраняемый переезд на ПК + 27; *б* — охраняемый переезд на ПК + 83. Цифры над флажками указывают категорию переезда;
- 4* — водоотвод;
- а* — направление нагорной канавы и ее протяжение; *б* — сброс воды влево; *в* — сброс воды вправо;
- 5* — вертикальные кривые:
- а* — выпуклая вертикальная кривая с восходящей и нисходящей ветвями; *б* — выпуклая кривая с нисходящей ветвью; *в* — вогнутая кривая с нисходящей и восходящей ветвями; *г* — вогнутая кривая с восходящей ветвью; *д* — сопряжение обратных вертикальных кривых;
- 6* — пикетаж:
- а* — промежуточная точка на ПК 6+65; *б* — рубленный пикет длиной 90 м с промежуточными точками на ПК 6+30 и ПК 6+50;
- 7* — километровые знаки:
- а* — километровый знак проектируемой дороги; *б* — километровый знак на реконструируемой дороге;
- 8* — кривые в плане:
- а* — кривая радиусом 500 м на углу поворота № 5 влево $26^{\circ}24'$; поперечный уклон выража 40% , длина переходной кривой 40 м, начало кривой — на +13, конец — на +10; *б* — кривая при угле поворота менее 45° ;
- 9* — местоположение водопропускных сооружений:
- а* — проектируемый железобетонный мост длиной 16 м на ПК 19+70; *б* — существующий железобетонный мост длиной 20 м на ПК 175+89;
- 10* — мосты:
- а* — деревянный мост или путепровод; *б* — капитальный мост или путепровод с балочным пролетным строением; *в* — мост с пролетным строением с ездой понизу; *г* — путепровод над проектируемой дорогой; *д* — путепровод под проектируемой дорогой;
- 11* — трубы и другие водопропускные сооружения:
- а* — овоидальная капитальная труба; *б* — круглая капитальная труба; *в* — прямоугольная капитальная труба; *г* — деревянная прямоугольная труба; *д* — фильтрующая насыпь; *е* — лоток;
- 12* — подпорные стены:
- а* — верховая подпорная стена; *б* — низовая подпорная стена; *в* — верховая одевающая стена; *г* — низовая одевающая стена;
- 13* — шурфы и буровые скважины:
- а* — шурф № 57 глубиной 1,85 м в суглинистом грунте, грунтовые воды по наблюдениям 21 мая 1977 г. на глубине 1,10 м (ширина колонки на профиле 6 мм); *б* — шурф в пылеватом суглинке, углубленный буровой скважиной до 4,00 м, граница оглеения на глубине 0,60 м; *в* — скважина глубиной 8,10 м (ширина колонки на профиле 2 мм); *г* — то же, скважина при обозначении консистенции грунтов;
- 14* — обозначение консистенции связных грунтов и влажности несвязных грунтов в буровых скважинах на инженерно-геологических паспортах мостовых переходов:
- а* — слабовлажные песчаные грунты и твердые связные грунты; *б* — слабовлажные песчаные грунты и тугопластичные связные грунты; *в* — очень влажные песчаные грунты и мягкопластичные связные грунты; *г* — водонасыщенные песчаные грунты и текучие связные грунты

ной линией, для выемок — под ней, а точки нулевых работ обозначают пунктирной ординатой;

специальную таблицу, содержащую графы: развернутый план трассы; грунты верхней части земляного полотна; тип дорожной одежды; типы поперечных профилей земляного полотна; укрепления, уклоны и отметки кюветов; уклоны и вертикальные кривые; проект-

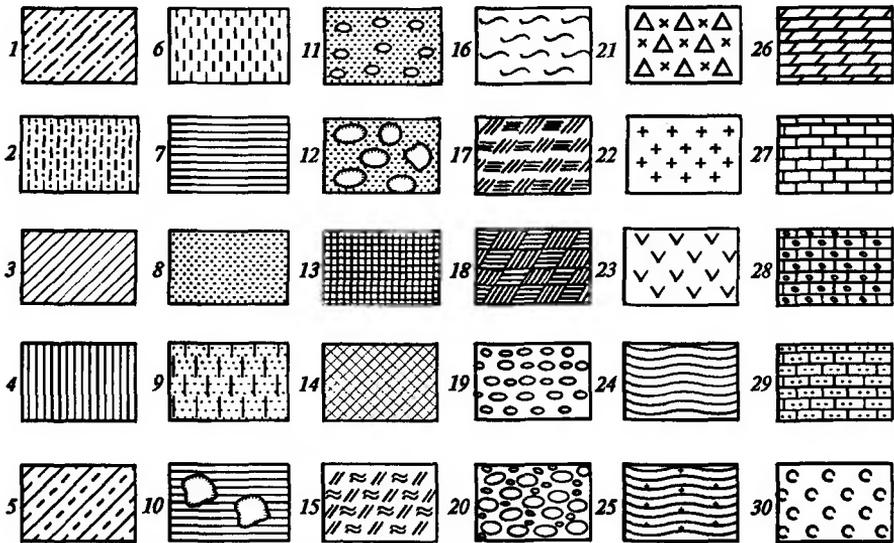


Рис. 2.15. Условные обозначения грунтов и горных пород на геологическом разрезе продольного профиля автомобильных дорог:

1 — супесь; 2 — супесь мелкая; 3 — суглинок; 4 — суглинок тяжелый; 5 — суглинок пылеватый; 6 — грунт пылеватый; 7 — глина; 8 — песок среднезернистый; 9 — песок пылеватый; 10 — глина валунная; 11 — песок гравелистый; 12 — каменный навал с песком; 13 — торф; 14 — сапропель; 15 — мохорастительный покров; 16 — ил, иловатый грунт; 17 — насыпной грунт; 18 — строительный мусор; 19 — гравий; 20 — галька; 21 — дресва; 22 — гранит; 23 — диабаз; 24 — сланец глинистый; 25 — сланец метаморфический; 26 — мергель; 27 — известняк; 28 — известняк ракушечник; 29 — песчаник (со значком «гл» — глинистый, «кв» — кварцевый и т.д.); 30 — засоленность грунта (показывается дополнительно на условном обозначении грунтов)

ные высоты (отметки) по бровке земляного полотна; высоты (отметки) земли по оси дороги; расстояния; пикеты, кривые, километры.

Проектную линию продольного профиля при традиционном проектировании представляют сопряженными между собой в точках с одинаковыми продольными уклонами элементами: параболическими кривыми и прямыми.

При автоматизированном проектировании проектную линию продольного профиля представляют либо в виде традиционных элементов (параболических вертикальных кривых и прямых), либо, чаще всего, в виде непрерывных плавных кривых переменного радиуса.

При оформлении чертежа продольного профиля используют условные обозначения, представленные на рис. 2.14.

На продольном профиле на 2 см ниже линии поверхности земли наносят грунтовый профиль в масштабе 1:50, на котором выписыва-

ют наименование грунтов, а в буровых скважинах и шурфах при помощи условных обозначений показывают виды грунтов и их консистенцию (рис. 2.15).

Проектную линию продольного профиля изображают линией в два раза более толстой, чем черный профиль земли по оси трассы.

Глава 3

ДВИЖЕНИЕ АВТОМОБИЛЯ ПО ДОРОГЕ

3.1. Уравнение тягового баланса автомобиля

Скорость движения автомобилей является одним из важнейших показателей транспортно-эксплуатационных качеств автомобильных дорог, во многом определяющим время сообщения, уровни удобства и безопасность движения, транспортные расходы, потери народного хозяйства, связанные со временем нахождения в пути пассажиров и грузов, и т.д.

Все элементы автомобильной дороги должны обеспечивать возможность безопасного движения автомобилей с расчетной скоростью. Чем выше интенсивность движения по дороге, тем большие взаимные помехи испытывают автомобили, а скорости их движения соответственно снижаются. Именно поэтому требования к отдельным элементам трассы дороги устанавливают из условия свободного движения одиночного автомобиля с расчетной, нормируемой СНИПом скоростью.

Движущийся по дороге автомобиль испытывает сложную систему перемещений: поступательное движение на прямых, вращение вокруг вертикальной оси при движении по закруглениям трассы в плане, вращения вокруг горизонтальных продольной и поперечной осей, колебания, вызываемые наездами колес на неровности покрытия, и т.д. Однако пока все эти особенности движения автомобилей еще не могут быть в полной мере учтены при проектировании автомобильных дорог и поэтому при обосновании требований к геометрическим элементам дорог условно предполагают, что автомобиль движется без колебаний по ровной, твердой недеформируемой поверхности качения.

Режим движения автомобиля по дороге определяют три фактора: эксплуатационные свойства автомобилей, дорожные условия, обеспечивающие возможность развивать ту или иную безопасную скорость движения, и индивидуальные особенности водителей, изби-

рающих в зависимости от восприятия ими дорожных условий наиболее удобную для себя скорость, при которой обычно не полностью используются максимальные, конструктивные, динамические возможности автомобилей. Для обеспечения проектом автомобильной дороги возможности безопасного, экономичного и комфортабельного проезда необходим комплексный учет взаимного влияния этих факторов.

Фактическое движение автомобиля по дороге в связи с непрерывно меняющимися условиями движения (параметры плана, продольного профиля, состояние покрытия и обочин, обстановка на придорожной полосе и т.д.) происходит с переменными скоростями. В общем случае движение автомобиля с переменной скоростью может быть описано дифференциальным уравнением тягового баланса автомобиля:

$$\frac{P_a - P_w}{G_{\text{авт}}} = f \pm i + \frac{\delta}{g} \frac{dv}{dt}, \quad (3.1)$$

где P_a — сила тяги автомобиля; P_w — сила сопротивления воздушной среды; $G_{\text{авт}}$ — вес автомобиля; f — коэффициент сопротивления качению колес автомобиля; i — продольный уклон дороги, принимаемый со знаком «+» на подъеме и со знаком «-» на спуске; δ — коэффициент, учитывающий влияние вращающихся масс автомобиля; g — ускорение свободного падения; v — скорость автомобиля; t — время.

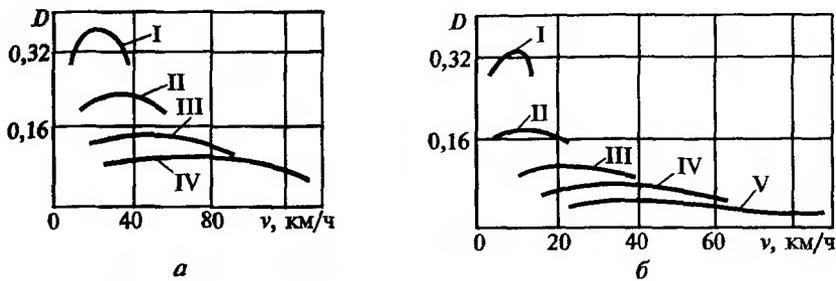
Левая часть уравнения (3.1), представляющая собой отношение свободного тягового усилия (за вычетом сопротивления воздушной среды) на ведущих колесах автомобиля к его весу, названа академиком Е.А. Чудаковым *динамическим фактором*:

$$D = \frac{P_a - P_w}{G_{\text{авт}}}. \quad (3.2)$$

Тогда дифференциальное уравнение тягового баланса автомобиля может быть представлено в следующем виде:

$$\frac{dv}{dt} = \frac{g}{\delta} [D - (f \pm i)]. \quad (3.3)$$

Уравнения тягового баланса автомобилей (3.1—3.3) можно непосредственно решить для некоторых частных случаев (например, для определения предельно допустимого продольного уклона проектной линии продольного профиля), а можно решать в конечных разностях,



Р и с. 3.1. Графики динамических характеристик автомобилей:

а — ГАЗ-24; б — ЗИЛ-130; I—V — передачи

моделируя, таким образом, неравномерное движение автомобиля по дороге.

Уравнение равенства внешних и внутренних сил (тягового баланса) может быть выражено зависимостью:

$$P_p = P_f \pm P_i + P_w \pm P_j, \quad (3.4)$$

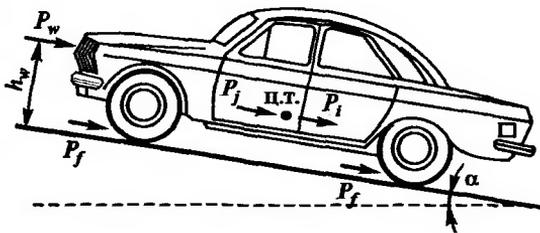
где P_p — тяговое усилие на ведущих колесах автомобиля; P_f — сопротивление качению; P_i — сопротивление движению на подъем или спуск; P_w — сопротивление движению воздушной среды; P_j — сопротивление инерционных сил.

Величина динамического фактора (3.2), характеризующая запас тягового усилия на единицу веса автомобиля, движущегося со скоростью v , который может быть израсходован на преодоление дорожных сопротивлений $f \pm i$ и ускорения автомобиля j , меняется в зависимости от скорости движения данного автомобиля. График динамической характеристики автомобиля конкретной марки в зависимости от скорости его движения $D = f(v)$, названный академиком Е.А. Чудаковым *динамической характеристикой*, необходим для выполнения тяговых расчетов (рис. 3.1).

3.2. Сопротивления движению автомобиля

Сила тяги автомобиля, развиваемая двигателем на ведущих колесах, согласно закону сохранения энергии, полностью расходуется на преодоление сил сопротивления движению.

Как следует из уравнения (3.4), в случае ускоренного движения на подъем на автомобиль действуют следующие силы (рис. 3.2): сопротивление качению P_f , сопротивление движению на подъем P_i , сопротивление воздуха P_w и инерционные силы автомобиля и вращающихся



Р и с. 3.2. Силы сопротивления движению, действующие на автомобиль

ся масс его механизмов P_j , возникающие при изменении скорости движения.

Силы сопротивления качению и сопротивления воздуха всегда действуют на движущийся автомобиль. Силы сопротивления движению на подъем и силы инерции в зависимости от продольного профиля автомобильной дороги и режима движения автомобиля могут или отсутствовать, или даже иметь отрицательный знак, наоборот, способствуя движению (например, при спуске под уклон или при торможении).

Сопротивление качению возникает в связи с потерями энергии на деформацию шин и покрытия проезжей части дороги. На ровных и прочных цементобетонных и асфальтобетонных покрытиях основным фактором, определяющим сопротивление качению, является деформация шин. На менее ровных и менее прочных щебеночных и гравийных покрытиях добавляются потери, связанные с наездами на неровности и деформациями покрытий. На грунтовых дорогах с мягкой поверхностью сопротивление качению связано главным образом с деформациями шин и грунта при образовании колеи.

При движении по дорогам с твердыми покрытиями сопротивление качению прямо пропорционально давлению на дорогу:

$$P_f = \sum_{i=1}^n G_i f_i,$$

где G_i — нагрузка на дорогу от каждого i -го колеса; f_i — соответствующие коэффициенты сопротивления качению; n — число колес автомобиля.

Обычно силу сопротивления качению относят к общему весу автомобиля, тогда общий коэффициент сопротивления качению f :

$$f = \frac{\sum_{i=1}^n P_{fi}}{G_{\text{авт}}},$$

где $\sum_{i=1}^n P_{fi}$ — суммарное сопротивление качению всех колес автомобиля; $G_{авт}$ — вес автомобиля.

Коэффициент сопротивления качению зависит от скорости движения автомобиля и от характеристик эластичности шин. Потери энергии при наездах колес автомобиля на неровности покрытия возрастают пропорционально квадрату скорости, особенно после превышения ее некоторого критического значения ($v = 50$ км/ч). Однако при скоростях движения до 50 км/ч сопротивление качению возрастает очень медленно и его можно считать практически неизменным. Коэффициент сопротивления качению f_0 при скоростях движения до 50 км/ч имеет следующие значения:

Покрyтия	Значения f_0
Цементобетонные и асфальтобетонные	0,01—0,02
Щебеночные или гравийные, обработанные органическими вяжущими, с ровной поверхностью качения	0,02—0,025
Щебеночные или гравийные, не обработанные вяжущими, с небольшими выбоинами	0,03—0,04
Бульжная мостовая	0,04—0,05
Грунтовая дорога, ровная сухая и плотная	0,03—0,06
Пашня, переувлажненный грунт, сыпучие пески	0,15—0,30 и более

При скоростях движения автомобилей, близких к расчетным, для проектирования дорог коэффициент сопротивления качению принимают:

$$f_v = f_0[1 + 0,01(v - 50)], \quad (3.5)$$

где v — скорость автомобиля, км/ч; f_0 — коэффициент сопротивления качению при скоростях до 50 км/ч; f_v — то же, при скорости $50 < v < 140$ км/ч.

Аэродинамическое сопротивление воздуха движению автомобиля складывается из лобового сопротивления, трения воздуха о боковую поверхность автомобиля, завихрений воздушных струй за автомобилем, около колес и под кузовом и сопротивления воздуха, проходящего через радиатор и подкапотное пространство.

Суммарную силу сопротивления воздуха движению автомобиля определяют по уравнению аэродинамики:

$$P_w = \frac{C\rho\omega v^2}{13}, \quad (3.6)$$

где C — коэффициент сопротивления воздушной среды, зависящий от формы автомобиля и гладкости его поверхности; ρ — плотность воздуха на уровне моря ($\rho = 0,125 \text{ кгс} \cdot \text{с}^2/\text{м}^4$); ω — площадь лобового сопротивления, м^2 ; v — скорость автомобиля относительно воздушной среды, км/ч : при попутном ветре $v = v_{\text{авт}} - v_{\text{в}}$; при встречном ветре $v = v_{\text{авт}} + v_{\text{в}}$.

Остальные параметры, входящие в формулу (3.6), определяют по данным табл. 3.1 либо по автомобильному справочнику непосредственно для каждой конкретной марки современного автомобиля.

Т а б л и ц а 3.1. Основные аэродинамические характеристики автомобилей

Тип автомобиля	Плотность воздуха на уровне моря $C\rho$, $\text{кгс} \cdot \text{с}^2/\text{м}^4$	Площадь лобового сопротивления ω , м^2
Грузовой	0,05—0,07	3,0—7,0
Автобус с кузовом вагонного типа	0,025—0,05	4,5—7,0
Легковой	0,015—0,030	1,4—2,6
Обтекаемый спортивный, гоночный	0,010—0,015	1,0—1,5

Обычно тяговые расчеты ведут применительно к движению в спокойную безветренную погоду.

Силу сопротивления воздушной среды (3.6) вводят в выражение величины динамического фактора (3.2) конкретной марки автомобиля в зависимости от скорости его движения.

Сопротивление движению P_i на подъем с уклоном i создается в результате дополнительных затрат энергии на движение автомобиля по наклонным в продольном профиле участкам дороги:

$$P_i = G_{\text{авт}}i.$$

Таким образом, коэффициент сопротивления движению на подъем, представляющий собой отношение силы P_i к весу автомобиля $G_{\text{авт}}$, равен величине продольного уклона дороги i , выражаемого в десятичных дробях.

Сопротивление инерционных сил автомобиля P_j , возникающее при изменении скорости его движения (разгона или торможения),

складывается из сил поступательного движения и инерционных сил вращающихся частей автомобиля. При массе автомобиля $m = \frac{G_{\text{авт}}}{g}$ и скорости его движения v (в м/с) величина инерционной силы поступательного движения составляет:

$$P_j^* = m \frac{dv}{dt} = \frac{G_{\text{авт}}}{g} \frac{dv}{dt} = G_{\text{авт}} j,$$

где $\frac{dv}{dt}$ — ускорение автомобиля; $j = \frac{1}{g} \frac{dv}{dt}$ — относительное ускорение.

Наряду с сопротивлением инерционных сил поступательного движения возникают силы инерции вращающихся частей автомобиля (колес, механизмов двигателя и трансмиссии). Для учета влияния вращающихся масс автомобиля к инерционным силам поступательного движения P_j^* обычно вводят поправочный коэффициент учета вращающихся масс δ больше единицы, тогда выражение для общей инерционной силы автомобиля:

$$P_j = \delta P_j^*.$$

Чем больше передаточное число коробки передач, тем выше значение коэффициента δ :

Передача	II	III	IV	V
Коэффициент δ для автомобилей				
ГАЗ—53.	1,52	1,18	1,09	—
ЗИЛ—130.	1,88	1,3	1,15	1,09
МАЗ—500	1,7	1,19	1,06	1,04

Для легковых автомобилей, движущихся на прямой передаче, коэффициент вращающихся масс принимают в пределах $\delta = 1,05 — 1,06$.

Полученные, таким образом, относительные силы сопротивления движению входят в дифференциальное уравнение тягового баланса автомобиля (3.3) и используют как для решения частных задач определения геометрических параметров элементов автомобильных дорог, так и для детального моделирования движения автомобиля по дороге.

3.3. Сцепление колеса с покрытием

Механическая энергия, вырабатываемая двигателем автомобиля, через трансмиссию передается на его ведущие колеса (рис. 3.3).

Крутящий момент колеса M_k вызывает появление пары сил: окружной силы P_k , прилагаемой к площадке контакта шины с покрытием дороги, направленной в сторону, противоположную направлению движения, и тягового усилия P_p , передающегося через ведущий мост на раму или непосредственно на кузов автомобиля (рис. 3.4).

Тяговое усилие на колесах автомобиля, обеспечиваемое мощностью двигателя, может быть развито только в том случае, если между ведущими колесами и дорогой имеется необходимое сцепление.

Величину отношения максимального тягового усилия P_k , при превышении которого начинается пробуксовывание ведущих колес, к вертикальной нагрузке на эти колеса G_k называют *коэффициентом сцепления* колеса с дорогой φ :

$$\varphi = \frac{P_k}{G_k}.$$

Для улучшения условий сцепления шин с поверхностью покрытия и обеспечения эффективного выжимания воды из зоны контакта колеса с дорогой при качении колес по мокрому покрытию поверхность беговой дорожки пневматических шин делают рифленой, устраивая на ней выпуклый рисунок — протектор.

В связи с различной эластичностью шин в прямом и поперечном направлениях сила сцепления шин с покрытием неодинакова при разных направлениях приложения сил. Однако, учитывая, что разница в величинах сопротивлений шин сдвигу невелика, при расчетах обычно принимают, что в любом направлении сцепление шины с покрытием одинаково.

При расчетах геометрических элементов автомобильных дорог всегда соблюдают условие, что суммарное тяговое усилие, действующее в плоскости контакта шин ведущих колес с дорогой, не должно

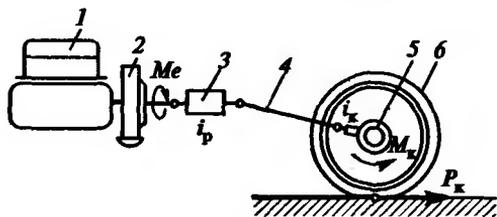


Рис. 3.3. Схема передачи вращающегося момента двигателя ведущими колесами автомобиля:

1 — двигатель; 2 — маховик и сцепление; 3 — коробка передач; 4 — карданный вал; 5 — главная передача; 6 — шина

превышать величины силы сцепления, при которой начинается пробуксовывание колеса при его качении.

В связи с этим нормируют две величины коэффициента сцепления:

коэффициент продольного сцепления, соответствующий началу пробуксовывания в плоскости качения, который используют при вычислении длины тормозного пути при полной блокировке колес и при определении продольных уклонов преодолеваемых подъемов продольного профиля автомобильных дорог;

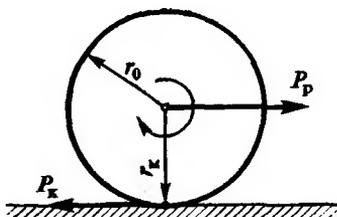
коэффициент поперечного сцепления — поперечная составляющая коэффициента сцепления при смещении колеса под углом к плоскости поступательного движения.

Многочисленные отечественные и зарубежные исследования показали, что на величину коэффициента сцепления большее влияние оказывает состояние покрытия, чем его тип. При любых покрытиях выступающие минеральные частицы, делающие покрытие шероховатым, вдавливаются в резину, упругие деформации которой являются основной причиной сопротивления колеса смещению по покрытию.

Впадины на поверхности дорожного покрытия между выступами шероховатости при увлажнении и загрязнении заполняются водой, грязью, продуктами износа шин и покрытия, что уменьшает глубину вдавливания выступов шероховатости в резину. Пленка влаги и увлажненная грязь действуют как смазка, разделяющая резину колеса с покрытием, что приводит к резкому снижению величины коэффициента сцепления. Кроме того, при высоких скоростях движения автомобилей шины не успевают полностью деформироваться в связи с малой продолжительностью контакта шины с поверхностью покрытия и выступы шероховатости вдавливаются в резину на меньшую глубину. Именно поэтому с ростом скорости движения соответственно снижается коэффициент сцепления. На сухих покрытиях это снижение менее ощутимо, чем на влажных и загрязненных.

В среднем считают, что коэффициент продольного сцепления шин с дорогой при слабо изношенном протекторе пневматических колес для влажного ровного цементобетонного покрытия зависит от скорости движения следующим образом:

Скорость автомобиля, км/ч	30	40	60	80	100	120	150	175
Коэффициент сцепления ϕ	0,50	0,45	0,39	0,35	0,32	0,29	0,26	0,24



Р и с. 3.4. Тяговое усилие на ведущих колесах автомобиля

Так как во время экстренного торможения скорость автомобиля меняется в широких пределах от некоторого максимального значения до нуля, при расчетах длины тормозного пути исходят из величины коэффициента сцепления, относящегося к средней скорости на участке торможения, принимаемой равной 30—40 км/ч. Коэффициенты продольного сцепления колеса с дорогой ϕ в зависимости от состояния покрытия принимают равными:

Состояние покрытия	Значение коэффициента ϕ
Сухое шероховатое	0,7 и более
Сухое гладкое	0,6
Влажное	0,5
Мокрое	0,4—0,3
Грязное	0,2—0,3
Обледенелое	0,1—0,05

Коэффициент сцепления пневматических шин автомобилей с поверхностью проезжей части зависит от погодных условий, сильно меняется в ходе годового цикла, повышаясь летом и значительно снижаясь во время гололеда и снегопада в зимний период. Для повышения коэффициента сцепления колес автомобилей с дорогой в этих случаях иногда меняют обычные покрышки на специальные, используют шипованную резину, применяют различные противогололедные реагенты и посылают проезжую часть дороги песком или шлаком.

При сильном износе протектора на мокром покрытии может возникнуть опаснейшее явление — *аквапланирование*, когда между шиной и покрытием в начальной части зоны контакта образуется вода-

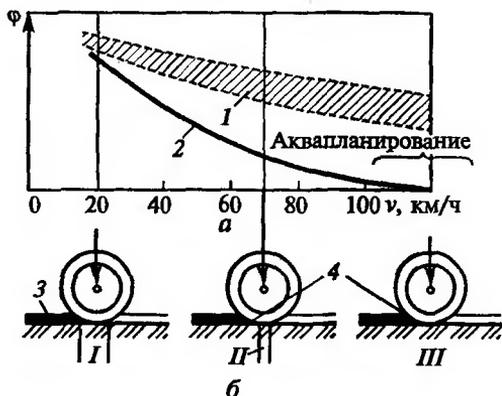


Рис. 3.5. Схема возникновения аквапланирования колес:

a — зависимость коэффициента сцепления колеса с мокрым покрытием от скорости; *б* — схема уменьшения зоны контакта шины с мокрым покрытием при увеличении скорости; *I* — шины с новым протектором; *2* — изношенные шины; *3* — пленка воды толщиной более 1 мм; *4* — водяной клин под шиной; *I* — полная зона контакта колеса с покрытием; *II* — уменьшенная зона контакта; *III* — отсутствие зоны контакта

ной клин, создающий гидродинамическую подъемную силу, и автомобиль полностью теряет управление (рис. 3.5).

Коэффициент сцепления колеса автомобиля с дорогой является важнейшим показателем, обеспечивающим транспортно-эксплуатационные качества дороги, поскольку от него зависит возможность реализации тяговых характеристик автомобиля для движения с расчетной скоростью, боковая устойчивость автомобиля при движении по криволинейным участкам автомобильных дорог и возможность своевременного торможения перед неожиданно возникшим препятствием или пешеходом.

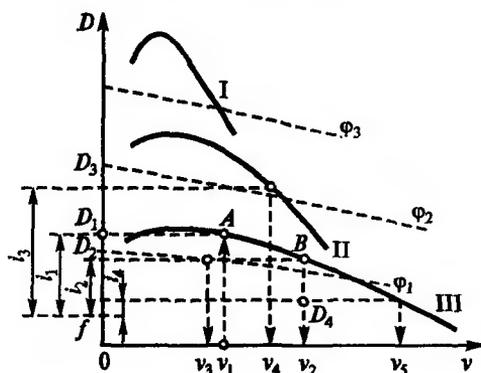
3.4. Задачи, решаемые с использованием уравнения тягового баланса

Как следует из рис. 3.6, график динамических характеристик автомобиля дает возможность при проектировании автомобильных дорог решать следующие практические задачи.

1. *Определение величины максимальных продольных уклонов* проектной линии продольного профиля, которые может преодолевать автомобиль данной марки при движении с заданной постоянной (расчетной) скоростью.

Для решения этой задачи на графике динамических характеристик от абсциссы с заданной скоростью v_1 восстанавливают перпендикуляр до пересечения с кривой динамической характеристики соответствующей данной передаче. Ордината точки пересечения дает значение динамического фактора D_1 . Тогда, учитывая, что

$$D = i + f + j,$$



Р и с. 3.6. График динамических характеристик, используемый при выполнении тяговых расчетов

а коэффициент инерционных сил при равномерном движении $j = 0$, получаем величину искомого предельного уклона:

$$i_1 = D_1 - f.$$

Если заданная скорость движения v_1 соответствует расчетной скорости движения для дороги данной категории, то таким образом находят предельный допустимый уклон i_1 проектной линии продольного профиля для автомобильной дороги соответствующей категории.

2. *Определение постоянной скорости v_2* , с которой автомобиль может преодолеть участок дороги на подъем с продольным уклоном i_2 .

Величину динамического фактора для решения этой задачи определяют как:

$$D_2 = i_2 + f.$$

Тогда, отложив это значение на оси ординат и найдя соответствующую абсциссу на кривой динамических характеристик, определяют искомую скорость движения v_2

Полученные результаты проверяют на достаточность сцепления шин с покрытием. На участке дороги с большим уклоном i_3 движение окажется возможным только на более низкой передаче со скоростью v_3 при условии, что фактический коэффициент сцепления будет превышать f .

Рассмотренные случаи тяговых расчетов предполагают, что движение происходит при полном открытии дроссельной заслонки. На участках продольного профиля с малыми продольными уклонами скорость движения при этом была бы слишком велика. Поэтому движение на этих участках происходит при менее напряженной работе двигателя с меньшей степенью открытия дроссельной заслонки. По наблюдениям Э.Л. Палшайтиса, за режимами движения автомобилей на подъемах водители устанавливают следующую степень открытия дроссельной заслонки в зависимости от величины продольного уклона:

Продольный уклон, %	0—20	20—40	40—70	> 70
Степень открытия дроссельной заслонки, % .	40	50—60	60—85	100
Передача, используемая грузовым автомобилем.	V, IV	V, IV	III, II	I

При детальном расчете скоростей движения на таких участках исходят из графиков динамических характеристик, соответствующих разной степени открытия дроссельной заслонки.

3. *Определение ускорения*, развиваемого автомобилем при разгоне. Как следует из уравнения (3.3), при коэффициенте сопротивления

качению f , продольном уклоне i и некоторой начальной скорости v ускорение поступательного движения автомобиля (м/с^2) можно определить:

$$J = \frac{dv}{dt} = \frac{g}{\delta} [D - (f + i)]. \quad (3.7)$$

4. Построение эпюры скоростей движения автомобиля, соответствующей геометрии автомобильной дороги на исследуемом участке (математическое моделирование движения автомобиля).

Учитывая, что при тяговых расчетах используют лишь правые от экстремальной точки ветви графиков динамических характеристик автомобилей (области устойчивой работы двигателей), эти кривые легко поддаются аппроксимации параболическими уравнениями второй степени:

$$D = a_0 + a_1 v - a_2 v^2,$$

или

$$D = a - bv^2,$$

где a_0, a_1, a_2, a, b — эмпирические коэффициенты, получаемые путем статистической обработки данных заводских испытаний методом наименьших квадратов и представляемые в виде специальных таблиц. Коэффициенты могут быть получены непосредственно с использованием графиков динамических характеристик (см. рис. 3.1).

Дифференциальное уравнение тягового баланса автомобилей (3.7), используемое для построения эпюры скоростей движения автомобиля по криволинейной трассе автомобильной дороги, в конечных разностях может быть представлено:

$$v_{m+1} = v_m + 3,6\Delta t \frac{g}{\delta} (a - bv_{m\text{cp}}^2 - f_m - i_m),$$

откуда, учитывая, что $\Delta S_m = \frac{v_{m\text{cp}}}{3,6} \Delta t$, окончательно получим

$$v_{m+1} = v_m + 13 \frac{\Delta S_m}{v_{m\text{cp}}} \frac{g}{\delta} (a - bv_{m\text{cp}}^2 - f_{m\text{cp}} - i_{m\text{cp}}), \quad (3.8)$$

где v_m, v_{m+1} — скорость движения автомобиля в начале и конце m -го участка продольного профиля длиной ΔS_m , км/ч; ΔS_m — длина расчетного интервала, м; $v_{m\text{cp}} = \frac{v_m + v_{m+1}}{2}$ — средняя скорость автомобиля на

m -м участке продольного профиля; a, b — параметры графика динамической характеристики; $f_{m\text{cp}}$ — коэффициент сопротивления качению, определяемый по формуле (3.5); $i_{m\text{cp}} = \frac{i_m + i_{m+1}}{2}$ — средний про-

дольный уклон на m -м участке продольного профиля.

Уравнение (3.8) применяют последовательно к большому числу интервалов ΔS_m , на которые делят исследуемый участок продольного профиля автомобильной дороги. Учитывая, что искомая скорость в конце m -го участка v_{m+1} входит в левую и правую части уравнения (3.8), последнее решается подбором.

Алгоритм решения уравнения (3.8) весьма прост. Однако точность вычисления во многом зависит от выбора размера шага ΔS_m . Согласно данным Г.Б. Безбородовой и В.Г. Галушко, для практических расчетов обеспечивают нужную точность и могут быть применены значения $\Delta S_m = 1, 3, 5, 10$ и 50 м при определении скоростей движения грузовых автомобилей (соответственно на I, II, III, IV и V передачах) и $\Delta S_m = 1, 5, 10$ и 50 м — для легковых автомобилей (соответственно на I, II, III и IV передачах).

Для получения расчетных данных о скоростях движения, близких к реальным, учитывают степень открытия дроссельной заслонки для автомобилей с карбюраторными двигателями или положение рейки топливного насоса у дизелей. По исследованиям проф. В.В. Сильянова, относительный уровень открытия дроссельной заслонки $\alpha = \alpha_{\text{др}}/\alpha_{\text{max}}$ (где $\alpha_{\text{др}}$, α_{max} — соответственно текущий и максимальный углы открытия дросселя). При 80%-й загрузке автомобиля:

$$\alpha_m = 0,2 + 16,0\varphi_m - 83,0\varphi_m^2,$$

где $\varphi_m = f_m + i_m$ — суммарные дорожные сопротивления на m -м участке продольного профиля.

Коэффициенты a и b в уравнении (3.8) при этом определяют:

$$a = 10 \frac{A(\alpha) i_o i_k}{r_k G} \eta;$$

$$b = 10 \left[\frac{B(\alpha)}{0,377^2 G} \left(\frac{i_o}{r_k} \right)^3 \eta i_k^3 + \frac{KF}{13G} \right].$$

где i_o — передаточное число главной передачи; i_k — передаточное число коробки передач; r_k — радиус колеса, м; G — масса автомобиля; η — коэффициент полезного действия трансмиссии; KF — фактор

сопротивления воздуха, $H \cdot \text{с}^2/\text{м}^2$; $A(\alpha)$, $B(\alpha)$ — параметры, принимаемые по данным Г.Б. Безбородовой и В.Г. Галушко:

$$A(\alpha) = 0,515 + 1,884\alpha - 0,894\alpha^2 - 0,524\alpha^3 + 0,325\alpha^4;$$

$$B(\alpha) = 4,759 - 22,179\alpha + 41,619\alpha^2 - 34,132\alpha^3 + 10,248\alpha^4,$$

где α — относительный угол открытия дроссельной заслонки.

При движении автомобилей на спуске скорость рассчитывают по предложению Ю.А. Кременца, дающему возможность выполнять расчеты для пяти режимов: движения с использованием тягового усилия ведущих колес; свободного качения (наката); торможения двигателем; торможения колесными тормозами; совместного торможения (двигателем и тормозами).

Теоретические скорости движения, определяемые в результате решения уравнения (3.8), принимают не более допустимых: на кривых в плане

$$v_{\text{доп}} = \sqrt{127R(\mu \pm i_n)},$$

где R — радиус кривой в плане, м; μ — коэффициент поперечной силы ($\mu = 0,15$); i_n — поперечный уклон проезжей части в долях единицы;

на кривых в плане при ограничении видимости

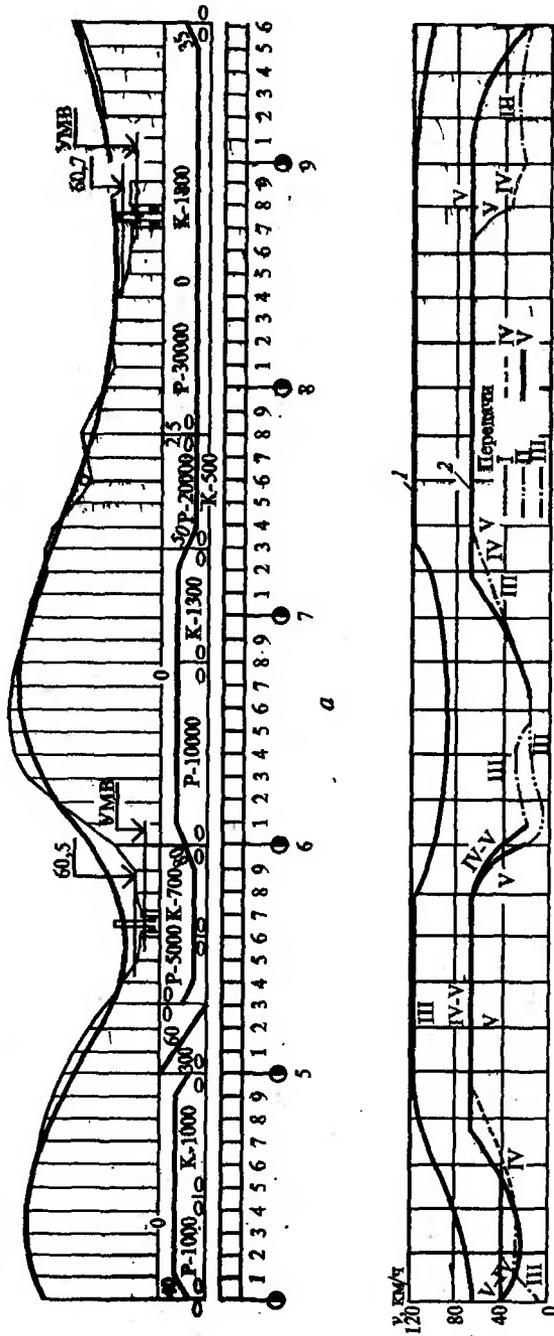
$$v_{\text{доп}} = \sqrt{\frac{127(\varphi_1^2 - i^2)}{K_3 \varphi_1}} (S - 5),$$

где φ_1 — коэффициент продольного сцепления колеса с дорогой; i — продольный уклон в долях единицы; $S = \sqrt{4RB}$ — расчетное расстояние видимости, м; R — радиус кривой в плане, м; B — ширина земляного полотна, м; K_3 — коэффициент эксплуатационного состояния тормозов ($K_3 = 1,4$ — для легковых автомобилей; $K_3 = 1,8$ — для грузовых);

на выпуклых переломах продольного профиля с сопрягающимися уклонами i_1 и i_2

$$v_{\text{доп}} = \sqrt{\frac{127(\varphi_1 + i_1)(\varphi_1 + \varphi_2)}{K_3 \varphi_1}} (S - 5).$$

При построении эпюры скоростей движения расчетного автомобиля, согласно предложению проф. В.В. Сильянова, учитывают также психофизиологическое воздействие на водителя дорожных условий. Для этой цели были выполнены сопоставления теоретических и



а

б

Р и с. 3.7. Эпюры теоретических скоростей движения расчетного автомобиля на участке дороги с криволинейным продольным профилем:

а — продольный профиль; б — эпюры теоретических скоростей движения автомобиля: 1 — легкового; 2 — грузового

фактических скоростей движения одиночных автомобилей и разработаны таблицы поправочных коэффициентов к расчетным теоретическим скоростям, учитывающим психофизиологическое восприятие водителями различных дорожных ситуаций: условия в конце спуска; условия перед подъемом; ширину проезжей части; ширину обочин; ограничение видимости в плане и профиле; радиусы горизонтальных кривых; габариты малых и средних мостов; пересечения в одном уровне; условия проезда через населенные пункты; число полос движения; обратные кривые в плане; препятствия на обочинах.

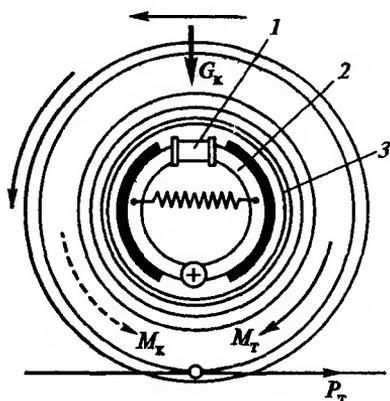
Теоретические расчеты по уравнению (3.8) с учетом степени открытия дроссельной заслонки и психофизиологических особенностей восприятия водителями дорожных условий позволяют получать эпюры скоростей движения расчетных автомобилей, максимально приближенные к реальным скоростям движения на дорогах (рис. 3.7).

3.5. Торможение автомобиля

В случае необходимости экстренной остановки автомобиля или существенного снижения его скорости применяют торможение, производимое тормозным приводом, создающим усилия трения между тормозными колодками и тормозными барабанами колес автомобиля (рис. 3.8).

Тормоза современных автомобилей могут развивать усилия, большие, чем наибольшее сцепление шин с дорогой. При интенсивном торможении при этом происходит полная блокировка колес, в результате чего колеса, перестав вращаться, скользят по поверхности дорожного покрытия с юзом. Шины при этом нагреваются, в результате чего происходит снижение сцепления и интенсивный процесс износа резины. При необходимости экстренного торможения в аварийных ситуациях, тем не менее, водители вынужденно используют этот не самый экономичный способ торможения. Однако при нормальных эксплуатационных режимах торможение производят при неполной блокировке колес и на сухом и шероховатом покрытии наиболее эффективным оказывается торможение, при котором выключают сцепление и крутящий момент двигателя перестает передаваться на ведущие колеса, а накопленная автомобилем кинетическая энергия постепенно поглощается трением колодок о тормозные барабаны.

При сырой поверхности покрытия и относительно небольшом коэффициенте сцепления такое торможение может привести к заносу автомобиля и в таких случаях торможение начинают в режиме хо-



Р и с. 3.8. Схема устройства тормозов автомобиля:

1 — тормозные цилиндры, прижимающие тормозные колодки к барабану; 2 — тормозная колодка; 3 — тормозной барабан; M_k — крутящий момент; P_T — тормозная сила; M_T — тормозной момент; G_k — вес автомобиля, приходящийся на колесо

лостого хода двигателя при включенном сцеплении и выключают его только после значительного снижения скорости автомобиля.

Интенсивность замедления автомобиля, движущегося по инерции, при торможении с выключенным сцеплением можно определить по уравнению тягового баланса автомобиля в следующем виде:

$$\delta_{\text{пр}} G_{\text{авт}} j = P_T + P_w \pm P_i + P_f, \quad (3.9)$$

где P_T , P_w , P_f — силы сопротивления движению; $P_T = \gamma_T G_{\text{авт}}$ — тормозная сила; γ_T — коэффициент тормозной силы (интенсивности торможения), равный отношению суммы всех тормозных сил на колесах автомобиля к весу автомобиля.

Коэффициент тормозной силы γ_T зависит от конструктивных особенностей тормозной системы автомобиля, ее состояния и интенсивности торможения водителем, которая в зависимости от целей торможения может меняться в широких пределах — от легкого притормаживания до полной блокировки колес с движением юзом при экстренном торможении. На величину коэффициента тормозной силы γ_T оказывает существенное влияние также ровность покрытия, когда при неровных покрытиях возникают колебания автомобилей с периодическим увеличением и уменьшением давления автомобиля на дорогу. У автомобилей с тормозами на всех колесах при ровном покрытии предельно возможное значение γ_T равно коэффициенту сцепления колеса с дорогой.

Если ввести в уравнение (3.9) значения всех сил сопротивления движению (см. § 3.2), можно получить значение отрицательного ускорения при торможении, характеризующее интенсивность замедления движения автомобиля:

$$\delta_{\text{вр}} j = \gamma_{\tau} + \frac{P_w}{G_{\text{авт}}} \pm i + f,$$

Поскольку при торможении скорость автомобиля быстро падает, то относительным сопротивлением воздушной среды можно пренебречь $\frac{P_w}{G_{\text{авт}}} \approx 0$.

Нормальный эксплуатационный режим торможения обычно соответствует неполной блокировке колес, при которой колеса катятся по покрытию с небольшим пробуксовыванием. Такой режим торможения оказывается наиболее безопасным и эффективным.

Величина пути, на котором водитель может остановить автомобиль, движущийся с расчетной скоростью перед препятствием, — важнейшая характеристика безопасности движения, используемая для обоснования основных геометрических параметров автомобильных дорог и, прежде всего, плана и продольного профиля.

Между моментом, когда водитель замечает перед собой препятствие, проходит некоторое время t_1 , в течение которого водитель осознает необходимость торможения и переносит ногу с педали подачи топлива (акселератора) на тормоз. Продолжительность реакции водителя t_1 , как было установлено в результате многочисленных экспериментальных исследований, — величина, зависящая от многих факторов (возраст водителя, стаж работы, состояние водителя, скорость автомобиля, дорожные условия и т.д.) и находящаяся в широких пределах от 0,3 до 1,5 с. Наиболее часто встречающееся значение этой величины составляет в среднем $t_1 \approx 0,8$ с. Затраты времени на холостой ход тормозной педали t_2 зависят, прежде всего, от конструкции привода тормозов (гидравлический, пневматический) и лежат в пределах от 0,1 с для гидравлического привода до 0,5 с для пневматического. В расчетах можно принимать усредненное значение $t_2 \approx 0,3$ с. И наконец, период нарастания тормозного усилия до некоторого полного значения t_3 равен от 0,2 с для гидравлического привода до 0,6—1 с для пневматического. Принимая в среднем для расчетов $t_3 \approx 0,7$ с, окончательно получим, что время, прошедшее с момента, когда водитель увидел препятствие, до начала эффективного торможения, в среднем может составлять 1,2 с при гидравлическом приводе и 2 с — при пневматическом. При расчетах тормозного пути для определения геометрических элементов плана и продольного профиля принимают усредненное суммарное время $t_0 = t_1 + t_2 + t_3$, условно названное *временем психологической реакции водителя*, равным $t_0 \approx 1,8$ с.

Путь, проходимый автомобилем за период полного торможения, можно определить по уравнению равномерного замедленного движения:

$$v = \sqrt{2aS_T}, \quad (3.10)$$

где v — скорость автомобиля в начале торможения, м/с; S_T — тормозной путь, м; a — абсолютная величина отрицательного ускорения при торможении, равная $a = (\gamma_T + f \pm i)g$.

Согласно нормативным требованиям, к тормозным механизмам (ОСТ 37.001.016—70) абсолютная величина замедления при торможении a должна составлять 5,5 м/с² для грузовых автомобилей и автопоездов и 7 м/с² — для легковых.

Если подставить в уравнение (3.10) значения a и γ_T , исходя из аварийного режима торможения с полной блокировкой колес, для которого $\gamma_T = \varphi$, получим длину собственно тормозного пути:

$$S_T = \frac{k_3 v^2}{2g(\varphi \pm i + f)}, \quad (3.11)$$

где k_3 — коэффициент эксплуатационного состояния тормозов, учитывающий неточность регулировки тормозов, неравномерности распределения тормозных усилий между колесами и колебания автомобиля при движении в процессе торможения. По опытным данным, для расчетов принимают $k_3 = 1,3—1,4$.

3.6. Тяговые расчеты автопоездов

Одним из эффективнейших средств снижения себестоимости автотransпортов и повышения производительности подвижного состава является использование автомобильных поездов. Производительность автопоездов в 1,5—2 раза выше, чем у одиночных грузовых автомобилей. Неслучайно поэтому автопоезда в настоящее время составляют значительную долю грузового движения на дорогах. Для эффективного использования автопоездов к автомобильным дорогам (особенно к параметрам плана и продольного профиля) предъявляют более жесткие требования, чем для случаев преобладающего движения одиночных грузовых автомобилей. Это связано с тем, что у автопоезда при большем общем весе и больших сопротивлениях воздушной среды и качению тяговые усилия остаются теми же, что и для одиночных грузовых автомобилей.

Уравнение тягового баланса применительно к автопоездам может быть представлено в следующем виде:

$$D_{\text{ап}} = \frac{P_a - P_{w\text{ап}}}{G_{\text{авт}} + G_{\text{пр}}} = f_{\text{ап}} \pm i \pm J \frac{\delta_{\text{ап}}}{g}, \quad (3.12)$$

где $D_{\text{ап}}$ — динамический фактор автопоезда; $P_{w\text{ап}}$ — сопротивление воздушной среды движению автопоезда; $G_{\text{авт}}$ — вес автомобиля; $G_{\text{пр}}$ — вес прицепов; $f_{\text{ап}}$ — коэффициент сопротивления качению для автопоезда; $J = \frac{dv}{dt}$ — ускорение автопоезда; $\delta_{\text{ап}}$ — коэффициент учета вращающихся масс автопоезда.

Как следует из уравнения (3.12), динамический фактор автопоезда существенно меньше, чем у одиночного грузового автомобиля. Одновременно сопротивление движению у автопоезда больше. Из-за большего числа осей, трения в сцепных устройствах и поворотном круге, а также раскачивания автоприцепа на ходу коэффициент сопротивления качению у автопоезда возрастает с ростом числа прицепов. Возрастает также сопротивление воздушной среды, так как каждый прицеп добавляет трение воздуха о боковую поверхность и завихрение воздушных струй между прицепами.

Для практических расчетов принимают, что сопротивление воздушной среды возрастает в среднем на 25—30% от каждого прицепа, а коэффициент сопротивления качению — на 4—5%.

Неблагоприятным может оказаться условие обеспечения сцепления ведущих колес грузового автомобиля-тягача с покрытием при трогании автопоезда с места. В этом случае при практическом отсутствии сопротивления воздушной среды уравнение тягового баланса автопоезда примет вид:

$$\frac{\varphi G_k}{G_{\text{авт}} + G_{\text{пр}}} = f_{\text{ап}} \pm i \pm J \frac{\delta_{\text{ап}}}{g},$$

где G_k — вертикальная нагрузка на ведущие колеса.

При трогании с места возникают дополнительные сопротивления, увеличивающие коэффициент сопротивления качению для летних условий в 1,5—2,5 раза и для зимних — 2,5—4 раз.

Современные прицепы снабжены тормозами, приводимыми в действие с автомобиля-тягача. Уравнение движения автопоезда при торможении может быть представлено в виде:

$$\frac{-\varphi P_{\tau} - P_{w \text{ ап}}}{G_{\text{авт}} + G_{\text{пр}}} = f_{\text{ап}} \pm i \pm J \frac{\delta_{\text{ап}}}{g},$$

где P_{τ} — нагрузка на тормозные оси.

Тормозной путь автопоезда обычно больше, чем у одиночного грузового автомобиля. Интенсивность торможения автопоездов, наоборот, ниже, так как при резком торможении автопоезда возникает опасность заноса прицепов или наезда их на автомобиль-тягач.

Из сказанного следует, что при проектировании автомобильных дорог, по которым ожидается интенсивное движение автопоездов, при проектировании продольного профиля необходимо предусматривать максимальные продольные уклоны, как правило, не больше 30—40‰, а при невозможности выполнения этого условия на участках затяжных подъемов следует предусматривать дополнительные полосы проезжей части (см. § 6.1).

3.7. Расчетное расстояние видимости на дорогах

На прямых горизонтальных участках автомобильных дорог водители видят перед собой поверхность дороги и различные препятствия на ней на значительном расстоянии. Однако на кривых в плане и продольном профиле, а также в ночное время расстояние видимости дороги значительно сокращается. В таких условиях при проектировании необходимо обеспечивать *расчетное расстояние видимости* дороги, т.е. расстояние перед автомобилем, движущимся с расчетной скоростью, на котором водитель должен видеть перед собой дорогу, чтобы, заметив на ней препятствие, среагировать на его опасность, затормозить и остановиться на безопасном расстоянии от него или успеть его объехать.

В теории проектирования дорог все многочисленные схемы видимости, рассматривающие различные условия движения автомобилей, расположение их и препятствий на дороге, разделяют на две принципиальные группы:

схемы, предусматривающие остановку автомобиля на некотором безопасном расстоянии от препятствия на дороге (упавший предмет с впереди идущего автомобиля, выбоина на дороге и т.д.) или внезапно остановившегося впереди идущего автомобиля, а также перед идущим по той же полосе встречным автомобилем;

схемы, исходящие из объезда автомобилем препятствия на дороге или обгона впереди идущего автомобиля с выездом на смежную полосу движения.

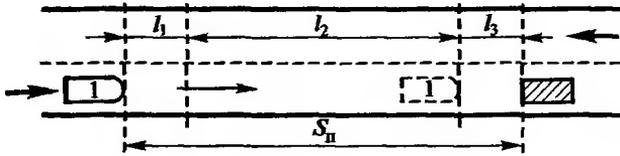


Рис. 3.9. Схема определения расстояния видимости поверхности дороги S_n

Из многочисленных расчетных схем определения расстояния видимости на дорогах целесообразно рассмотреть три основные.

Схема 1. Определение расчетного расстояния видимости поверхности дороги S_n в метрах (рис. 3.9).

Водитель легкового автомобиля 1, движущегося с расчетной скоростью v , неожиданно встречает препятствие на своей полосе движения и ему необходимо среагировать на возникшую опасность, затормозить и остановиться на безопасном расстоянии l_3 от препятствия.

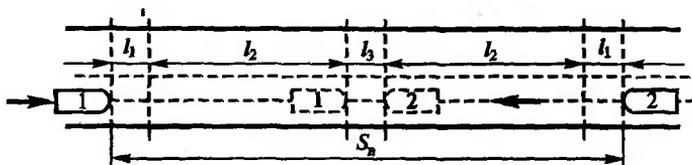
В этом случае используют формулу для определения безопасного расстояния видимости поверхности дороги, на котором водитель может остановить автомобиль перед внезапно возникшем препятствием:

$$S_n = l_1 + l_2 + l_3 = \frac{v t_0}{3,6} + \frac{k_3 v^2}{254(\varphi \pm i)} + l_3; \quad (3.13)$$

где l_1 — расстояние, проходимое автомобилем за время психологической реакции водителя на опасность t_0 (в расчетах принимают среднее значение времени $t_0 = 1,8$ с); l_2 — тормозной путь автомобиля при полной блокировке колес, получаемый из уравнения 3.11 для случая расчетной скорости v в км/ч; k_3 — коэффициент эксплуатационного состояния тормозов (в расчетах обычно принимают $k_3 = 1,3-1,4$); φ — коэффициент продольного сцепления колеса с дорогой (см. § 3.3, для чистого влажного покрытия в расчетах принимают $\varphi = 0,5$); i — продольный уклон дороги в долях единицы («+» — на подъеме, «-» — на спуск); $l_3 = 5-10$ м — расстояние безопасности.

Схема 2. Определение расчетного расстояния видимости едущего по той же полосе встречного автомобиля S_B (рис. 3.10).

Легковой автомобиль 1, движущийся с расчетной скоростью v , встречает на своей полосе другой легковой автомобиль 2, движущийся навстречу с той же скоростью. Водители обоих автомобилей должны среагировать на возникшую опасность, затормозить и остановиться на безопасном расстоянии l_3 друг от друга.



Р и с. 3.10. Схема определения расстояния видимости встречного автомобиля S_b .

Как следует из схемы, представленной на рис. 3.10, искомое безопасное расстояние видимости встречного, движущегося по той же полосе автомобиля будет составлять:

$$S_b = 2l_1 + 2l_2 + l_3 = \frac{v}{1,8} + \frac{kv^2}{127(\varphi \pm i)} + l_3. \quad (3.14)$$

Схема 3. Определение расчетного расстояния видимости при обгоне грузового автомобиля легковым S_0 (рис. 3.11).

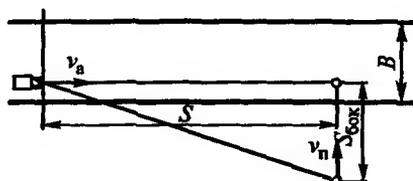
Легковой автомобиль 1, движущийся со скоростью v_n , обгоняет с выездом на полосу встречного движения грузовой автомобиль 2, движущийся с меньшей скоростью v_r . Водитель автомобиля 1 должен увидеть идущий навстречу с той же скоростью v_n по встречной полосе движения легковой автомобиль 3 на таком расстоянии, чтобы до встречи с ним на безопасном расстоянии l_3 выполнить маневр обгона и вернуться на свою полосу движения. Обгон начинается, когда расстояние между обгоняющим легковым автомобилем 1 и обгоняемым грузовым автомобилем 2 станет равным разности их тормозных путей ($S_{T_n} - S_{T_r}$). Автомобили 1 и 2 поравняются, когда первый из них пройдет расстояние l_2 :

$$l_2 = v_n \frac{S_{T_n} - S_{T_r}}{v_n - v_r} = \frac{k_3(v_n^2 - v_r^2)}{254(\varphi \pm i)} = \frac{k_3 v_n (v_n - v_r)}{254(\varphi \pm i)}.$$

Полное расстояние обгона очевидно составит $S_{06} = 2l_2$, при этом автомобиль 3 за это время также пройдет расстояние $2l_2$. Таким образом, как следует из схемы, представленной на рис. 3.11, искомое расчетное расстояние видимости при обгоне S_0 составит:

$$S_0 = l_1 + 2l_2 + 2l_2 + l_3 = \frac{v_n}{3,6} + 2 \frac{k_3(v_n + v_r)}{127(\varphi \pm i)} + l_3, \quad (3.15)$$

где v_n — скорости легковых автомобилей, км/ч. В расчетах принимают равными расчетной скорости $v_n = v$; v_r — скорость обгоняемого грузового автомобиля, км/ч. В расчетах можно принимать наиболее харак-



Р и с. 3.12. Схема к определению расстояния боковой видимости:

B — ширина проезжей части

Необходимое расстояние боковой видимости определяют в соответствии со схемой, представленной на рис. 3.12:

$$S_{\text{бок}} = \frac{v_n}{v} S_n, \quad (3.16)$$

где v — расчетная скорость автомобиля, км/ч; v_n — скорость движения пешехода или транспортного средства на пересекаемой дороге, км/ч. Для бегущего человека в расчетах принимают $v_n = 10$ км/ч; S_n — расчетное расстояние видимости поверхности дороги, определяемое по формуле (3.13).

Согласно действующим нормам и правилам проектирования автомобильных дорог во всех случаях, где по местным условиям возможно регулярное появление людей и животных, следует обеспечивать боковую видимость прилегающей к дороге полосы для автомобильных дорог, проектируемых для расчетной скорости 100 км/ч и выше, шириной 25 м, а для остальных дорог — 15 м от бровки земляного полотна.

Глава 4

ЗАКОНОМЕРНОСТИ ДВИЖЕНИЯ ТРАНСПОРТНЫХ ПОТОКОВ

4.1. Транспортный поток и режимы его движения

Рассмотренные выше закономерности движения одиночных (расчетных) автомобилей, когда их водители имеют возможность выбирать наилучшие для себя режимы движения и в значительной мере реализовывать динамические возможности своих автомобилей, существенно отличаются от условий движения тех же автомобилей в транспортном потоке.

На автомобильных дорогах одновременно происходит движение большого количества разных типов автомобилей, так или иначе оказывающих взаимное влияние друг на друга. Эти автомобили, имеющие резко различные динамические характеристики, управляются водителями, обладающими индивидуальными особенностями вожд-

дения, опытом и различной продолжительностью психологической реакции на опасность. Поэтому все проектные решения, реализуемые на основе нормативно-технических документов, разработанных применительно к условиям движения одиночного расчетного автомобиля, анализируют с точки зрения удовлетворения ими требований движения транспортных потоков.

Следуя из разных мест отправления в разные пункты назначения, автомобили образуют на дороге транспортные потоки, движущиеся в противоположных направлениях. В каждом транспортном потоке происходит непрерывное взаимодействие автомобилей с интервалами между ними, зависящими от скорости движения и индивидуальных особенностей водителей, стремящихся выдерживать безопасные расстояния от идущего впереди автомобиля. Изменение дорожных условий немедленно сказывается на скоростях движения автомобилей, что, в свою очередь, приводит к изменению интервалов между ними (транспортный поток сжимается или растягивается). Различия в оценке условий движения разными водителями приводят к возникновению в каждом транспортном потоке внутренних помех. Происходят обгоны автомобилей медленных более быстрыми. На дорогах с двумя полосами движения (а таких дорог наибольшее количество) обгоны связаны с выездами обгоняющих автомобилей на полосу встречного движения, что создает серьезные помехи для встречного транспортного потока.

Изучением закономерностей движения транспортных потоков занимается *теория транспортных потоков* — наука, изучающая закономерности движения автомобилей в различных дорожных условиях с учетом их динамических характеристик и психофизиологических особенностей водителей. Она основана на положениях теории автомобиля, инженерной психологии и теории вероятностей.

Как показывают наблюдения, условия движения по дороге (характеристики движения), а следовательно, и условия труда водителей существенно меняются во времени и по длине автомобильной дороги и эти изменения связаны, прежде всего, с изменением интенсивности движения N и состава транспортного потока p (см. § 1.5). При этом меняются следующие характеристики: коэффициент загрузки движением z , коэффициент скорости движения C , коэффициент насыщения движения ρ , уровни удобства и безопасность движения.

Эти характеристики используют для количественной оценки качественного состояния транспортного потока и условий движения.

Под *уровнем удобства движения* (в зарубежной практике называемого *уровнем обслуживания*) понимают определенное качественное

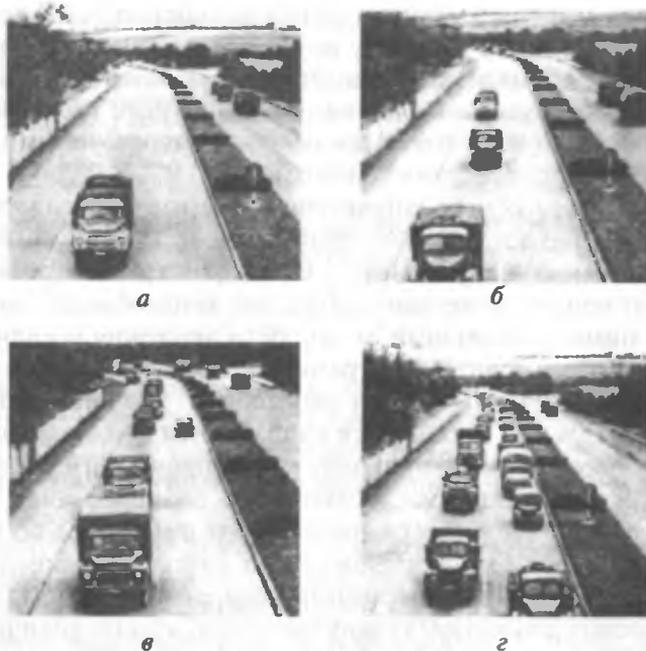


Рис. 4.1. Движение по дороге при различном коэффициенте загрузки:

a — «свободный» транспортный поток; *б* — «устойчивый» транспортный поток; *в* — «неустойчивый» транспортный поток; *г* — «плотный (насыщенный)» транспортный поток

состояние транспортного потока с некоторыми характерными условиями труда водителей, условиями комфортабельности поездки, экономичностью перевозок, а также определенным уровнем аварийности. В РФ различают четыре уровня удобства движения (В.В. Сильянов), в США — шесть (Д. Дрю).

Уровень удобства А характеризуется коэффициентами загрузки $z \leq 0,2$, коэффициентами скорости $C \geq 0,9$ и коэффициентами насыщения $\rho \leq 0,1$.

Водители выдерживают желаемую скорость движения. При этом обгоны практически отсутствуют. Эмоциональная напряженность водителей низкая. Водители и пассажиры не испытывают неудобств при движении. Транспортный поток при уровне удобства *А* называют *свободным* (рис. 4.1, *a*).

Уровень удобства Б характеризуется следующими показателями транспортного потока: $0,2 < z \leq 0,45$; $0,9 > C \geq 0,7$; $0,1 < \rho \leq 0,3$.

В потоке возрастает число быстро движущихся автомобилей, которые совершают обгоны либо движутся в пачках за лидером (мед-

ленно движущимся автомобилем) до появления безопасного момента для совершения маневра обгона. Происходит резкое падение скоростей движения. Обгоны при коэффициенте загрузки $z = 0,45$ практически невозможны. Эмоциональная напряженность водителей растет, а комфортабельность движения падает. Транспортный поток при уровне удобства *Б* называют *устойчивым* (рис. 4.1, б).

Уровень удобства В характеризуется следующими показателями транспортного потока: $0,45 < z \leq 0,7$; $0,7 > C \geq 0,55$; $0,3 < \rho \leq 0,7$.

Наблюдается дальнейшее снижение скоростей движения. Эмоциональная напряженность водителей достигает наивысшего уровня. Водители и пассажиры испытывают неудобства вследствие невозможности обгона. Поток состоит из больших групп и пачек, которые быстро распадаются при появлении редкой возможности совершения маневра обгона. Транспортный поток при уровне удобства *В* называют *неустойчивым* (рис. 4.1, в).

Уровень удобства Г характеризуется следующими параметрами: $0,7 < z \leq 1,0$; $0,55 > C \geq 0,4$; $0,7 < \rho \leq 1,0$.

Состояние потока, близкое к затору, движение происходит с остановками. Обгоны исключены. Эмоциональная напряженность водителей снижается вследствие низких скоростей движения. Водители и пассажиры испытывают наибольшие неудобства. Движение происходит с неэкономичными скоростями в колонном режиме. В местах ухудшения дорожных условий возможно возникновение заторов. Транспортный поток при уровне удобства *Г* называют *плотным (насыщенным)* (рис. 4.1, г).

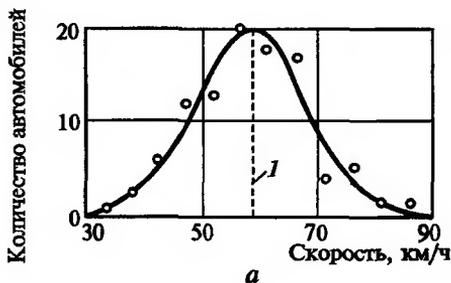
В связи с закономерными изменениями интенсивности движения в разные дни и часы суток на одних и тех же участках дороги режимы движения меняются.

В связи с тем, что условия движения для каждого из характерных режимов различны, они описываются различными закономерностями теории транспортных потоков.

4.2. Скоростные характеристики движения автомобилей

Движущиеся по автомобильной дороге автомобили представляют собой своеобразный неустановившийся поток, в котором взаимное расположение и скорости автомобилей меняются случайным образом, и поэтому скоростные режимы движения транспортных потоков могут быть охарактеризованы лишь среднестатистическими показателями.

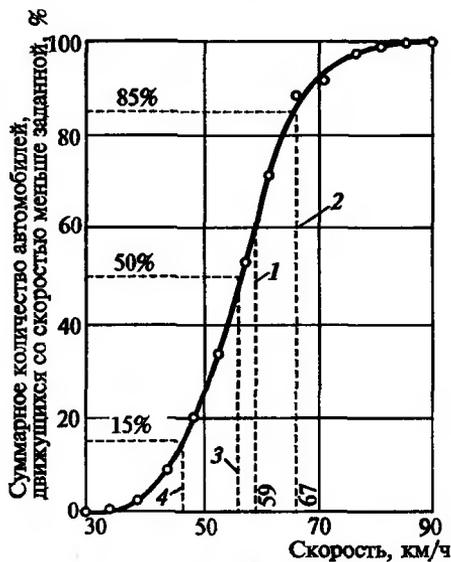
Измерение на каком-либо участке автомобильной дороги скоростей движения автомобилей свидетельствует, что они меняются в



а

Рис. 4.2. Кривые распределения скоростей движения между автомобилями в транспортном потоке:

а — кривая распределения скоростей для однородного транспортного потока; б — кумулятивная кривая; 1 — наиболее характерная (модальная) скорость; 2 — скорость 85%-й обеспеченности; 3 — средняя скорость; 4 — скорость 15%-й обеспеченности



б

сравнительно широком диапазоне, но для основной массы автомобилей располагаются вблизи некоторого среднего значения. Чем больше плотность транспортного потока, тем меньше в нем различия в скоростях движения отдельных автомобилей. При интенсивности движения, соответствующей устойчивому транспортному потоку ($0,2 < z \leq 0,45$; $0,9 > C \geq 0,7$; $0,1 < \rho \leq 0,3$), кривые распределения числа автомобилей по скорости движения (рис. 4.2, а) имеют очертание, характерное для нормальной кривой распределения.

Скорости и режимы движения транспортных потоков оценивают также по кумулятивным кривым, показывающим, какой процент из общего количества автомобилей движется со скоростями, менее заданной (рис. 4.2, б). Средняя часть кумулятивной кривой соответствует основной части транспортного потока. Нижняя часть кривой до

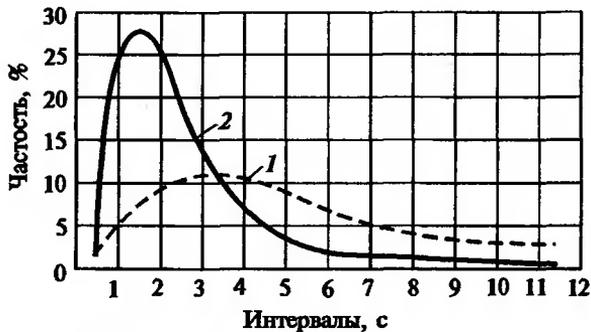


Рис. 4.3. Кривые распределения интервалов во времени между автомобилями: 1 — распределение Пуассона при низкой интенсивности движения; 2 — распределение Пирсона III — при высокой интенсивности

15% обеспеченности показывает скорости автомобилей, соответствующие необходимости обгонов. 50% обеспеченности соответствует средней скорости транспортного потока, и ее принимают за основную характеристику движения транспортного потока. Скорость 80—90% обеспеченности выделяет наиболее быструю группу автомобилей в транспортном потоке, в число которых входят и автомобили, нарушающие требования безопасности движения. Поэтому в качестве наибольшей безопасной скорости движения принимают скорость 85%-й обеспеченности. Эту скорость принимают в качестве расчетной при разработке проектов организации движения.

При проектировании пересечений и примыканий автомобильных дорог, а также при разработке проектов организации движения определяют интервалы во времени между следующими друг за другом автомобилями. Разным интенсивностям движения соответствуют разные законы распределения величин интервалов во времени. При интенсивностях по одной полосе до 200 авт/ч распределение интервалов во времени оказывается близким к распределению Пуассона, при интенсивностях до 650 авт/ч — к распределению Пирсона III (рис. 4.3).

Весьма важной характеристикой движения потоков является *плотность транспортного потока q* — об-

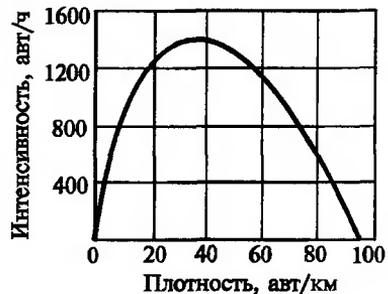


Рис. 4.4. График зависимости плотности транспортного потока от интенсивности движения

щее количество автомобилей, приходящееся на 1 км однородного по транспортным качествам участка дороги:

$$q = \frac{N}{v}, \quad (4.1)$$

где N — интенсивность движения, авт/ч; v — скорость транспортного потока, км/ч.

Зависимость плотности транспортного потока от интенсивности движения имеет четкий экстремум (рис. 4.4), соответствующий наибольшему количеству автомобилей, которое в состоянии пропустить данный участок дороги.

4.3. Математическое моделирование транспортных потоков

При современном автоматизированном проектировании автомобильных дорог важнейшим этапом при разработке и выборе наилучших проектных решений является использование многочисленных математических моделей, описывающих явления и процессы, развивающиеся во времени и пространстве. Поскольку любая автомобильная дорога предназначена, прежде всего, для удобного, экономичного и безопасного обслуживания существующих и перспективных транспортных потоков, то уже в ходе проектирования очень важно достоверно оценить будущие транспортно-эксплуатационные качества дороги и в случае необходимости уже на стадии проектирования внести необходимые изменения в проектные решения. Для этой цели во многих странах мира (в том числе и в России) широко используют компьютерное математическое (называемое еще статистическим или имитационным) моделирование транспортных потоков. Методы компьютерного математического моделирования транспортных потоков получили фундаментальное развитие в работах Д. Дрю (США) и проф. В.В. Сильянова (Россия).

Движение потока автомобилей по дороге можно представить как сложную систему, состоящую из большого числа взаимосвязанных и взаимодействующих элементов (подсистем). Сущность метода математического моделирования транспортных потоков состоит в том, что процесс фиксирования сложнейшей системы имитируют посредством арифметических и логических компьютерных операций в последовательности, свойственной исследуемому натурному процессу. Математическая модель основана на использовании псевдослучайных чисел, которые генерируются датчиком случайных чисел по методу Монте-Карло.

Проф. В.В. Сильяновым при разработке имитационных алгоритмов движения транспортных потоков использован принцип моделирования на основе агрегатов (случайных процессов функционирования сложных систем), предложенный чл.-кор. АН СССР Н.П. Бусленко. В практике автоматизированного проектирования автомобильных дорог чаще всего используют три математические модели транспортного потока: моделирование движения потоков автомобилей на дорогах с двумя полосами движения; моделирование движения потоков автомобилей на многополосных автомагистралях; моделирование движения транспортных потоков высокой плотности.

Особо важное значение в практике проектирования имеет имитационная математическая модель транспортных потоков на дорогах с двумя полосами (а таких дорог у нас в стране наибольшее количество), разработанная проф. В.В. Сильяновым и основанная на использовании агрегативного моделирования случайного транспортного процесса.

Состояние потока автомобилей, движущихся на исследуемом участке дороги «А—Б», характеризуют одновременно десятью группами переменных:

- расстояния каждого автомобиля в потоке до пункта назначения «Б». Нумерация автомобилей ведется с первого головного автомобиля, выехавшего на дорогу;

- скорости каждого автомобиля в рассматриваемый момент времени в свободных и стесненных условиях;

- расстояния каждого автомобиля до впереди идущего автомобиля;

- пределы изменения расстояния каждого автомобиля до впереди идущего автомобиля в момент времени t ;

- соотношение скоростей между движущимися друг за другом автомобилями, а также возможность совершения обгонов;

- время, проходящее после момента t до момента выхода каждого автомобиля из рассматриваемого режима движения;

- момент входа каждого автомобиля в рассматриваемый режим движения;

- момент выезда каждого автомобиля из начального пункта «А»;

- продолжительность движения каждого автомобиля в стесненных условиях;

- потери времени каждым автомобилем.

Транспортный поток может рассматриваться как состоящий из любого числа типов автомобилей. В математической модели транспортный поток принят состоящим из трех скоростных групп: легковые, средние грузовые и тяжелые грузовые автомобили. Распреде-

ние интервалов выезда автомобилей может быть задано по любому закону.

В имитационной модели приняты следующие обозначения:

N_1 — интенсивность движения в направлении А — Б;

N_2 — интенсивность движения в направлении Б — А;

T — продолжительность слежения за движением транспортного потока;

m — количество необходимых подсчетов на модели;

M — количество подсчитанных реализаций в рассматриваемый момент времени;

T_1 — момент перехода всей системы, моделирующей транспортный поток, из одного состояния в другое;

Δt_1 — случайный интервал времени между последовательными моментами выезда автомобилей из пункта А;

Δt_2 — то же, из пункта Б;

τ_1 — минимальное время пребывания автомобиля в текущем состоянии для направления А — Б (например, время нахождения в пачке);

τ_2 — то же, для направления Б — А;

n_1 — количество автомобилей первой скоростной группы, проезжающих путь А — Б за m реализаций в обоих направлениях;

n_2 — то же, для автомобилей второй скоростной группы;

n_3 — то же, для автомобилей третьей скоростной группы;

t_1 — общее время движения всех n_1 автомобилей первой скоростной группы;

t_2 — то же, всех n_2 автомобилей второй скоростной группы;

t_3 — то же, всех n_3 автомобилей третьей скоростной группы.

Свободные скорости движения автомобилей каждой скоростной группы принимают зависящими только от геометрических элементов и наличия тех или иных средств организации движения.

Основное состояние транспортного потока в момент времени T_1 характеризуется числом автомобилей на исследуемом участке дороги и состоянием каждого автомобиля (движение в свободном или стесненном состоянии). Для каждого состояния каждого автомобиля вычисляют продолжительность пребывания его в этом состоянии. Если в определенный момент времени поток автомобилей находился в некотором состоянии, то для его перехода в другое состояние необходимо, чтобы один из автомобилей перешел в новое состояние (например, догнал колонну автомобилей или на дорогу выехал автомобиль из начального или конечного пункта и т.д.).

Компьютерное моделирование транспортного потока на двухполосной дороге осуществляют в такой последовательности (рис. 4.5):

автомобилей на исследуемый участок дороги из начального и конечного пунктов;

вычисляют основные характеристики движения потока автомобилей с использованием имитационной математической модели: среднюю продолжительность движения автомобилей каждого типа; потери времени каждым типом автомобилей как следствие движения этих автомобилей в потоке; среднюю скорость движения всего потока автомобилей и для каждой скоростной группы.

При компьютерном моделировании транспортных потоков с использованием алгоритмов и программ движения на многополосных магистралях получают следующие результаты: распределение интервалов между автомобилями в любом сечении автомагистрали как для всего направления, так и по полосам; среднюю скорость потока автомобилей; среднюю длину очередей около пересечений в разных уровнях; средние скорости движения автомобилей каждой скоростной группы; среднее число смен полос движения; потери времени каждой скоростной группы автомобилей из-за взаимных помех при движении; распределение скоростей движения в целом для потока и для каждой скоростной группы автомобилей; распределение числа автомобилей в пачках; общее количество автомобилей, прошедших за рассматриваемый период времени слежения за движением транспортного потока; среднее время сообщения автомобилей рассматриваемого типа в прямом от пункта «А» к «Б» и обратном от «Б» к «А» направлениях; среднюю скорость сообщения; средние потери времени всем потоком; уровни загрузки движением для дороги в целом и для каждого ее элемента; коэффициенты снижения скорости при каждом уровне удобства движения.

При компьютерном моделировании транспортных потоков высокой плотности обеспечивают выдачу следующей информации: продолжительность движения колонн автомобилей по всей дороге и по отдельным ее участкам; распространение во времени волны изменения скорости движения автомобилей в колонне; изменение скорости волны в зависимости от дорожных условий; распространение во времени волны ускорения и ее количественные характеристики; пропускная способность дороги в целом, ее участка и отдельного элемента.

Методы компьютерного математического моделирования транспортных потоков являются эффективнейшим, объективным аппаратом для сравнения принципиальных вариантов проектных решений, который позволяет осуществлять быструю и всестороннюю оценку конкурирующих проектных решений по степени удовлетворения ими наилучших условий движения как одиночных автомобилей, так и транспортных потоков различного состава и плотности. Также

представляется возможным выявлять отдельные участки проектируемого варианта дороги, не отвечающие требованию обеспечения приемлемых условий движения потоков автомобилей, с последующим перепроектированием этих участков.

Математическое компьютерное моделирование дает инженеру-дорожнику необходимую достоверную информацию для установления основных транспортно-эксплуатационных и экономических показателей дороги: пропускной способности, уровней удобства движения, количественных показателей потенциальной опасности движения, скорости сообщения, транспортных расходов.

4.4. Пропускная способность дороги

Пропускная способность дороги — это максимальное количество транспортных единиц, которое может пропустить дорога через данное ее сечение в единицу времени (в час или в сутки).

Пропускная способность — одна из важнейших характеристик автомобильной дороги, показывающая возможную общую величину загрузки дороги проходящими по ней разнообразными транспортными средствами.

Различают пропускную способность:

в транспортных единицах, т.е. транспортного потока фактического состава движения;

в приведенных единицах, т.е. для идеализированного транспортного потока, представленного однотипными, расчетными автомобилями.

Пропускная способность — величина переменная во времени и зависит от большого числа факторов:

- скорости транспортного потока;
- состава транспортного потока;
- мер по организации движения;
- погодных условий;
- ширины проезжей части (ширины полосы движения, числа полос движения);
- состояния покрытия и обочин;
- параметров плана и продольного профиля;
- наличия различных препятствий, задерживающих движение или ограничивающих скорость.

Для определения максимальной теоретической пропускной способности дороги можно воспользоваться упрощенной динамической задачей теории транспортных потоков. Теоретическую пропускную способность полосы движения можно определить, зная безопасное

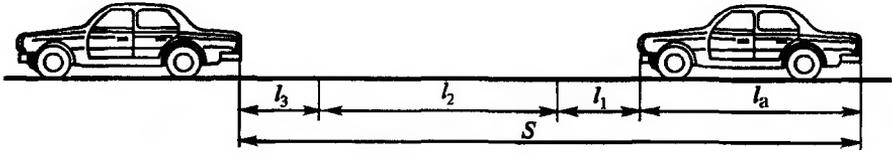


Рис. 4.6. Схема к определению безопасного расстояния между автомобилями в транспортном потоке

расстояние S между каждыми двумя автомобилями, когда водитель переднего автомобиля по какой-либо причине неожиданно начинает тормозить (рис. 4.6):

$$S = l_1 + l_2 + l_3 = \frac{v t_0}{3,6} + \frac{v^2 (K_{эз} - K_{эн})}{254(\varphi \pm i + f)} + l_3,$$

где l_1 — путь, проходимый автомобилем, движущимся со скоростью v (км/ч), за время психологической реакции водителя $t_0 = 1,8$ с на опасность, м; l_2 — разность тормозных путей заднего и переднего автомобиля, м; $K_{эз}$, $K_{эн}$ — коэффициенты эксплуатационного состояния тормозов соответствующих автомобилей; φ — коэффициент продольного сцепления колеса с дорогой; i — продольный уклон; f — коэффициент сопротивления качению; l_3 — запас расстояния между остановившимися автомобилями, м.

Если сделать предположение о мгновенной остановке переднего автомобиля, что физически представляется как падение на проезжую часть с переднего автомобиля какого-либо предмета, представляющего опасность для заднего, то теоретическая пропускная одна полоса движения P определится:

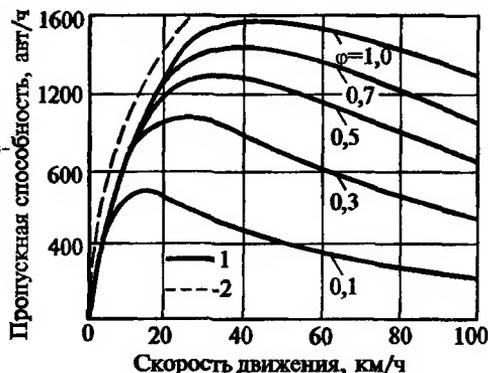
$$P = \frac{1000 v}{\frac{v t_0}{3,6} + \frac{K_3 v^2}{254(\varphi \pm i + f)} + l_3 + l_a}, \quad (4.2)$$

где l_a — длина автомобиля, м.

Анализ уравнения (4.2) показывает, что максимальная пропускная способность одной полосы движения составляет 1100—1600 авт/ч при скорости движения транспортного потока 20—40 км/ч. При дальнейшем возрастании скорости движения пропускная способность медленно снижается (рис. 4.7).

Пропускная способность дорог возрастает при организованном колонном движении с приблизительно одинаковыми скоростями автомобилей примерного одинакового типа при установлении водителя-

Рис. 4.7. Графики теоретической пропускной способности полосы движения при различных значениях коэффициента продольного сцепления:
1 — по уравнению (4.2); 2 — по уравнению (4.3)



ми наиболее рационального режима движения и при одинаковом режиме торможения переднего и заднего автомобилей. Для этого случая пропускная способность полосы P определится:

$$P = \frac{1000 v}{\frac{v t_0}{3,6} + l_3 + l_a} \quad (4.3)$$

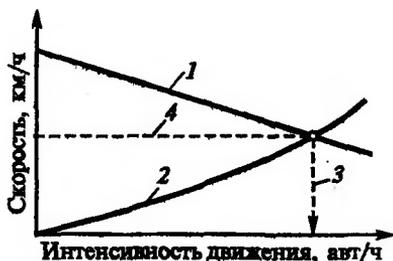
Как следует из уравнения (4.3), пропускная способность дороги возрастает с ростом скорости транспортного потока v , а поскольку эта скорость неодинакова на различных участках дороги, различна и их пропускная способность. Очевидно, что участок автомобильной дороги с наименьшей пропускной способностью определяет пропускную способность всего перегона.

С ростом интенсивности движения на дороге возрастают взаимные помехи автомобилей на дороге и средние скорости транспортного потока снижаются. Скорость транспортного потока в зависимости от интенсивности движения для дорог с двумя полосами, по данным проф. В.В. Сильянова, определяется:

$$v = v_0 - \alpha N, \quad (4.4)$$

где v_0 — скорость движения расчетного одиночного автомобиля при отсутствии помех, км/ч; α — коэффициент снижения скорости, зависящий от состава движения ($\alpha = 0,012$ при 50% и $\alpha = 0,008$ при 80% легковых автомобилей в транспортном потоке); N — интенсивность движения в обоих направлениях, авт/ч.

Спадением скорости транспортного потока соответственно падает и пропускная способность дороги. Поэтому максимально возможная в нормальных условиях эксплуатации пропускная способность, названная Н.Ф. Хорошиловым *практической*, определится в точке



Р и с. 4.8. Зависимость пропускной способности дороги от скорости транспортного потока:

1 — зависимость скорости транспортного потока от интенсивности движения; 2 — пропускная способность, рассчитанная по уравнению (4.3); 3 — практическая пропускная способность полосы; 4 — скорость транспортного потока при практической пропускной способности

пересечения кривых, полученных по уравнениям (4.3) и (4.4) (рис. 4.8).

Полученные Н.Ф. Хорошиловым значения практической пропускной способности представлены в табл. 4.1.

Т а б л и ц а 4.1. Практическая пропускная способность полосы

Категория дороги	Средняя практическая пропускная способность полосы при разном рельефе, авт/ч		
	равнинном	пересеченном	горном
II	1200	1100	1000
III	1000	900	800
IV	850	800	650
V	650	550	400

Значения практической пропускной способности, представленные в табл. 4.1, могут использоваться лишь для самых ориентировочных соображений при определении числа полос движения и общей ширины проезжей части, поскольку пропускная способность каждого участка автомобильной дороги зависит от скорости движения транспортного потока.

Г л а в а 5

КРИВЫЕ АВТОМОБИЛЬНЫХ ДОРОГ В ПЛАНЕ

5.1. Движение автомобиля по кривой

На автомобиль, движущийся по криволинейному в плане участку дороги (горизонтальной кривой) с радиусом кривизны R , действует центробежная сила C :

$$C = \frac{mv^2}{R}, \quad (5.1)$$

где m — масса автомобиля; v — скорость движения.

Центробежная сила C , которая нормальна к направлению движения, вызывает сдвигающее и опрокидывающее воздействия на автомобиль, водителя и пассажиров, находящихся в автомобиле, определяющие неприятные ощущения и осложняющие управление автомобилем. Эти негативные воздействия оказываются тем более ощутимыми, чем больше скорость движения автомобиля v и чем меньше радиус кривизны закругления R .

На кривых малых радиусов при высоких скоростях движения автомобилей центробежная сила вызывает поперечные деформации шин с соответствующим ростом расхода топлива и повышением износа шин. При движении автомобилей по кривым в ночное время проезжая часть дороги освещается светом фар на меньшем расстоянии, чем на прямолинейных участках дороги. По этим причинам для обеспечения экономичного, комфортабельного и безопасного движения радиусы горизонтальных кривых автомобильных дорог назначают достаточно большими, величины которых определяют расчетом в зависимости от скорости движения расчетного автомобиля.

При движении по криволинейному в плане участку дороги на автомобиль действуют силы, приложенные к его центру тяжести (рис. 5.1): центробежная сила C , направленная во внешнюю сторону закругления, и вес автомобиля G . Проектируя их на направление поперечного уклона проезжей части i_0 , получим

$$Y = \frac{mv^2}{R} \cos \alpha \pm mgi_0, \quad (5.2)$$

где Y — поперечная сила; α — поперечный угол наклона проезжей части.

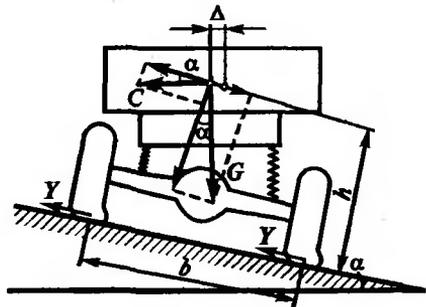


Рис. 5.1. Схема воздействия сил на автомобиль при движении по кривой в плане

Ввиду малости угла поперечного наклона проезжей части, пренебрегая его влиянием ($\cos \alpha \approx 1$), из выражения (5.2) находим значение радиуса горизонтальной кривой R :

$$R = \frac{v^2}{g \left(\frac{Y}{mg} \pm i_0 \right)}.$$

По предложению проф. А.В. Макарова отношение $\frac{Y}{mg} = \mu$ называют *коэффициентом поперечной силы*. Тогда окончательно получим выражение для определения радиуса закругления автомобильной дороги в плане:

$$R = \frac{v^2}{g(\mu \pm i_0)}, \quad (5.3)$$

где v — скорость автомобиля в м/с.

Для практического использования уравнения (5.3) необходимо нормировать допустимую величину коэффициента поперечной силы μ .

5.2. Коэффициент поперечной силы и его нормирование

При движении автомобиля по криволинейному участку автомобильной дороги в плане возникающая при этом поперечная сила вызывает ряд негативных воздействий на автомобиль, водителя и пассажиров: стремится сдвинуть автомобиль с дороги или опрокинуть его, ухудшает управляемость автомобилем, снижает комфортабельность поездки, создает дополнительное сопротивление движению с соответствующим увеличением расхода горючего. На основе анализа этих отрицательных воздействий и назначают предельно допустимые значения коэффициента поперечной силы μ .

Современное проектирование автомобильных дорог предполагает при назначении допустимого коэффициента поперечной силы исходить из обеспечения, прежде всего, *комфортабельных условий* поездки водителей и пассажиров.

При въезде автомобиля на кривую водитель и пассажиры ощущают действие на них центробежной силы, наклоняющей их вбок. Поэтому при проектировании геометрии автомобильных дорог (в частности, минимальных радиусов горизонтальных кривых) стремятся, чтобы величина центробежной силы не превышала тех значений, при

которых поездка по криволинейным участкам автомобильных дорог будет неприятной для участников движения.

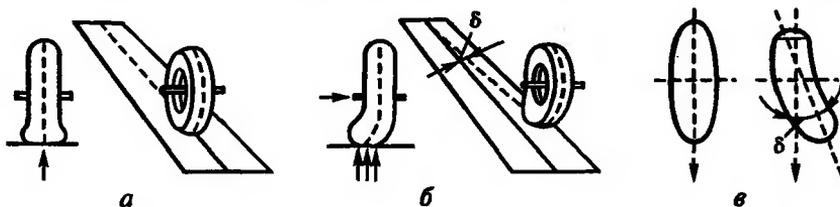
Многочисленные данные отечественных и зарубежных исследований свидетельствуют, что при коэффициенте поперечной силы $\mu \leq 0,1$ пассажир, не глядящий на дорогу, не различает, движется ли автомобиль по кривой или по прямолинейному участку автомобильной дороги. При $\mu = 0,15$ поездка по кривой ощущается слабо, а при $\mu = 0,20$ пассажиры уже испытывают легкое неудобство. Поэтому считают, что для обеспечения комфортабельности поездки величина коэффициента поперечной силы на кривых не должна превышать $\mu \leq 0,15$, а в особо сложных условиях — $\mu \leq 0,20$.

Как показывают многочисленные исследования, при величинах радиусов кривых, назначенных из условия обеспечения комфортабельности поездки, многократно оказываются обеспеченными условия *устойчивости против заноса* (при чистом и слегка влажном покрытии) и условие *устойчивости автомобиля против опрокидывания*.

Экономичность автомобильных перевозок также оказывается зависящей от коэффициента поперечной силы.

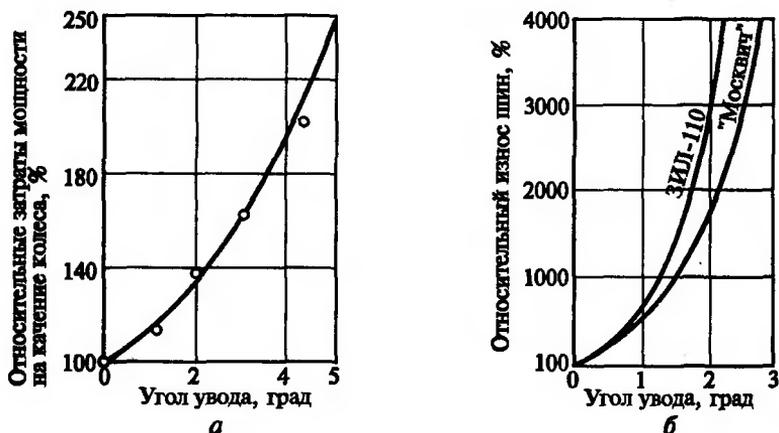
Действующая на автомобиль поперечная сила вызывает боковую деформацию шин, в результате которой форма площадки контакта шины с покрытием изменяется, а ее продольная ось образует некоторый угол по отношению к направлению движения, называемый *боковым уводом колеса* (рис. 5.2), в результате которого колесо, оставаясь в вертикальной плоскости качения, начинает смещаться в сторону бокового увода и водитель вынужден компенсировать его соответствующим поворотом передних колес автомобиля под углом к направлению движения.

Экспериментальные исследования показали, что при углах бокового увода до $3-4^\circ$ для шин легковых автомобилей и до $4-5^\circ$ — для



Р и с. 5.2. Боковой увод колеса:

а — движение колеса при отсутствии поперечной силы; *б* — движение при наличии поперечной силы; *в* — форма площадок контакта шины с покрытием при отсутствии и наличии поперечной силы; δ — угол бокового увода



Р и с. 5.3. Кривые характеристик движения автомобиля по кривой при качении колеса с боковым уводом:

a — относительные затраты мощности; *b* — относительный износ шин

грузовых величина углов бокового увода δ прямо пропорциональна боковой силе Y .

С увеличением угла бокового увода возрастают затраты мощности двигателя на качение колес и резко повышается износ шин (рис. 5.3).

Опытные данные свидетельствуют, что при угле бокового увода колеса всего до 1° износ шин возрастает в 5 раз, а дополнительные затраты мощности двигателя достигают 15%.

Таким образом, чтобы криволинейные участки дорог не являлись причиной заметного повышения себестоимости автомобильных перевозок, минимальные радиусы горизонтальных кривых при проектировании стремятся назначать не менее величин, при которых коэффициент поперечной силы при движении автомобиля с расчетной скоростью, как правило, не превышает $\mu \leq 0,1$.

По действующим нормам на проектирование геометрических элементов автомобильных дорог максимальные значения коэффициента поперечной силы принимают равными $\mu = 0,12$ для дорог I категории и $\mu = 0,15$ — для дорог II—V категорий.

5.3. Определение радиусов горизонтальных кривых

Для обеспечения безопасного, комфортабельного и экономичного движения автомобилей с расчетными скоростями величины радиусов горизонтальных кривых на дорогах стремятся назначать доста-

точно большими, чтобы величины коэффициента поперечной силы μ имели минимальные значения.

Однако на участках сложного рельефа местности или плотной застройки применение больших радиусов горизонтальных кривых приводит к сильному увеличению объемов земляных работ по возведению земляного полотна дороги или к большому сносу ценных сооружений, что в конце концов приводит к заметному возрастанию стоимости строительства. На таких сложных участках местности при проектировании допускают применение меньших радиусов горизонтальных кривых с соответствующим ростом коэффициентов поперечной силы при условии обязательного обеспечения необходимого запаса устойчивости против заноса и опрокидывания.

Максимально допустимые коэффициенты поперечной силы для различных требований устойчивости и использования автомобиля представлены в табл. 5.1.

Таблица 5.1. Допустимые значения коэффициента поперечной силы μ для обеспечения различных требований проектирования

Требования	Предельно допустимые значения μ на покрытии		
	сухом $\phi = 0,6$	мокрым $\phi = 0,4$	покрытом льдом $\phi = 0,2$
Устойчивость против опрокидывания	0,60	0,60	0,60
Устойчивость против заноса	0,36	0,24	0,12
Обеспечение комфортабельности поездки	0,15	0,15	0,15
Экономичность эксплуатации автотранспорта	0,10	0,10	0,10

Расчетным случаем при разработке норм на проектирование автомобильных дорог в РФ является движение автотранспорта по незагрязненному увлажненному покрытию. Обеспечить движение с расчетной скоростью по загрязненному мокрому покрытию или при гололеде невозможно без возникновения серьезных дорожно-транспортных происшествий.

При относительно благоприятных условиях местности для расчетов допустимых радиусов горизонтальных кривых исходят из величины коэффициента поперечной силы $\mu = 0,05—0,10$.

Расчеты минимальных радиусов горизонтальных кривых ведут по формуле (5.3), которая для случая использования в расчетах скорости v в км/ч имеет вид:

$$R = \frac{v^2}{127(\mu \pm i_0)}, \quad (5.4)$$

где R — допустимый радиус кривой в плане, м; v — расчетная скорость, км/ч; μ — нормируемый коэффициент поперечной силы; i_0 — поперечный уклон проезжей части, вводимый со знаком «-» на участках с двухскатным поперечным профилем и со знаком «+» на участках с односторонним уклоном в сторону центра закругления (*виражом*).

Согласно СНиП 2.05.02—85* для трудных участков горной местности минимальные радиусы горизонтальных кривых в зависимости от расчетной скорости движения на дорогах различных категорий нормируются:

Расчетная скорость движения, км/ч	140	140	120	120	100	100	80	60
Категории дорог	IA	IB	IV	II (4 по- лосы)	II (2 по- лосы)	III	IV	V
Наименьшие радиусы кривых в плане R на трудных участках, м ($\mu = 0,14-0,15$)	1000	1000	600	600	400	400	250	125

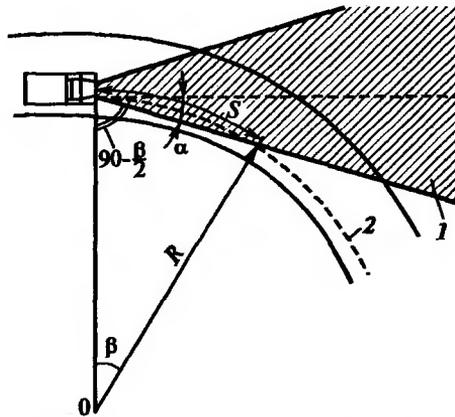
Если дорогу проектируют в благоприятных условиях равнинной местности, всегда стараются назначать возможно большие радиусы горизонтальных кривых, как правило, $R \geq 3000$ м, на которых условия движения мало отличаются от условий движения на прямолинейных участках.

На кривых в плане малых радиусов может быть не обеспечена безопасность движения с расчетной скоростью в ночное время, поскольку длина участка дороги, освещаемого фарами, может оказаться меньше расчетного расстояния видимости поверхности дороги (рис. 5.4).

Как следует из схемы, представленной на рис. 5.4, величина радиуса R , при котором будет обеспечено расчетное расстояние видимости поверхности дороги S_n , определится:

$$R = \frac{30S_n}{\alpha}, \quad (5.5)$$

где α — угол рассеивания пучка света фар ($\alpha \approx 2^\circ$).



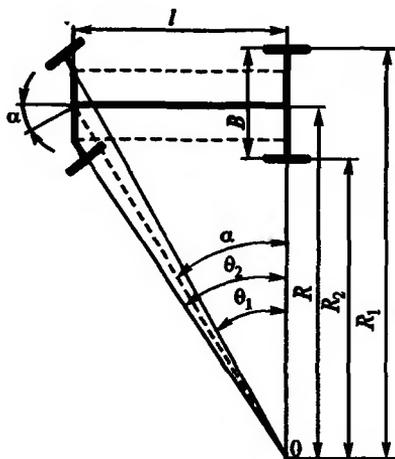
Р и с. 5.4. Схема к определению радиуса кривой из условия освещения поверхности дороги светом фар:

1 — зона, освещаемая фарами; 2 — траектория автомобиля

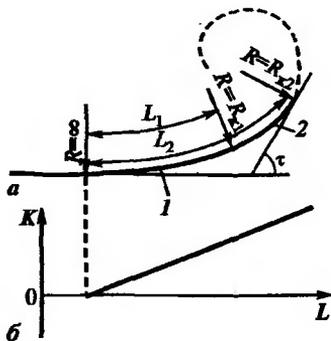
Радиусы горизонтальных кривых, при которых свет фар освещает проезжую часть на расчетное расстояние видимости $S_n = 100—300$ м, составляет $R = 1500—4500$ м.

5.4. Переходные кривые и их типы

При выезде автомобиля с прямолинейного участка трассы ($R = \infty$) на круговую кривую ($R = R_k$) условия движения автомобилей заметно меняются. На автомобиль начинает действовать центробежная сила (5.1), которая теоретически возникает мгновенно в виде бокового удара. Однако фактически, поскольку водитель поворачивает рулевое колесо автомобиля постепенно, устанавливая передние колеса автомобиля под соответствующим углом β , автомобиль описывает траекторию, отличную от плана трассы автомобильной дороги. Это отличие оказывается тем большим, чем меньше радиус круговой кривой R_k и чем больше скорость автомобиля v . Для приведения в соответствие траектории автомобиля плану трассы на участках въезда автомобиля с прямой на круговую кривую в начале ее и съезда с круговой кривой на прямую в конце вписывают *переходные кривые*, основное свойство которых, независимо от закона изменения кривизны по длине, состоит в том, что радиус кривизны в начале их (в точке сопряжения с прямым участком трассы) равен $R = \infty$, а в конце (в точке сопряжения с круговой кривой) — $R = R_k$.



Р и с. 5.5. Схема поворота автомобиля



Р и с. 5.6. Переходная кривая типа клотоиды:

a — схема переходной кривой; *b* — диаграмма кривизны; *l* — клотоида; 2 — отрезок клотоиды

Как следует из рис. 5.5, угол поворота передних колес автомобиля β связан с радиусом кривой R зависимостью:

$$\beta = \text{arctg} \frac{l}{R} \approx \frac{l}{R},$$

где l — база автомобиля.

Откуда

$$R = \frac{l}{\beta}.$$

Если автомобиль движется с постоянной скоростью v и постоянной заданной величиной угловой скоростью поворота $\omega = d\beta/dt$, то, учитывая, что $\beta = \omega t$, а $t = L/v$, получим уравнение переходной кривой:

$$R = \frac{lv}{\omega L}.$$

Учитывая, что

$$A^2 = \frac{lv}{\omega} = \text{const},$$

где A — параметр переходной кривой, м, окончательно получим

$$A^2 = RL, \quad (5.6)$$

где L — расстояние от начала кривой до точки с радиусом кривизны R .

Параметрическое уравнение (5.6) представляет собой математическую запись основного типа переходной кривой на автомобильных дорогах, названной *клотоидой* (радиоидой, спиралью Корню) (рис. 5.6).

Угол наклона касательной (в радианах) в любой произвольной точке клотоиды (см. рис. 5.6) можно определить по выражению:

$$\beta = \frac{L^2}{2A^2}.$$

Время проезда по переходной кривой, в течение которого величина центробежного ускорения по длине клотоиды меняется от 0 в начале ее до некоторого конечного значения в точке с радиусом R_x , равного $\frac{v^2}{R_x}$, составляет $t = \frac{v^2}{IR_x}$ (где v — скорость автомобиля, м/с, I — нормируемая величина нарастания центробежного ускорения, м/с³). Тогда необходимая минимальная длина переходной кривой (в м) определится:

$$L = vt = \frac{v^3}{R_x}.$$

Выражая скорость автомобиля в км/ч, получим L (в м):

$$L = \frac{v^3}{47IR_x}. \quad (5.7)$$

Наибольшую величину центробежного ускорения в РФ нормируют из условия комфортабельности и безопасности движения для дорог I категории $I = 0,8 \text{ м/с}^3$, для дорог II—V категорий — $I = 1,0 \text{ м/с}^3$.

Минимальные длины переходных кривых в СНиП 2.05.02—85* были определены при менее жестких условиях нормирования величины нарастания центробежного ускорения ($I = 0,5 \text{ м/с}^3$):

Радиусы круговых кривых, м . . .	30	50	60	80	100	150	200	250	300	400	500	1000	2000
Минимальные длины переходных кривых, м	30	35	40	45	50	60	70	80	90	100	110	120	100

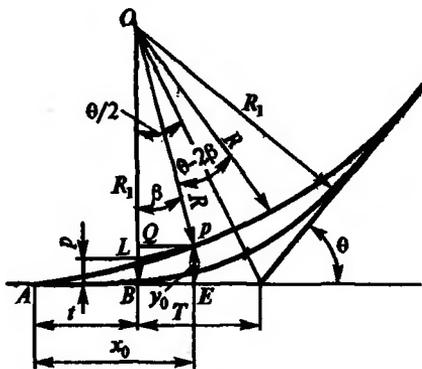


Рис. 5.7. Круговая кривая с вспомогательными переходными

Переходные кривые, длины которых определены по выражению (5.7) или по рекомендациям СНиП 2.05.02-85*, не несут в себе функций самостоятельных элементов трассирования и поэтому являются вспомогательными.

Закругления в плане с переходными кривыми обязательно устраивают при $R \leq 3000$ м на дорогах IА, IБ и IВ категорий и при $R \leq 2000$ м — на дорогах II—V категорий (рис. 5.7).

При устройстве переходных вспомогательных кривых сокращается длина основной круговой кривой, при этом ее центральный угол θ будет меньше на величину 2β :

$$\theta_0 = \theta - 2\beta; \quad \beta = \frac{L}{2R_k},$$

где β — угол наклона касательной в конце переходной кривой; L — длина переходной кривой; R_k — радиус круговой кривой.

Таким образом, для разбивки круговой кривой с вспомогательными переходными необходимо условие $\theta \geq 2\beta$.

При применении переходных кривых происходит сдвигка круговой кривой в сторону ее центра на величину p :

$$p = y_0 - R(1 - \cos \beta).$$

Общая длина тангенса T при этом

$$T = T_1 + t,$$

где x_0, y_0 — координаты точки в конце переходной кривой; $t = x_0 - R \sin \beta$ — смещение начала закругления после вписывания переходных кривых.

Биссектриса закругления

$$B = (R + p) \left(\sec \frac{\beta}{2} - 1 \right).$$

Общая длина кривой

$$K = (2L + K_0); \quad K_0 = \frac{\pi R(\theta - 2\beta)}{180},$$

где K_0 — длина круговой кривой.

Для обеспечения зрительной плавности и ясности трассы, по данным проф. В.Н. Бойкова, минимальные длины переходных кривых, нормируемые СНиП 2.05.02—85*, нужно увеличивать не менее чем в 2 раза.

Как следует из вывода уравнения клотоиды (и это подтверждается экспериментальными исследованиями на дорогах), последние характеризуются линейным законом изменения кривизны по их длине и наилучшим образом отвечают условиям движения по ним автомобилей с постоянными скоростями. Однако на автомобильных дорогах есть участки, по которым автомобили движутся с переменными скоростями (например, на участках ответвлений и примыканий съездов развязок движения в разных уровнях), либо замедленно, либо ускоренно. На этих участках автомобильных дорог используют особые типы переходных кривых, характеризующиеся параболическим либо S-образным законами изменения кривизны (см. § 22.2), и наилучшим образом отвечают условиям движения по ним автомобилей с переменными скоростями, например кривые типа ПЕРС (переменной скорости) или разного рода тормозные кривые:

$$B^3 = RL^2, \quad (5.8)$$

где B — параметр тормозной кривой, м; R — радиус кривизны в точке тормозной кривой на расстоянии L (м) от ее начала.

5.5. Уширение проезжей части на кривых

При движении автомобиля по кривой последний в плане занимает большую ширину, чем его фактическая ширина (рис. 5.8). Ширина, занимаемая автомобилем на проезжей части, оказывается тем большей, чем меньше радиус закругления. Чтобы условия движения по криволинейным участкам автомобильных дорог были идентичны условиям движения на прямолинейных участках, на кривых малых радиусов делают уширения проезжей части. Если сделать допущение, что на относительно коротком участке кривой в плане автомобиль движется по окружности радиуса R , можно получить выражение для необходимого уширения одной полосы движения на кривой.

Из подобия треугольников ABC и $B'CD$ находим:

$$\frac{AC}{BC} = \frac{BC}{CD} \quad \text{или} \quad \Delta(2R - \Delta) = l^2,$$

где l — расстояние от переднего бампера автомобиля до задней оси.

логна. Целесообразность применения кривых с уширением проезжей части более чем на 2—3 м следует обосновывать в проектах технико-экономическим сравнением с вариантами увеличения радиусов горизонтальных кривых, при которых не требуется таких уширений.

Таблица 5.2. Величины уширений полосы движения

Радиусы горизонтальных кривых, м	Величина уширения полосы движения для автомобилей и автопоездов с расстоянием от переднего бампера до задней оси автомобиля или автопоезда, м			
	автомобилей — 7 и менее, автопоездов — 11 и менее	13	15	18
1000	—	—	—	0,4
850	—	0,4	0,4	0,5
650	0,4	0,5	0,5	0,7
575	0,5	0,6	0,6	0,8
425	0,5	0,7	0,7	0,9
325	0,6	0,8	0,9	1,1
225	0,8	1,0	1,0	1,5
140	0,9	1,4	1,5	2,2
95	1,1	1,8	2,0	3,0
80	1,2	2,0	2,3	3,5
70	1,3	2,2	2,5	—
60	1,4	2,8	3,0	—
50	1,5	3,0	3,5	—
40	1,8	3,5	—	—
30	2,2	—	—	—

В пределах основной кривой уширение должно иметь полную ширину. Отвод уширения выполняют на длине переходных кривых. При этом уширение проезжей части увеличивают пропорционально расстоянию от начала переходной кривой таким образом, что полное значение уширения достигается к началу круговой кривой.

Отвод уширения проезжей части может быть выполнен двумя способами (рис. 5.9).

Основным способом является отвод уширению пропорционально длине переходной кривой, а при ее отсутствии — по прямой. Однако при этом в точках *A* и *D* кромка проезжей части имеет перелом, что в ряде случаев негативно сказывается на восприятии плавности дороги (рис. 5.9, *a*). Для исключения этого недостатка используют второй

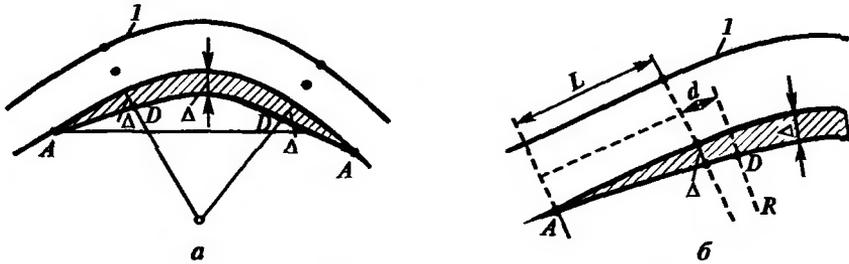


Рис. 5.9. Способы отвода уширений на кривых:

I — основная (круговая) кривая; AD — отвод уширения; Δ — уширение

способ отвода уширения — по касательной к кромке проезжей части на круговой кривой (рис. 5.9, б). При этом получается более плавное сопряжение, однако за счет некоторого сокращения длины участка с полным уширением Δ .

5.6. Виражи

На кривых в плане с радиусами $R \leq 3000$ м на автомагистралях, скоростных дорогах и дорогах I категории и с радиусами $R \leq 2000$ м на дорогах остальных категорий предусматривают устройство односкатных поперечных профилей в сторону центра закругления — *виражей*, исходя из условия обеспечения безопасности и комфортабельности движения автомобилей с расчетными скоростями (рис. 5.10).

Поперечная сила, возникающая при движении автомобиля по кривой в плане с расчетными скоростями, должна компенсироваться за счет виража не более чем на 30%. Требуемую из этого условия величину поперечного уклона виража на круговых кривых определяют:

$$i_b = \frac{v^2}{127R} - \varphi_2, \quad (5.11)$$

где v — расчетная скорость движения, км/ч; R — радиус кривой, м; φ_2 — коэффициент поперечного сцепления колеса с дорогой, принимаемый, по

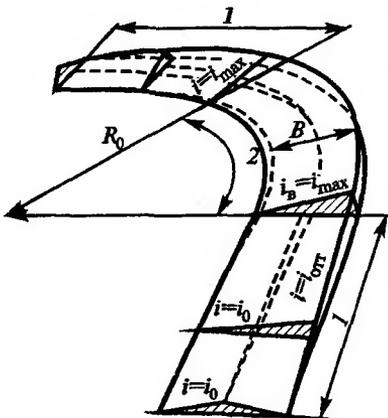


Рис. 5.10. Схема виража:

1 — отгон виража, переходная кривая;
2 — круговая кривая

данным проф. А.В. Макарова, равным $\varphi_2 = (0,6-0,7) \varphi$, где φ — общий коэффициент сцепления (см. § 3.3).

Расчетные величины поперечных уклонов виражей при высоких скоростях движения и при малых радиусах кривых могут получаться значительными. Такие виражи делают на автодромах, предназначенных для автомобильных гонок.

На автомобильных дорогах общего пользования наибольшие поперечные уклоны виражей обычно не превышают 60%. В районах с частой гололедицей, в которых обледенение проезжей части составляет более 10 дней в году, уклоны на виражах принимают не более 40%. В районах с небольшой продолжительностью снегового покрова и количеством дней с гололедицей уклоны виражей допускается принимать до 80%.

Дополнительный продольный уклон наружной кромки проезжей части по отношению к проектному продольному уклону на участках отгона виража не должен превышать для дорог:

автомагистралей, скоростных автомобильных дорог I и II категорий — 5%;

других категорий в равнинной местности — 10%;

других категорий в горной местности — 20%.

Поперечные уклоны проезжей части на виражах, согласно СНиП 2.05.02—85*, назначают в зависимости от радиуса кривой в плане по табл. 5.3.

Таблица 5.3. Поперечный уклон проезжей части на виражах

Радиусы кривых в плане, м	Основной поперечный уклон, наиболее распространенный, %		
	на дорогах I—V категорий	на подъездных дорогах к промышленным предприятиям	в районах с частой гололедицей
От 3000 до 1000 для дорог I категории	20—30	—	20—30
От 2000 до 1000 для дорог II—V категорий	20—40	—	20—30
От 1000 до 800	30—40	—	30—40
» 800 » 700	30—40	20	30—40
» 700 » 650	40—50	20	40
» 650 » 600	50—60	20	40
» 600 » 500	60	20—30	40
» 500 » 450	60	30—40	40
» 450 » 400	60	40—60	40
» 400 и менее	60	60	40

Примечание. Меньшие значения поперечных уклонов на виражах соответствуют большим радиусам кривых, а большие значения — меньшим радиусам.

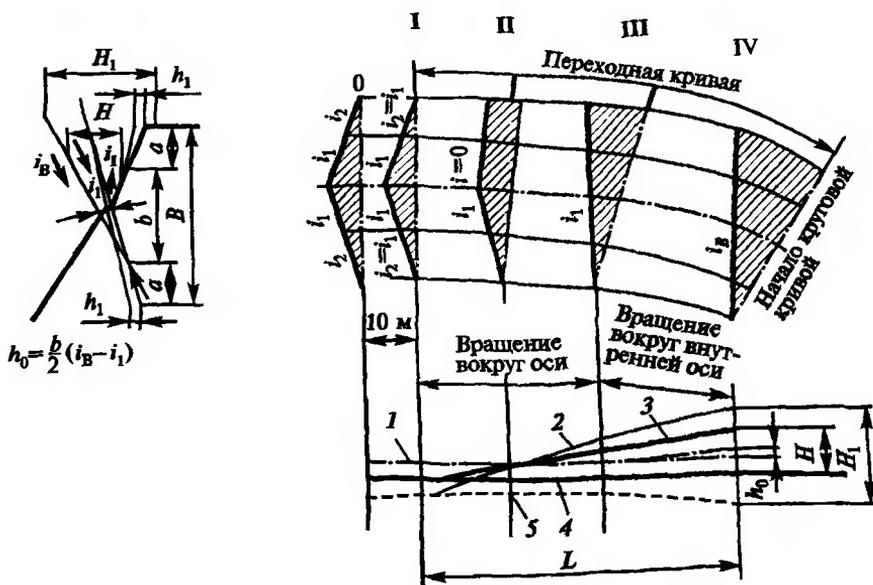


Рис. 5.11. Схема отгона виража:

1 — ось дороги; 2 — внешняя бровка; 3 — внешняя кромка; 4 — внутренняя кромка; 5 — внутренняя бровка; I—IV — поперечные профили на участке отгона виража

Переход от двускатного профиля дороги к односкатному осуществляют на протяжении переходной кривой, а при ее отсутствии — на прилегающем к кривой прямом участке с расчетом длины отгона виража (рис. 5.11).

Виражи на многополосных дорогах с разделительной полосой, как правило, проектируют с отдельными поперечными уклонами для проезжих частей разных направлений, с необходимыми изменениями поперечного уклона разделительной полосы.

Поперечный уклон укрепленной части внешней обочины на вираже принимают одинаковым с уклоном проезжей части дороги. Поперечный уклон укрепленной части внутренней обочины на вираже принимают величиной до 10‰ круче уклона проезжей части.

На участках дорог, где две соседние кривые, обращенные в одну сторону, расположены близко друг к другу и прямая вставка между ними незначительна, односкатный профиль устраивают и на прямой вставке или увеличивают радиусы кривых для исключения короткой прямой вставки и создания лучших условий для движения.

На горных дорогах при расположении кривой у обрыва на участках виражей предусматривают ограждения.

5.7. Обеспечение видимости на кривых в плане

Видимость на кривых в плане проверяют для автомобиля, следующего по крайней внутренней полосе движения. Принимают, что водитель находится в 1,5 м от внутренней кромки проезжей части при положении глаз на высоте 1,2 м, что соответствует усредненному положению водителя легкового автомобиля. Поскольку под расчетной видимостью подразумевают безопасное расстояние, проходимое автомобилем по дороге, расстояние видимости на кривых измеряют по траектории движения автомобиля.

Препятствиями, ограничивающими видимость на криволинейных участках автомобильных дорог, могут быть:

лес, кустарник, сады, примыкающие к дороге с внутренней стороны; здания и сооружения;

откосы выемок;

крутые косогоры с внутренней стороны кривых.

Полный математический анализ видимости в плане выполнен инж. В.И. Ксенодоховым, исследовавшим уравнение кривой, огибающей систему лучей взгляда водителя при движении автомобиля по круговой кривой с переходными кривыми и уширением.

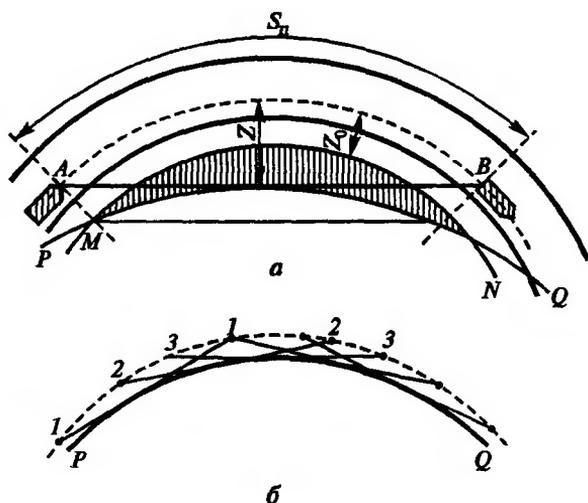
Водитель автомобиля, находящегося в точке A , должен видеть поверхность дороги в точке B , находящейся на расчетном расстоянии видимости S_n по длине траектории движения автомобиля (рис. 5.12, a).

Луч зрения AB является хордой, стягивающей дугу, длина которой равняется расчетному расстоянию видимости поверхности дороги S_n , определяемому по уравнению (3.13). Сегмент, ограниченный этой хордой и дугой (траекторией движения автомобиля), должен быть свободен от различных естественных и искусственных препятствий, ограничивающих видимость.

При движении автомобиля по горизонтальной кривой хорда MN также перемещается, касаясь некоторой кривой, называемой *кривой зоны видимости*. Чем больше расчетное расстояние видимости поверхности дороги S_n , тем больше кривая зоны видимости удаляется от дороги и тем большие объемы работ по устранению препятствий, мешающих видимости, необходимо выполнить.

Для определения границ зоны видимости (координат кривой зоны видимости) используют графический и аналитический способы.

Графический способ заключается в том, что на вычерченном в крупном масштабе плане закругления наносят ожидаемую траекто-



Р и с. 5.12. Обеспечение видимости на кривых в плане:
а — общая схема видимости; *б* — построение кривой видимости

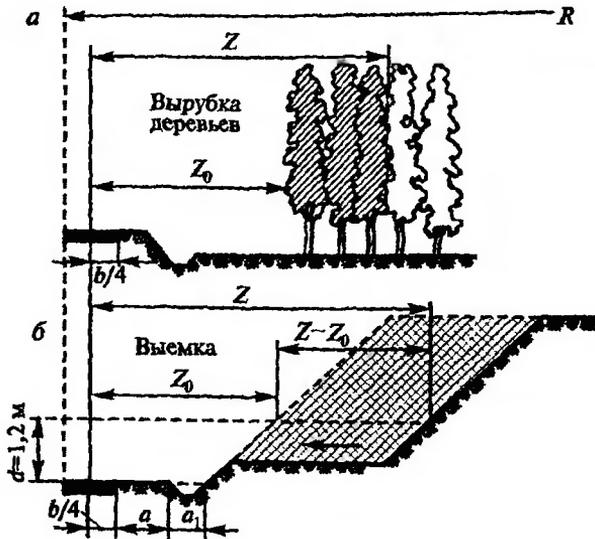
рию движения автомобиля (рис. 5.12, *б*), на которой намечают ряд точек (1—3), от которых откладывают отрезки, соответствующие расчетному расстоянию видимости S_n по кривой. Концы отрезков соединяют прямыми линиями, огибающая которых и будет соответствовать кривой зоны видимости (границы видимости).

Если обозначить расстояние от траектории движения автомобиля до кривой зоны видимости через Z , а расстояние от траектории до линии препятствия через Z_0 (см. рис. 5.12, *а*), то очевидно в случае, когда $Z_0 > Z$, видимость обеспечена, а в случае, когда $Z_0 < Z$, необходимо устранить препятствия, ограничивающие видимость (рис. 5.13).

Несмотря на то что высота взгляда водителя составляет в среднем 1,2 м над уровнем проезжей части, устранение препятствий целесообразно производить все же с уровня проезжей части, учитывая возможность появления снеговых отложений, появления растительности и т.д.

Если принять длину по хорде $MN \approx S_n$, то приближенно расстояние Z (с некоторым запасом) в середине кривой можно определить, применив теорему «о пропорциональных отрезках» (рис. 5.14):

$$\frac{S_n^2}{4} = (2R - Z)Z,$$



Р и с. 5.13. Зона устранения препятствий, ограничивающих видимость:

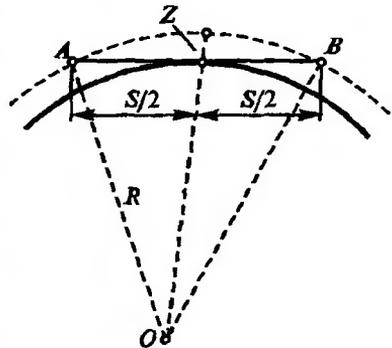
a — вырубка деревьев; *б* — срезка откоса выемки

откуда

$$Z \approx \frac{S_n^2}{8R}. \quad (5.12)$$

Точный аналитический способ построения кривой зоны видимости состоит в следующем. Построение кривой зоны видимости осуществляют делением ее на участки. Для случая, когда расчетное расстояние видимости меньше длины кривой $S_n \leq K$, кривая зоны видимости состоит из двух участков: первый соответствует случаю, когда один конец отрезка AB «скользит» по прямой, а другой — по кривой; второй соответствует случаю, когда оба конца хорды AB «скользят» по кривой (где K — длина круговой кривой).

Для расчета первого участка кривой зоны видимости используют способ прямоугольных координат, приняв за начало координат точку начала кривой или ее конца:



Р и с. 5.14. Схема упрощенного определения величины срезки для обеспечения видимости в плане

$$x = R \left[\frac{(\sin \varphi + \beta - \varphi) \operatorname{tg} \frac{\varphi}{2}}{\beta - \varphi + 2 \operatorname{tg} \frac{\varphi}{2}} - (\beta - \varphi) \right]; \quad y = R \frac{(1 - \cos \varphi) \operatorname{tg} \frac{\varphi}{2}}{\beta - \varphi + 2 \operatorname{tg} \frac{\varphi}{2}}; \quad 0 \leq \varphi \leq \beta, \quad (5.13)$$

где $\frac{S_n}{R} = \varphi$; $\frac{S}{R} = \beta$; S_n — расчетное расстояние видимости поверхности дороги (по кривой); S — расстояние по хорде.

На втором участке кривой, когда оба конца отрезка MN «скользят» по круговой кривой, кривая зона видимости представляет собой концентрическую окружность, меньшего радиуса с координатами точек:

$$y = R \left(1 - \sqrt{\cos^2 \frac{\beta}{2} - \frac{x^2}{R^2}} \right), \quad \frac{1}{2} R \sin \beta \leq x \leq R \cos \frac{\beta}{2} \sin \frac{\alpha}{2}. \quad (5.14)$$

Уравнение (5.14) справедливо для случая, когда расстояние видимости $S_n \leq K$.

Если $S_n > K$, кривая зоны видимости также состоит из двух участков: первый соответствует случаю, когда один конец отрезка AB «скользит» по прямой, а другой — по окружности; второй соответствует случаю, когда оба конца отрезка AB скользят по прямой.

На первом участке координаты точек кривой зоны видимости определяют по уравнению (5.14), но только для случая $0 \leq \varphi \leq \alpha$, а на втором — по уравнению параболы второго порядка:

$$y = ax^2 + b, \quad (5.15)$$

симметричной относительно оси координат, с подобранными параметрами a и b .

При автоматизированном проектировании плана трассы, когда трасса автомобильной дороги в общем случае представлена сопряженными между собой элементами клотоидной трассы (см. гл. 18) и координаты ее заданы в дискретном виде, кривую зоны видимости можно рассчитать при любой конфигурации траектории движения автомобиля, применив математическое компьютерное описание кривой зоны видимости для клотоидной трассы любой сложности.

Глава 6

ПОПЕРЕЧНЫЕ ПРОФИЛИ ДОРОГ

6.1. Обоснование ширины проезжей части и обочин

Как показывают многочисленные экспериментальные наблюдения, даже на прямолинейных участках автомобильных дорог автомобили фактически движутся не по прямому направлению, а по некоторой синусоидальной траектории. Амплитуда этой траектории тем выше, чем выше скорость движения и, следовательно, тем большая ширина *полосы движения* необходима автомобилю на проезжей части. По данным проф. Я.В. Хомяка, безопасное расстояние, на которое водитель смещает свой автомобиль от края смежной полосы движения или от кромки проезжей части, тем больше, чем больше скорость движения его автомобиля и чем больше скорость движения встречных автомобилей.

Необходимая ширина полосы движения складывается из ширины кузова автомобиля и безопасных расстояний от кузова до края смежной полосы движения и от правого колеса до кромки проезжей части. Эти расстояния связаны с индивидуальными особенностями водителей и меняются в некоторых известных пределах. Средние их значения могут быть установлены только на основе обобщения большого числа специально поставленных натуральных наблюдений на автомобильных дорогах. Такие наблюдения неоднократно проводились М.С. Замахаяевым, Д.П. Великановым, Н.Ф. Хорошиловым и другими исследователями.

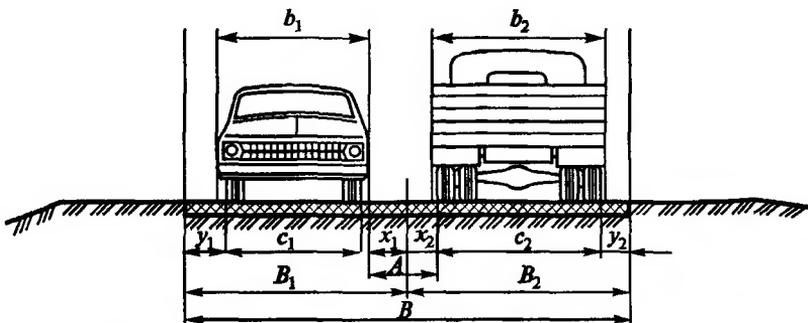
Ширину проезжей части 2Π двухполосной дороги (а их в России наибольшее количество) можно определить согласно предложению Н.Ф. Хорошилова по формуле (рис. 6.1):

$$2\Pi = b + c + 2y + x,$$

где Π — ширина полосы движения; b — ширина кузова автомобиля, м; c — колея автомобиля (расстояние между внешними гранями следа задних колес автомобиля), м; y — безопасное расстояние от внешней грани следа колеса автомобиля до кромки проезжей части, м; x — запас безопасности между кузовами встречных автомобилей, м.

Расчетные значения величин x и y можно определять по эмпирическим формулам Н.Ф. Хорошилова:

$$x = 0,3 + 0,1\sqrt{v_1 + v_2}; \quad (6.1)$$



Р и с. 6.1. Схема к определению ширины проезжей части

$$y = \sqrt{0,1 + 0,0075v},$$

где v — скорость движения автомобиля, км/ч; v_1 и v_2 — скорости на смежных полосах движения.

При движении по смежным полосам в одном направлении на многополосных дорогах:

$$x = 0,3 + 0,075\sqrt{v_1 + v_2}; \quad (6.2)$$

$$y = \sqrt{0,1 + 0,0075v}.$$

Формулы (6.1) и (6.2) предусматривают условия движения автомобилей по проезжей части, сопрягающейся в одном уровне с ровными и прочными обочинами или с краевыми полосами. При наличии у кромки проезжей части возвышающегося бордюра величину y принимают равной величине неиспользуемой части ширины покрытия (две-три высоты) бордюра.

При обосновании ширины полосы движения обычно рассматривают два возможных случая движения автомобилей: первый — легковых автомобилей, имеющих относительно небольшую ширину кузовов, но движущихся с высокими скоростями; второй — грузовых автомобилей с широкими кузовами, но движущихся с существенно меньшими скоростями.

Современные нормативные документы (ГОСТ Р 52399—2005, СНиП 2.05.02—85*) предусматривают следующие ширины одной полосы движения для дорог различных категорий, м:

для дорог I категории	3,75
для двухполосных дорог II категории.	3,75
для четырехполосных дорог II категории.	3,50
для дорог III категории	3,50
для дорог IV категории	3,00

Количество полос движения на многополосных дорогах устанавливают в зависимости от расчетной интенсивности движения исходя из недопущения превышения расчетного значения уровня загрузки дороги движением по формуле:

$$n = \frac{N_{\text{прив}}}{zP}, \quad (6.3)$$

где $N_{\text{прив}}$ — приведенная к легковому автомобилю расчетная часовая интенсивность движения, прив.ед/ч; z — расчетный уровень загрузки движением, определяемый по табл. 6.1; P — пропускная способность одной полосы движения, определяемая по табл. 4.1 или по формуле (4.2).

Таблица 6.1. Расчетные уровни загрузки

Порядок применения	Категория дороги					
	IA	IB	IV	II	III	IV
Расчетный уровень на 10 лет	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,4
Расчетный уровень на 20 лет	0,7	0,7	0,6	0,6	0,6	0,6

На дорогах V категории, имеющих одну полосу движения шириной 4,5 м, устраивают разъезды, расстояния между которыми предусматривают равными расстоянию видимости встречного автомобиля S_B , определяемому по уравнению (3.14), но не более 1 км. Ширину земляного полотна на разъездах предусматривают не менее 8,0 м для размещения двух полос движения (каждая шириной не менее 3,0 м) и двух обочин шириной по 1,0 м. Длину разъездов предусматривают не менее 30 м. Переход от однополосной к двухполосной проезжей части на разъездах осуществляют на протяжении не менее 10 м.

В пересеченной местности при чередовании подъемов и спусков многие водители увеличивают скорость автомобиля в нижней части спусков, с тем чтобы было легче преодолеть последующий подъем, поэтому ширину проезжей части дорог в пределах средней части вогнутых кривых с алгебраической разностью продольных уклонов 60‰ и более увеличивают по 0,5 м с каждой стороны для дорог II и III и — на 0,25 м для дорог IV и V категорий по сравнению с шириной на остальной части дорог.

На затяжных подъемах двухполосных дорог с уклонами 30—40‰ и более автомобили большой грузоподъемности и автопоезда движутся с весьма небольшими скоростями, нередко не превышающими 10—15 км/ч, вынуждая идущий сзади транспортный поток двигаться

с теми же малыми скоростями. На таких участках на подъем предусматривают устройство дополнительной полосы движения шириной, равной ширине полосы движения основной проезжей части, если расчетная интенсивность движения в сторону подъема в первые пять лет эксплуатации дороги превысит 4000 прив.ед/сутки, при продольном уклоне более 30‰ и длине подъема более 1 км, а также при уклоне более 40‰ и длине подъема более 0,5 км.

Чтобы перестроение автомобилей не создавало помех основному транспортному потоку, дополнительные полосы движения начинают за 50 м до начала подъема и продолжают за подъемом на 100 м при интенсивности движения в сторону подъема до 5000 прив.ед/сут и на 200 м — при большей интенсивности. Отгон уширения проезжей части осуществляют не круче 50:1. Для эффективного использования дополнительных полос движения их выделяют горизонтальной разметкой (рис. 6.2) и обозначают указательными знаками.

На двухполосных дорогах предусматривают устройство *укрепленных обочин* с двух сторон от проезжей части для обеспечения прочности кромок и возможности съезда на обочины и временного размещения неисправных или поврежденных в дорожно-транспортных происшествиях автомобилей. При проведении ремонтно-восстановительных работ обочины часто используют для складирования дорожно-строительных материалов. Минимально допустимой является такая ширина обочин, при которой габариты стоящих на них автомобилей не вдаются в пределы проезжей части с некоторым минимальным запасом. Для большинства типов автомобилей этому условию удовлетворяет ширина 3,75 м. Однако, учитывая, что минимальная ширина обочин зависит также и от расчетной скорости движения, для автомобильных дорог различных категорий ширина обочин может быть меньше и лежит в пределах от 3,75 до 1,75 м. Ширину обочин автомобильных дорог в местах устройства дополнитель-



Рис. 6.2. Схема планировки дополнительной полосы на подъеме:

а — продольный профиль; *б* — план; 1 — дополнительная полоса; 2 — линия разметки, разрешающая обгон; 3 — линия разметки, запрещающая обгон; 4 — участок отгона дополнительной полосы

ных полос движения на подъём для дорог категорий IA, IB, IB допускаются уменьшать до 1,5 м, а для дорог остальных категорий до — 1,0 м.

На автомагистралях, скоростных дорогах и многополосных дорогах обычного типа между полосами движения разных направлений предусматривают устройство *разделительных полос* с устройством укрепленных обочин лишь с внешней стороны каждой проезжей части.

Учитывая, что выезд автомобилей на грязные обочины в сырую погоду опасен из-за возможности заносов, а также в связи с неизбежным загрязнением покрытия при выезде автомобилей обратно на проезжую часть, обочины обязательно укрепляют на всю ширину или на часть их ширины. Ширину укрепленной части обочин на дорогах разных категорий нормируют в пределах от 1,0 до 2,5 м. Укрепленная часть обочин за пределами краевой полосы должна иметь дорожную одежду с покрытием из каменного материала, обработанного вяжущим (битумом или цементом), а прочность ее должна быть достаточной для недопущения остаточных деформаций от стоящего автомобиля с расчетной нагрузкой на ось.

Во избежание разрушения кромок проезжей части и образования колеобразных углублений, определяющих заметный рост аварийности на дорогах с тяжелейшими последствиями, на обочинах вдоль кромок проезжей части с двух ее сторон устраивают *краевые (укрепленные) полосы* шириной по 0,75—0,50 м. На разделительных полосах краевые полосы безопасности устраивают шириной 1,0 м. На современных автомобильных дорогах чаще всего краевые полосы устраивают по типу основной дорожной одежды, отделяя их от основной проезжей части сплошной горизонтальной разметкой, либо устраивают краевые полосы из материала другого цвета, что способствует повышению дисциплины вождения.

Для повышения безопасности движения и снижения аварийности на дорогах на обочинах и разделительных полосах нередко устраивают соответственно односторонние и двусторонние ограждения (для предотвращения случайных съездов потерявших управление автомобилей с высоких насыпей и исключения лобовых столкновений и ослепления водителей встречного транспорта на многополосных дорогах с разделительными полосами). Ограждения на обочинах дорог располагают на расстоянии не менее 0,5 м и не более 0,85 м от бровки земляного полотна в зависимости от жесткости дорожных ограждений.

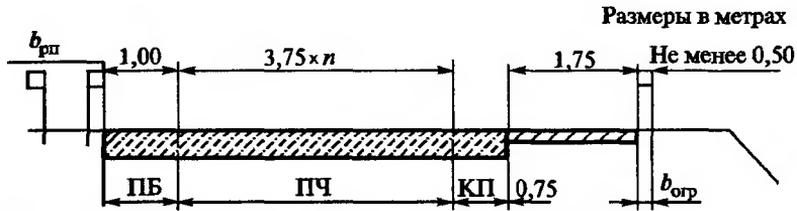
Основные параметры элементов поперечных профилей проезжей части и земляного полотна автомобильных дорог в зависимости от их категории нормируются ГОСТ Р 52398—2005 в соответствии с табл. 6.2.

Т а б л и ц а 6.2. Параметры элементов поперечного профиля проезжей части и земляного полотна автомобильных дорог

Параметры элементов дорог	Автомагистраль	Скоростная дорога	Автомобильные дороги обычного типа (нескоростная дорога) категории					
	IA	IB	IV	II		III	IV	V
Общее число полос движения, шт.	4 и более	4 и более	4 и более	4	2	2	2	1
Ширина полосы движения, м	3,75	3,75	3,75	3,5	3,75	3,5	3,0	4,5
Ширина обочины, м	3,75	3,75	3,75	3,0	3,0	2,5	2,0	1,75
Ширина краевой полосы у обочины, м	0,75	0,75	0,75	0,5	0,5	0,5	0,5	—
Ширина укрепленной части обочины, м	2,5	2,5	2,5	2,0	2,0	1,5	1,0	—
Наименьшая ширина центральной разделительной полосы без дорожных ограждений, м	6,0	6,0	5,0	5,0	—			
Наименьшая ширина центральной разделительной полосы с ограждением по оси дороги, м	2 м + ширина ограждения							
Ширина краевой полосы безопасности у разделительной полосы, м	1,0							

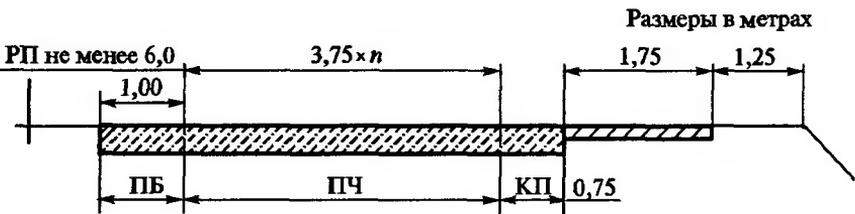
П р и м е ч а н и я: 1. Ширина полосы безопасности входит в ширину разделительной полосы, а ширина краевой полосы — в обочину. 2. Ширину обочины на особо трудных участках горной местности, участках, проходящих по особо ценным земельным угодьям, а также в местах с переходно-скоростными полосами и с дополнительными полосами на подъеме при соответствующем технико-экономическом обосновании с разработкой мероприятий по организации и безопасности движения допускается уменьшать до 1,5 м для автомобильных дорог категорий IA, IB и II и до 1,0 м — для дорог остальных категорий. 3. Ограждения на обочинах дорог располагают на расстоянии не менее 0,50 м и не более 0,85 м от бровки земляного полотна в зависимости от жесткости конструкции дорожных ограждений.

Поперечные профили автомобильных дорог разных категорий проектируют в соответствии с рис. 6.3—6.14.



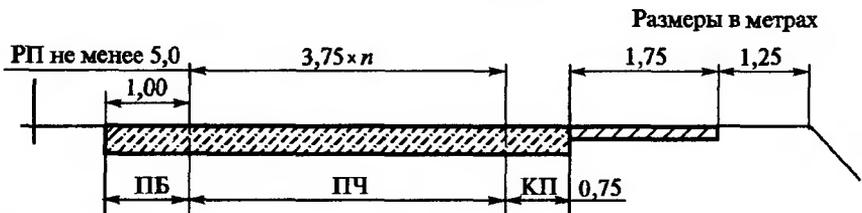
Р и с. 6.3. Поперечные профили автомобильных дорог категорий IA, IB, IB с ограждениями:

ПБ — краевая полоса безопасности у разделительной полосы; ПЧ — проезжая часть; КП — краевая полоса у обочины; $b_{рп}$ — ширина разделительной полосы; $b_{огр}$ — ширина ограждения с учетом требований ГОСТ 23457—86

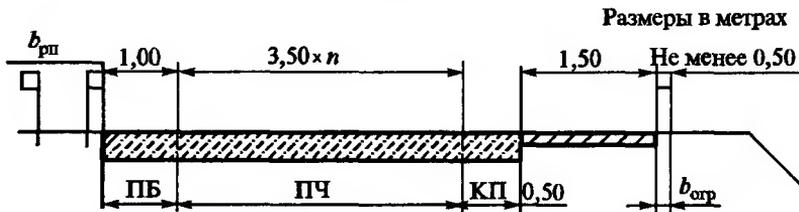


Р и с. 6.4. Поперечные профили автомобильных дорог категорий IA, IB без ограждений:

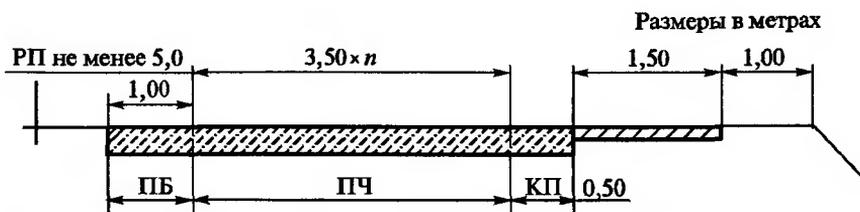
РП — разделительная полоса



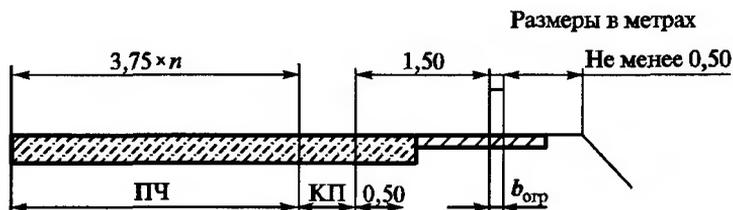
Р и с. 6.5. Поперечные профили автомобильных дорог категории IB без ограждений



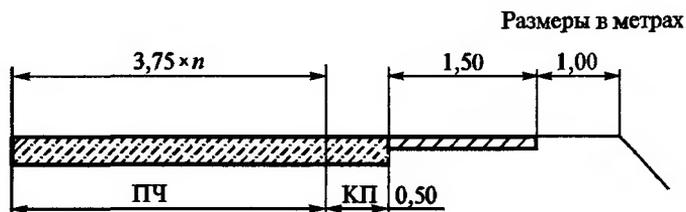
Р и с. 6.6. Поперечные профили автомобильных дорог категории II с ограждениями при четырех полосах движения



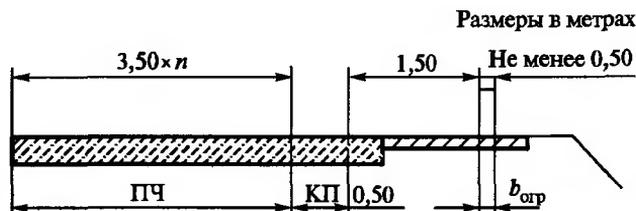
Р и с. 6.7. Поперечные профили автомобильных дорог категории II без ограждений при четырех полосах движения



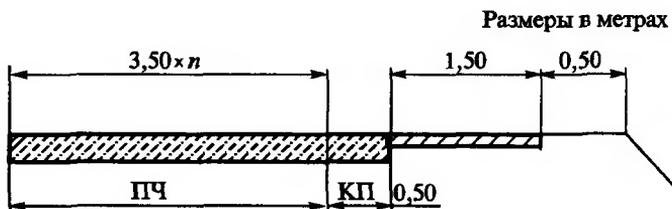
Р и с. 6.8. Поперечные профили автомобильных дорог категории II с ограждениями при двух полосах движения



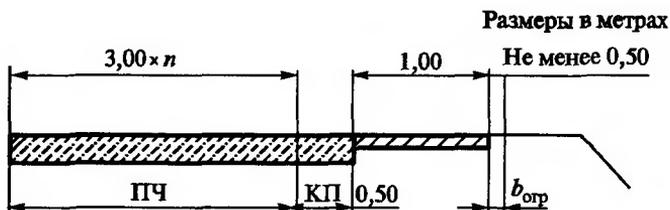
Р и с. 6.9. Поперечные профили автомобильных дорог категории II без ограждений при двух полосах движения



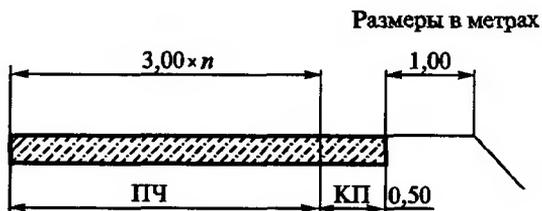
Р и с. 6.10. Поперечные профили автомобильных дорог категории III с ограждениями



Р и с. 6.11. Поперечные профили автомобильных дорог категории III без ограждений



Р и с. 6.12. Поперечные профили автомобильных дорог категории IV с ограждениями



Р и с. 6.13. Поперечные профили автомобильных дорог категории IV без ограждений



Р и с. 6.14. Поперечные профили автомобильных дорог категории V

6.2. Остановочные и переходно-скоростные полосы

На участках дорог, проектируемых на расчетную скорость 120 км/ч и выше, где в соответствии с прогнозом интенсивность движения за первые пять лет эксплуатации будет достигать от расчетной перспективной 50% и более, в местах, определяемых и обосновываемых проектом, предусматривают устройство *остановочных полос*, заменяющих укрепленную часть обочины, длиной, достаточной для стоянки расчетного количества автомобилей, но не менее 50 м, и шириной 3,0 м с конструкцией дорожной одежды, рассчитанной на осевые нагрузки от стоящих транспортных средств.

На участках автомобильных дорог, где ожидают заметное изменение скоростей движения при перестроении автомобилей (замедленное движение быстро движущихся автомобилей при их съезде с основной проезжей части, равно как и ускоренное движение медленно движущихся автомобилей на въезде их на основную дорогу), возникает опасность дорожно-транспортных происшествий. К таким участкам автомобильных дорог относят:

участки ответвлений и примыканий съездов развязок движения в одном и разных уровнях;

места расположения площадок автобусных остановок;

участки дорог у объектов дорожного сервиса (АЗС, пунктов питания, медицинской помощи и торговли, мотелей и т.д.);

участки у площадок отдыха;

участки у постов ДПС ГИБДД.

Для того чтобы избежать на этих участках автомобильных дорог повышенной аварийности, устраивают дополнительные полосы проезжей части, отделяя их от основной горизонтальной разметкой. Дополнительные полосы дают возможность автомобилям, съезжающим с основной дороги, заблаговременно без помех для автомобилей, следующих в прямом направлении, снизить скорость, а автомобилям, въезжающим на основную дорогу, наоборот, разогнаться до скоростей едущих по ней автомобилей.

Эти дополнительные полосы движения называют *переходно-скоростными полосами (ПСП)*.

Длину переходно-скоростных полос движения рассчитывают с учетом скорости организации движения на основной дороге, расчетной скорости движения съезда, интенсивностей движения на переходно-скоростной полосе и основной дороге по формулам:

длина переходно-скоростных полос торможения

$$L_{\text{тор}} = L_{\text{отт}} + L_{\text{изм}};$$

длина переходно-скоростных полос разгона

$$L_{\text{раз}} = L_{\text{отг}} + L_{\text{изм}} + L_{\text{м}},$$

где $L_{\text{отг}}$ — длина отгона ширины переходно-скоростной полосы, принимаемая в соответствии с табл. 6.3; $L_{\text{изм}}$ — длина участка изменения скорости, определяемая по формуле:

$$L_{\text{изм}} = \frac{v_1^2 - v_2^2}{26a} \quad (6.4)$$

где v_1 — проектная скорость организации движения для дороги (не более 100 км/ч для дорог I категории и 90 км/ч для дорог II—IV категорий), км/ч; v_2 — расчетная скорость на съезде, км/ч; a — расчетное линейное ускорение, принимаемое в зависимости от величины продольного уклона на переходно-скоростной полосе по табл. 6.4; $L_{\text{м}}$ — длина участка маневрирования при входе на основную полосу, принимаемая по табл. 6.5.

Т а б л и ц а 6.3. Длина отгона ширины переходно-скоростных полос

Расчетная скорость дороги, км/ч	Длина отгона переходно-скоростных полос, м	
	торможения	разгона
140	50	60
120	50	50
100	30*	50
80	30*	30

*Отгон полос торможения рекомендуется начинать с уступа величиной 0,5 м.

Т а б л и ц а 6.4. Расчетные линейные ускорения, м/с²

Продольный уклон, ‰	-40	-20	0	20	40
Ускорение торможения	1,5	2,0	2,0	3,0	3,5
Ускорение разгона	2,5	1,8	1,5	1,0	0,6

П р и м е ч а н и е. Для других величин продольного уклона на переходно-скоростных полосах значения расчетного линейного ускорения принимают по интерполяции.

Т а б л и ц а 6.5. Длины участка маневрирования, м

Интенсивность движения по основной полосе, прив.ед/ч	200	400	600	800	1000
Длина участка маневрирования $L_{\text{м}}$	10	20	30	50	60

6.3. Поперечные уклоны

Для обеспечения стока воды с поверхности дороги проезжей части краевым полосам, обочинам и примыкающим элементам придают *поперечные уклоны*. На прямолинейных в плане участках дорог и на горизонтальных кривых с радиусами 3000 м и более на дорогах I категории и с радиусами 2000 м и более на дорогах остальных категорий, где не требуется устройства виража, проезжей части придают двускатный поперечный профиль.

На кривых в плане с меньшими радиусами предусматривают устройство виражей с односкатным поперечным профилем исходя из условия обеспечения безопасности движения автомобилей с расчетными скоростями при заданных значениях радиусов кривых (см. § 5.6).

Поперечные уклоны проезжей части (кроме участков кривых в плане, на которых требуется устройство виражей) назначают в зависимости от числа полос движения и климатических условий по табл. 6.6.

Т а б л и ц а 6.6. Поперечные уклоны проезжей части

Класс и категория дороги	Поперечный уклон, ‰		
	Дорожно-климатические зоны		
	I, II и III	IV	V
Автомобильные дороги, имеющие разделительную полосу: при двускатном поперечном профиле каждой проезжей части	20	25	15
при односкатном профиле: первая и вторая полосы от разделительной полосы	20	20	15
третья и последующие полосы	25	25	20
Автомобильные дороги без разделительной полосы	20	20	15

П р и м е ч а н и е. На гравийных и щебеночных покрытиях поперечный уклон принимают 30‰, а на покрытиях из грунтов, укрепленных местными материалами, — 40‰.

Поперечные уклоны укрепленной части обочин при двускатном поперечном профиле принимают в зависимости от климатических условий и типа укрепления по табл. 6.7.

Т а б л и ц а 6.7. Поперечные уклоны укрепленной части обочины

Тип укрепления обочины	Поперечный уклон, ‰
Каменными материалами, обработанными вяжущими	30...40
Гравием, щебнем, шлаком без обработки вяжущими или замощение каменными материалами и бетонными плитами	40...60
Дернование или засев трав	50...60

П р и м е ч а н и я: 1. Для районов с небольшой продолжительностью снегового покрова и отсутствия гололеда для обочин, укрепленных дернованием, может быть допущен поперечный уклон 50...80‰. 2. При устройстве земляного полотна из крупно- и среднезернистых песков, а также из тяжелых суглинистых грунтов и глин поперечный уклон обочин, укрепленных засевами трав, допускается принимать равным 40‰.

На автомобильных дорогах I категории, расположенных в одном земляном полотне, проезжую часть для разных направлений, как правило, устраивают с одностатным профилем, при этом двустатный профиль будет относительно разделительной полосы. При размещении каждого направления движения на самостоятельном земляном полотне двустатный профиль придается для каждого направления движения, аналогично поперечному профилю двухполосных дорог II категории (см. рис. 2.9, а).

Грунтовая разделительная полоса между укрепленными полосами при ширине 5—6 м и с бордюрами при ширине менее 5 м планируется горизонтально с расположением поверхности земли на 3—6 см ниже верхних граней укрепленных полос или бордюров. При устройстве подземного водоотвода и водоприемных решеток по оси разделительной полосы в случаях достаточной ее ширины в районах, обеспечивающих надежную работу водоотводных систем, проезжую часть для каждого направления движения устраивают с двустатным профилем, а разделительной полосе придают вогнутое очертание с уклоном к ее середине.

Разделительной полосе, укрепленной щебеночным и гравийным материалами, обработанными различными вяжущими, придают выпуклое очертание с поперечным уклоном в зоне примыкания к проезжей части большим, чем ее поперечный уклон.

Краевые полосы в зоне сопряжения с обочинами имеют поперечный уклон, равный поперечному уклону проезжей части.

Поперечные профили верхней части земляного полотна автомобильных дорог II—V категорий представлены на рис. 2.9, а.

6.4. Велосипедные дорожки, тротуары и бордюры

Велосипедные дорожки проектируют вдоль автомобильных дорог на участках, где интенсивность движения автомобилей достигает 4000 прив.ед/сут, а расчетная интенсивность велосипедного движения или мопедов за первые пять лет эксплуатации дорог будет превышать 200 ед/сут.

Ширину проезжей части велосипедной дорожки для однополосного движения принимают не менее 1,5 м, а для двухполосной проезжей части — не менее 2,25 м, ширину обочин при расположении велосипедных дорожек на самостоятельном полотне принимают не менее 0,5 м. Продольные уклоны на велосипедных дорожках должны быть не более 40‰. Параметры остальных геометрических элементов велосипедных дорожек определяют из расчетной скорости движения 20—30 км/ч.

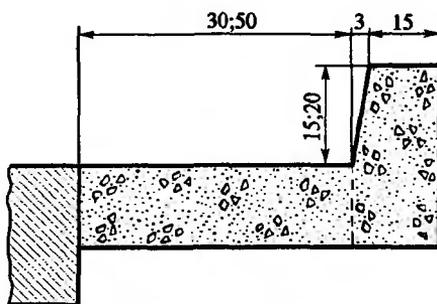
Тротуары и пешеходные дорожки предусматривают на всех участках автомобильных дорог, проходящих через населенные пункты, при интенсивности пешеходного движения более 200 чел/сут или 20 чел/ч. Тротуары и пешеходные дорожки предусматривают также на подходах к населенным пунктам и на участках дорог, расположенных вблизи мест отдыха.

Ширину тротуаров и пешеходных дорожек принимают в соответствии с интенсивностью пешеходного движения в часы «пик». Минимальная ширина полосы пешеходного движения принимается равной 0,75 м. При интенсивности пешеходного движения от 20 до 90 чел/ч ширину тротуаров и пешеходных дорожек принимают равной 1,5 м с последующим увеличением ширины на 0,75 м на каждые 90 чел/ч. При интенсивности пешеходного движения менее 20 чел/ч в обоих направлениях допускается устройство тротуаров и пешеходных дорожек шириной 1,0 м.

Наибольший продольный уклон тротуаров и пешеходных дорожек не должен быть более 80‰. При больших продольных уклонах проектируют лестничные сходы с уклоном не круче 1:2,5.

С целью обеспечения безопасности и четкой организации движения на сложных участках дорог для выделения отдельных элементов (разделительных полос; тротуаров, расположенных на земляном полотне; островков безопасности; автобусных остановок и т.д.) используют *бордюры* (рис. 6.15).

Бордюры устраивают только в случае их действительной необходимости, поскольку они уменьшают используемую ширину проезжей части при движении автомобилей с высокими скоростями, затрудняют работу водителей, осложняют и ухудшают механизированную



Р и с. 6.15. Бордюр

очистку проезжей части от снега. Поэтому в местах, не требующих применения бордюров, по условиям безопасности движения оказывается более предпочтительным сопряжение проезжей части с обочинами и разделительными полосами путем устройства краевых полос.

При устройстве бордюров высотой более 10 см над проезжей частью их смещают от кромки проезжей части на расстояние не менее двух-трехкратной их высоты. Этого достигают либо изготовлением бордюров специального профиля (см. рис. 6.15), либо установкой между бордюром и проезжей частью бетонных плит.

Применяют следующие типы бордюров:

бордюр барьерного типа высотой 20 см и более применяют вдоль прилегающих к проезжей части тротуаров, у зон безопасности пешеходов на переходах, для выделения и поднятия посадочных площадок на автобусных остановках, на искусственных сооружениях и в других местах, где съезд автомобиля может повлечь тяжелую аварию;

бордюр высотой 15 см применяют на пересечениях дорог для выделения направлений движения (островки, разделительные полосы на второстепенных дорогах), в местах устройства автобусных остановок в районах с непродолжительным снежным покровом (отделяющие островки), при узких разделительных полосах.

6.5. Полоса отвода

Полоса местности, выделяемая для размещения на ней полотна автомобильной дороги и всех дорожных сооружений различного назначения, называется *полосой отвода*. Различают полосы *временного* и *постоянного* отвода.

В связи с исключительно высокой народно-хозяйственной ценностью земель, пригодных для сельскохозяйственной деятельности и ведения лесного хозяйства, согласно положениям действующих нор-

мативных документов¹ по отводу земель для автомобильных дорог, ширину постоянного отвода полосы земли ограничивают фактическими границами полотна дороги, увеличенными с каждой стороны по 1 м. Эта полоса в законодательном порядке, с компенсацией убытков землевладельцам за счет стоимости строительства автомобильной дороги, изымается из ведения старых землепользователей и передается в распоряжение соответствующих дорожных организаций.

Помимо собственно полотна автомобильной дороги на полосе постоянного отвода размещают:

дорожные знаки, дорожные ограждения и элементы освещения автомобильных дорог;

вдоотводные сооружения;

жилые и производственные здания и сооружения дорожной и автотранспортной служб;

тротуары, пешеходные и велосипедные дорожки;

автобусные остановки;

площадки отдыха и остановки;

снегозащитные полосы озеленения и декоративные насаждения;

здания и сооружения дорожного сервиса (АЗС, пункты питания, медицинского обслуживания, придорожные устройства связи, мотели и т.д.);

посты ГИБДД;

воздушные и подземные коммуникации (ЛЭП, ЛС, силовые и кабели связи, трубопроводы и т.д.).

При строительстве автомобильных дорог на ценных сельскохозяйственных угодьях (орошаемые земли, сады, виноградники и т.д.) запрещается устройство боковых резервов, карьеров и кавальеров. Поэтому когда не представляется возможным заложить в стороне от дороги сосредоточенные карьеры или резервы грунта, для отсыпки насыпи вдоль дороги закладывают на временно используемой полосе неглубокие притрассовые резервы, которые после строительства рекультивируют: выравнивают, вновь покрывают растительным грунтом и приводят в состояние, пригодное для использования в сельском хозяйстве (рис. 6.16).

В площадь полосы временного отвода входят также подлежащие возвращению прежним землепользователям после рекультивации площади, занимаемые во время строительства:

под временные дороги для обслуживания строительных работ, объезды при ремонтных работах и реконструкции дорог;

под резервы и карьеры грунта;

¹ Нормы отвода земель для автомобильных дорог (СН 467—74).



Р и с. 6.16. Схема приведения притрассовых резервов в состояние, пригодное для ведения сельскохозяйственных работ:

а — профиль с кюветами-резервами; *б* — мелкий резерв рядом с боковой канавой; *1* — размещение растительного грунта во время строительства дороги; *2* — расстояние, обеспечивающее нормальную работу землеройных машин; *3* — слой укладываемого обратно растительного грунта; *4* — слой растительного грунта, удаляемый перед возведением насыпи

для временного размещения удаленного растительного грунта;
 для временного размещения дорожно-строительных материалов;
 под временные здания и сооружения строительной организации
 и т.д.

Учитывая исключительную ценность занимаемых под постоянный отвод сельскохозяйственных и застроенных площадей, при проектировании всегда стремятся располагать все дорожные сооружения на придорожной полосе как можно более рационально, не занимая излишних площадей.

На полосе отвода нередко располагают сооружения и устройства, не имеющие прямого отношения к автомобильной дороге и принадлежащие другим организациям и ведомствам:

- воздушные линии связи;
- воздушные линии электропередач;
- подземные трубопроводы;
- подземные силовые кабели и кабели связи.

Эти сооружения размещают, как правило, как можно ближе к границе полосы отвода.

Усредненные площади отвода земель для строительства 1 км автомобильной дороги представлены в табл. 6.8.

Средняя ширина полосы отвода в зависимости от категории дороги лежит в пределах от 21 до 63 м на плодородных сельскохозяйственных угодьях и от 33 до 74 м — на землях, не пригодных для ведения сельского хозяйства.

При проектировании автомобильных дорог в состав проекта обязательно входит детальный план полосы отвода с указанием ее ширины на каждом конкретном участке дороги.

Таблица 6.8. Средние площади отвода земель, га, для строительства 1 км автомобильной дороги

Категория дороги	Число полос движения	Общая площадь полосы отвода на землях			
		сельскохозяйственного назначения		не пригодных для сельского хозяйства	
		Постоянный отвод	Временный отвод	Постоянный отвод	Временный отвод
I	8	6,3	1,8	7,4	2,3
	6	5,5	1,7	6,4	2,2
II	4	4,7	1,6	5,5	2,1
	4	4,5	1,6	5,3	2,1
	2	3,1	1,4	3,9	2,0
III	2	2,6	1,3	3,6	2,0
IV	2	2,4	1,3	3,5	2,0
V	2	2,1	1,2	3,3	2,0

Глава 7

ПРОДОЛЬНЫЙ ПРОФИЛЬ АВТОМОБИЛЬНЫХ ДОРОГ

7.1. Типы вертикальных кривых

Проектная линия продольного профиля обычно представляется сопряженными между собой в точках с одинаковыми продольными уклонами элементами: параболическими кривыми и прямыми. Возможные случаи сопряжения элементов продольного профиля между собой и схемы их оформления представлены на рис. 7.1.

Для аналитического расчета вертикальных кривых используют формулы (рис. 7.2):

расстояние от начала вертикальной кривой до ее вершины

$$l_0 = Ri; \quad (7.1)$$

превышение между точкой начала кривой и ее вершиной

$$h_0 = \frac{l_0^2}{2R}; \quad (7.2)$$

превышение h между точкой на произвольном расстоянии l от вершины и вершиной вертикальной кривой

Рис. 7.1. Схематическое изображение вертикальных кривых на чертеже продольного профиля:

a — выпуклая вертикальная кривая с восходящей и нисходящей ветвями; *b* — выпуклая кривая с нисходящей ветвью; *в* — вогнутая кривая с нисходящей и восходящей ветвями; *г* — вогнутая кривая с восходящей ветвью; *д* — сопряжение вертикальных кривых в точке с одинаковыми уклонами

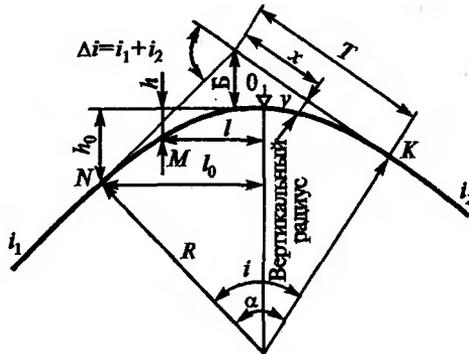
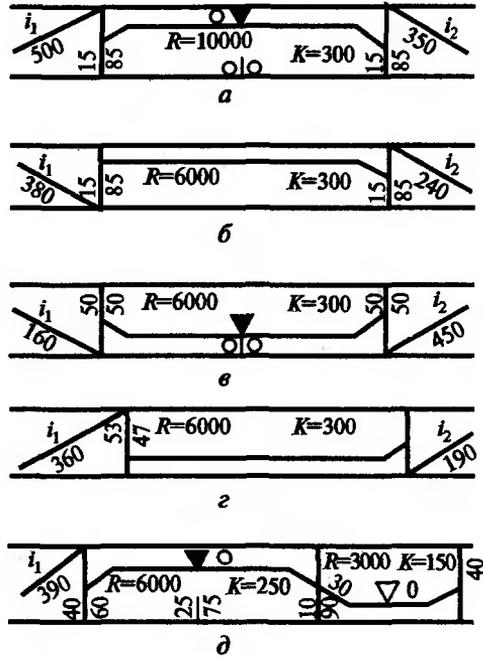


Рис. 7.2. Схема к разбивке вертикальных кривых

$$h = \frac{l^2}{2R}; \quad (7.3)$$

уклон в той же точке

$$i = \frac{l}{R}. \quad (7.4)$$

При использовании современных методов автоматизированного проектирования оптимального продольного профиля автомобиль-

ных дорог (например, метода «граничных итераций», см. § 19.7) в результате отказа от использования при проектировании продольного профиля традиционного класса функций (параболических вертикальных кривых и прямых), в котором ищется проектное решение при традиционном проектировании, проектная линия в общем случае на существенной части своего протяжения представляется кривыми переменного радиуса.

7.2. Нормирование продольных уклонов

Как следует из дифференциального уравнения тягового баланса автомобиля (3.3), при расчетной (нормированной) скорости движения автомобиля можно найти тот предельный продольный уклон, который может преодолеть автомобиль данной марки при полном открытии дроссельной заслонки (см. § 3.4).

Поскольку для дороги каждой категории в действующих нормативных документах (СНиП 2.05.02—85*) нормирована определенная (расчетная) скорость движения расчетного легкового автомобиля, то, исходя из вышеизложенного принципа, устанавливают и предельно допустимые продольные уклоны проектной линии продольного профиля для дорог разных категорий (табл. 7.1).

Т а б л и ц а 7.1. Допустимые значения продольных уклонов

Категория дороги	IA	IB	IV	II	III	IV	V
Расчетная скорость, км/ч	140	140	120	120	100	80	60
Допустимый продольный уклон, ‰	30	30	40	40	50	60	70

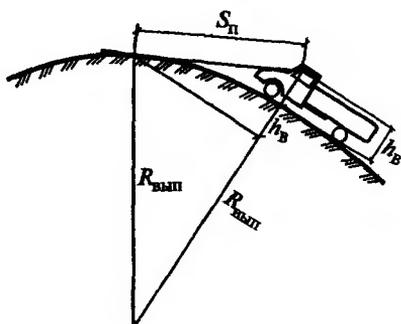
П р и м е ч а н и я: 1. В горной местности, за исключением мест с абсолютными отметками (геодезическими высотами) более 3000 м над уровнем моря, для участков протяженностью до 500 м допускается увеличение наибольших продольных уклонов, но не более чем на 20‰. 2. При проектировании в горной местности подходов дорог к тоннелям наибольшая допустимая величина продольного уклона не должна превышать 45‰ на протяжении 250 м от порталов тоннеля.

Во всех случаях, когда это не сопряжено с чрезмерным удорожанием строительных работ, следует, как правило, принимать величину продольного уклона не более 30‰.

7.3. Обоснование минимальных радиусов вертикальных кривых

Минимально допустимые величины радиусов вертикальных кривых (выпуклых и вогнутых) должны обеспечивать: видимость поверхности дороги S_n или встречного автомобиля S_B на выпуклых кривых,

Р и с. 7.3. Схема к расчету радиуса вертикальной выпуклой кривой из условия обеспечения расстояния видимости поверхности дороги $S_{\text{п}}$



видимость поверхности дороги в ночное время в свете фар и комфортабельность движения, исходя из самочувствия пассажиров и перегрузки подвески — на вогнутых.

Уравнение вертикальной параболической кривой в общем случае можно записать в виде:

$$h = \pm \frac{l^2}{2R}, \quad (7.5)$$

где h — превышение между вершиной кривой и точкой на расстоянии l от нее, принимаемое со знаком (+) для вогнутых кривых и (–) — для выпуклых; R — радиус вертикальной кривой.

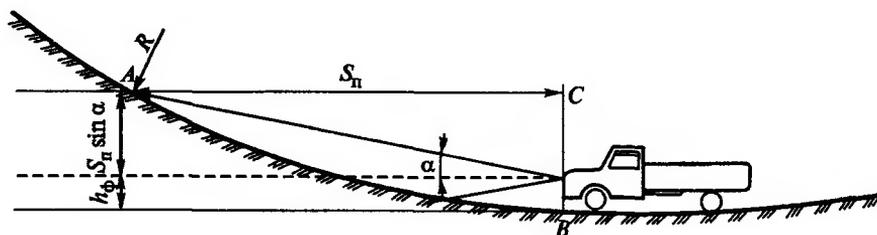
Если в уравнении (7.5) принять расстояние l , равным расчетному расстоянию видимости поверхности дороги $l = S_{\text{п}}$, а превышение h , возвышению глаз водителя над поверхностью дороги $h = h_{\text{в}}$, то минимальный радиус вертикальной выпуклой кривой $R_{\text{вып}}$ определится (рис. 7.3):

$$R_{\text{вып}} \geq \frac{S_{\text{п}}^2}{2h_{\text{в}}}, \quad (7.6)$$

где $S_{\text{п}}$ — расчетное расстояние видимости поверхности дороги, м, определяемое по уравнению (3.13) или по табл. 3.2 (см. гл. 3); $h_{\text{в}}$ — возвышение глаз водителя над поверхностью дороги, м.

Для легковых автомобилей принимают $h_{\text{в}} = 1,2$ м.

Для случая встречи двух однотипных автомобилей, пренебрегая разницей между уровнями глаз водителей и высотой автомобиля, можно принять $S_{\text{в}} \approx 2S_{\text{п}}$. Тогда минимальный радиус вертикальной выпуклой кривой из условия видимости встречного автомобиля определится:



Р и с. 7.4. Видимость поверхности покрытия в свете фар в ночное время

$$R_{\text{вып}} \geq \frac{l_{\text{в}}^2}{8h_{\text{в}}}. \quad (7.7)$$

На вертикальных вогнутых кривых малых радиусов движение автомобилей в ночное время осложняется в связи с тем, что свет фар освещает поверхность покрытия вблизи автомобиля на расстоянии меньшем, чем расчетное расстояние видимости поверхности дороги $S_{\text{п}}$ (рис. 7.4).

Согласно рис. 7.4, при угле распространения пучка света фар в вертикальной плоскости 2α верхняя граница освещенного участка покрытия возвышается на величину от передних колес автомобиля ($h_{\text{ф}} + S_{\text{п}} \sin \alpha$). Тогда, зная связь величины хорды и радиуса, можно записать

$$S_{\text{п}}^2 = 2R(h_{\text{ф}} + S_{\text{п}} \sin \alpha),$$

откуда минимальный радиус вертикальной вогнутой кривой:

$$R_{\text{вор}} = \frac{S_{\text{п}}^2}{2(h_{\text{ф}} + S_{\text{п}} \sin \alpha)}, \quad (7.8)$$

где $h_{\text{ф}}$ — высота фар над поверхностью дороги, м. Для легковых автомобилей принимают $h_{\text{ф}} = 0,7$ м; $S_{\text{п}}$ — расчетное расстояние видимости поверхности дороги, определяемое по уравнению (3.13), м.

Минимальные радиусы вертикальных вогнутых кривых, полученные из условия обеспечения расчетной видимости поверхности покрытия в ночное время, должны быть также проверены на обеспечение комфортабельности движения и допустимой перегрузки подвески. При движении автомобиля по вертикальной вогнутой кривой возникающее центробежное ускорение b вызывает появление цен-

тробежной силы, прижимающей автомобиль к покрытию. Тогда при известной нормируемой величине центростремительного ускорения

$$b = \frac{v^2}{R}$$

можно установить допустимую минимальную величину радиуса вертикальной вогнутой кривой по этому условию:

$$R_{\text{вог}} = \frac{v^2}{b}$$

Считается, что допустимой величиной центростремительного ускорения на вертикальных вогнутых кривых является $b = 0,5-0,7 \text{ м/с}^2$. Тогда, принимая в расчетах $b = 0,5 \text{ м/с}^2$, а скорость автомобиля v в км/ч, окончательно получим

$$R_{\text{вог}} = \frac{v^2}{6,5}, \quad (7.9)$$

где v — расчетная скорость движения автомобиля, км/ч.

Действующие в РФ нормы проектирования рекомендуют, если это возможно по условиям местности без сильного удорожания стоимости строительства, как правило, принимать в качестве основных параметров:

для автомагистралей, скоростных дорог и дорог обычного типа IV категории:

радиусы вертикальных кривых:

выпуклых — не менее 70 000 м;

вогнутых — не менее 8000 м;

длины кривых в продольном профиле:

выпуклых — не менее 300 м;

вогнутых — не менее 100 м;

для автомобильных кривых обычного типа, кроме дорог категории IV:

радиусы вертикальных кривых:

выпуклых — не менее 10 000 м;

вогнутых — не менее 3000 м;

длины кривых в продольном профиле:

выпуклых — не менее 300 м;

вогнутых — не менее 100 м.

Глава 8

НОРМЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ АВТОМОБИЛЬНЫХ ДОРОГ

8.1. История развития

Во всех странах мира изыскания, проектирование, строительство и эксплуатация автомобильных дорог осуществляют на базе использования развитой системы нормативно-технических документов, использующих последние достижения дорожной науки.

В России вопрос о необходимости создания нормативно-технической базы дорожного дела был положен сенатским Указом, подписанным Петром I 1 июня 1722 года, о начале строительства дороги Санкт-Петербург — Москва протяженностью 728 верст, сооружение которой было завершено в 1746 г.

Процесс создания, совершенствования и развития нормативно-технической базы дорожного строительства был неразрывно связан с развитием дорожной науки, обобщением опыта строительства и эксплуатации сначала гужевых, затем железных и, наконец, с появлением в конце XIX в. автомобиля, и автомобильных дорог. Тесная историческая связь железнодорожного строительства и строительства шоссейных дорог предопределила то, что конструированием, расчетами, проектированием и строительством шоссейных дорог и сооружений на них долгое время были заняты главным образом инженеры путей сообщений (железнодорожники), а начиная с конца XIX столетия Санкт-Петербургский институт инженеров путей сообщения начал готовить специалистов — инженеров строителей шоссейных дорог.

Если железнодорожная сеть России начала интенсивно развиваться в середине XIX — начале XX столетия, то сеть автомобильных дорог, предназначенных уже не только для гужевого, но и прежде всего для автомобильного транспорта, начинает интенсивно развиваться в годы первых пятилеток. Строительство сети автомобильных дорог послужило мощным толчком к развитию автодорожной науки и нормативно-технической базы проектирования, строительства и эксплуатации автомобильных дорог.

Первые «Технические условия проектирования и строительства дорог» (ТУ-1931) были разработаны в 1931 г. под руководством профессоров Г.Д. Дубелира и Н.Н. Иванова. Эти технические условия обобщили старый опыт строительства гужевых дорог и учли новый — необходимость обеспечения скоростного и безопасного движения автомобильного транспорта. В ТУ-1931 нашли отражение об-

щие требования к поперечному профилю автомобильных дорог с выделением проезжей части и обочин и определены основные конструктивные решения по устройству дорожных одежд с использованием местных дорожно-строительных материалов. Технические нормы ТУ-1931 отвечали требованиям автогужевых дорог с невысокой интенсивностью и скоростями движения при невысокой оснащенности дорожно-строительных организаций средствами механизации.

В начале второй пятилетки (1933—1937) взамен ТУ-1931 были введены в действие ТУ-1934, в основу которых были приняты ТУ-1931, но с учетом последних достижений дорожной науки и техники, в частности, даны конструкции дорожных одежд различных типов, в том числе усовершенствованных.

Индустриализация страны в годы первых пятилеток вызвала необходимость резкого увеличения объемов грузоперевозок автотранспортом, однако это сдерживалось недостаточной плотностью существующей автодорожной сети и невысокими транспортно-эксплуатационными качествами автогужевых дорог. Поэтому возникла острая необходимость в новом нормативном документе, на базе которого должна была осуществляться реконструкция существующей дорожной сети и строительство новой. Таким новым нормативным документом стали «Технические условия на сооружение автомобильных дорог и мостов» (ТУ-1938), которые принципиально отличались от ранее разработанных технических условий прежде всего тем, что в них впервые была дана классификация автомобильных дорог и сформулированы принципы отнесения их к различным техническим классам по основным техническим нормативам.

Ввод в действие технических условий ТУ-1938 был исключительным шагом вперед в деле совершенствования нормативно-технической базы дорожного строительства, в частности в этих нормах были представлены:

- новая техническая классификация автомобильных дорог;
- расчетные скорости движения легкового автомобиля для дорог разных классов;
- рекомендации и нормативные требования по земляному полотну;
- типы дорожных покрытий для дорог различных классов (переходные, усовершенствованные и капитальные);
- схемы пересечений автомобильных дорог между собой и с железными дорогами;
- нормативные требования по мостам.

Разработанные на основе ТУ-1938 «Технические условия и правила проектирования и постройки автомобильных дорог и искусствен-

ных сооружений» (ТУ-1939), которые были дополнены нормами ширины полосы отвода для всех пяти технических классов дорог, широко использовались вплоть до окончания Великой Отечественной войны, а также в первые послевоенные годы и в значительной степени повысили технический уровень дорожной сети того времени. Многие рекомендации и нормативы технических указаний ТУ-1939 близки современным дорожно-строительным нормативам.

Достижения проектно-изыскательских, научно-исследовательских и учебных институтов в последующие годы способствовали дальнейшему совершенствованию и пересмотру технических норм дорожного строительства. В итоге в СоюздорНИИ (под руководством канд. техн. наук Н.Ф. Хорошилова) и МАДИ (под руководством проф. В.Ф. Бабкова) были разработаны «Нормы и технические условия проектирования автомобильных дорог» (НиТУ 128—55), утвержденные Комитетом Совета Министров СССР по делам строительства в 1955 г.

В нормах НиТУ 128—55 были учтены все достижения дорожной науки тех лет, внесены существенные изменения в классификацию автомобильных дорог, нормированы величины ширины земляного полотна и наибольших продольных уклонов для дорог различных категорий, сделана привязка типов дорожных покрытий по категориям дорог. В нормах НиТУ 128—55 впервые была дана классификация типов местности по характеру и степени увлажнения, выполнено дорожно-климатическое районирование территории СССР (пять дорожно-климатических зон) и даны рекомендации по наименьшему возвышению бровки земляного полотна над уровнями грунтовых и длительно стоящих поверхностных вод в этих зонах. Нормы НиТУ 128—55 во многом явились основой современных нормативно-технических документов автодорожного строительства.

В 1962 г. Госстроем СССР были утверждены основные дорожные строительные нормы и правила: СНиП II-Д.5—62 «Автомобильные дороги общей сети. Нормы проектирования» и СНиП II-Д.7—62 «Мосты и трубы. Нормы проектирования». Разработанные на базе НиТУ 128—55 эти нормативные документы, кроме того, включили:

- новые обоснованные параметры поперечных профилей автомобильных дорог;

- новые значения возвышения низа дорожной одежды над уровнями грунтовых и поверхностных вод;

- рекомендуемые значения коэффициентов уплотнения грунтов насыпей и выемок, с учетом типа покрытия и дорожно-климатической зоны;

новые вертикальные временные нагрузки для расчета мостов и труб на автомобильных и городских дорогах (Н-30 и НК-80).

Параллельно в эти годы было разработано большое количество ведомственных строительных норм (ВСН) и строительных норм (СН), таких как: «Указания по обеспечению безопасности движения на автомобильных дорогах» (ВСН 39—67), «Указания по проектированию земляного полотна железных и автомобильных дорог» (СН 449—72), «Инструкция по устройству цементобетонных покрытий автомобильных дорог» (ВСН 139—68, ВСН 139—80), «Инструкция по проектированию дорожных одежд нежесткого типа» (ВСН 46—72, ВСН 46—83), «Указания по архитектурно-ландшафтному проектированию автомобильных дорог» (ВСН 18—74, ВСН 18—84) и т.д.

Взамен СНиП II-Д.5—62 и СНиП II-Д.7—62 в 1972 г. Госстроем СССР были утверждены СНиП II-Д.5—72 и СНиП II-Д.7—72, которые учли научные достижения десяти лет разработок, предшествовавших выходу в свет этих нормативных документов. И наконец, в 1984—1985 гг. взамен этих основных нормативов автодорожного строительства были утверждены строительные нормы и правила «Автомобильные дороги» СНиП 2.05.02—85 и «Мосты и трубы» СНиП 2.05.03—84 (действующие по настоящее время).

В СНиП 2.05.02—85 дана уточненная классификация автомобильных дорог в зависимости от расчетной интенсивности движения (не только в физических, но и в приведенных единицах) и их народно-хозяйственного и административного значения с подразделением на пять категорий, включена новая глава «Охрана окружающей природной среды», существенно уточнены и расширены разделы «Земляное полотно» и «Дорожные одежды», внесены изменения в разделы «Обустройство дорог и защитные дорожные сооружения» и «Здания и сооружения дорожной и автотранспортной служб».

В СНиП 2.05.03—84 впервые, наконец, были узаконены научные принципы расчета отверстий мостов (взамен ненаучных, умозрительных), такие как расчет общего размыва по уравнению баланса наносов (закон сохранения твердой фазы руслового потока), подпоры — по уравнению неравномерного движения жидкости (закон сохранения энергии потока), срезок — из условия их незаносимости в течение десятилетий и т.д.

В дополнение к этим нормативным документам в 2005 г. Федеральным агентством по техническому регулированию и метрологии РФ были утверждены два Государственных общероссийских стандарта: ГОСТ Р 52398—2005 «Классификация автомобильных дорог» и ГОСТ Р 52399—2005 «Геометрические элементы автомобильных дорог», в которых введены понятия классов автомобильных дорог (ав-

томагистрала, скоростные дороги и дороги обычного типа), введены новые технические характеристики классификационных признаков, в частности для дорог II категории предусмотрена возможность строительства не только двухполосных дорог с шириной полосы движения 3,75 м, но и четырехполосных с шириной одной полосы движения 3,5 м и с разделительной полосой шириной не менее 5,0 м, уточнены параметры элементов плана и продольного профиля и существенно уточнены параметры элементов поперечного профиля автомобильных дорог.

8.2. Современные нормы проектирования автомобильных дорог

Основными нормативными документами на проектирование автомобильных дорог и сооружений на них в настоящее время являются: строительные нормы и правила Российской Федерации (СНиП 2.05.02—85*, СНиП 2.05.03—84) и ГОСТ 12.001—93.СПДС. Система проектной документации в строительстве. Общие положения; ГОСТ 21.101—97 СПДС. Основные требования к проектной и к рабочей документации, разработанные в рамках системы нормативных документов в строительстве.

Указанные строительные нормы и правила распространяются на проектирование вновь строящихся и реконструируемых автомобильных дорог общего пользования и на подъездные дороги; не распространяются — на проектирование временных автомобильных дорог различного назначения (сроком службы менее 5 лет); автозимников; в лесозаготовительных, промышленных и сельскохозяйственных предприятиях; в карьерах.

Перечень основных действующих нормативных документов, используемых при проектировании автомобильных дорог, включает в себя нормативы по проектированию: земляного полотна автомобильных дорог, дорожных одежд, водоотвода и искусственных сооружений, а также по проектированию инженерных сооружений в сложных областях строительства, по методам испытаний грунтов и материалов, по проектированию автомобильных дорог в сложных инженерно-геологических условиях.

Кроме того, при проектировании используют документы, положения которых необходимо соблюдать для восстановления земельных участков, отводимых на период строительства, и для охраны окружающей среды.

В настоящее время существует следующая номенклатура стадий проектирования автомобильных дорог:

- обоснование инвестиций (ОИ);
- технико-экономическое обоснование (ТЭО);
- инженерный проект (ИП);
- рабочий проект (РП);
- проект (П);
- рабочая документация (РД).

В условиях рыночной экономики количество стадий проектирования, а значит, состав работ и проектно-сметной документации определяются не только категорией дороги, сроками строительства, инженерно-геологическими условиями, проработанностью и полнотой необходимой информации, но и сложностью объекта, объемом и порядком финансирования, техническими возможностями и т.д.

Во всех случаях принимаемые в проектах основные технические решения по трассированию дорог, по элементам плана, продольного профиля и поперечных профилей, конструкциям дорожных одежд и земляного полотна обосновываются разработкой вариантов с сопоставлением основных технико-экономических показателей:

- стоимость строительства;
- затраты на ремонт и содержание;
- потери, связанные с воздействием на окружающую природную среду;
- себестоимость перевозок;
- безопасность движения.

Проект дороги должен содержать весь комплекс конструктивных решений, технологических и организационных мероприятий, обеспечивающих безопасное движение автомобилей со скоростями, предусмотренными СНиП 2.05.02—85*.

8.3. Расчетные скорости и нагрузки

Для проектирования элементов плана, продольного и поперечных профилей, а также других элементов дороги необходимо знать *расчетную скорость* движения автотранспорта.

Под расчетной следует понимать наибольшую возможную скорость движения одиночного автомобиля по условиям обеспечения его устойчивости и безопасности при нормальных погодных условиях и обеспеченном сцеплении шин автомобиля с поверхностью проезжей части.

Расчетная скорость (км/час) регламентируется СНиП 2.05.02—85* в зависимости от категории и типа дороги (основная расчетная скорость), а также от сложности участков дороги (допускаемая расчетная скорость).

Основные расчетные и допускаемые скорости движения автомобилей приведены в табл. 8.1.

Таблица 8.1. Расчетные и допускаемые скорости движения автотранспорта

Категория дороги	Расчетные скорости, км/ч		
	Основные	допускаемые на трудных участках	
		пересеченной	горной
IA, IB	140	120	80
IV	120	100	60
II (4 полосы)	120	100	60
II (2 полосы)	100	80	50
III	100	80	50
IV	80	60	40
V	60	40	30

Примечания: 1. К трудным участкам пересеченной местности относят рельеф, прорезанный часто чередующимися глубокими долинами, с разницей отметок долин и водоразделов более 50 м на расстоянии не свыше 0,5 км, с боковыми глубокими балками и оврагами, с неустойчивыми склонами. К трудным участкам горной местности относят участки перевалов через горные хребты и участки горных ушей со сложными сильноизрезанными или неустойчивыми склонами. 2. При наличии вдоль трассы автомобильных дорог капитальных дорогостоящих сооружений и лесных массивов, а также в случаях пересечения дорогами земель, занятых особо ценными сельскохозяйственными культурами и садами, при соответствующем технико-экономическом обосновании допускается принимать расчетные скорости, устанавливаемые табл. 8.1 для трудных участков пересеченной местности.

При проектировании реконструкции автомобильных дорог, а также для участков дорог на трудных участках пересеченной местности, на подходах к крупным городам и застроенных территориях, ценных угодьях расчетная скорость движения может быть уменьшена при наличии технико-экономического обоснования на величину не более, чем указано в табл. 8.2.

Расчетные скорости на смежных участках автомобильных дорог не должны отличаться более чем на 20%.

Т а б л и ц а 8.2. Минимальные расчетные скорости на реконструируемых дорогах и трудных участках местности

Категория дороги	IA	IB	IV	II (4 полосы)	II (2 полосы)	III	IV	V
Наименьшая расчетная скорость, км/ч	100	90	80	80	70	70	60	40

При разработке проектов реконструкции автомобильных дорог по нормам IV и II категорий можно при соответствующем технико-экономическом обосновании сохранять элементы плана, продольного и поперечных профилей на отдельных участках существующих дорог, если они соответствуют расчетной скорости, установленной для дорог III категории, а по нормам III, IV категорий — соответственно на категорию ниже.

При проектировании подъездных автомобильных дорог к промышленным предприятиям по нормам IV и II категорий при наличии в составе движения более 70% грузовых автомобилей или при протяженности дороги менее 5 км можно принимать расчетные скорости, соответствующие дороге III категории.

Основные расчетные скорости относятся к участкам трассы, на которых геометрические характеристики являются руководящими.

Нагрузку на одиночную наиболее загруженную ось двухосного автомобиля для расчета прочности дорожных одежд, а также проверки устойчивости земляного полотна следует принимать для дорог:

I—II категорий	115 кН (11,5 тс)
III—IV категорий	100 кН (10 тс)
V категории	60 кН (6 тс)

8.4. Категория автомобильных дорог

Категорию проектируемой дороги устанавливают с учетом социально-экономического значения дороги и расчетной интенсивности движения на двадцатилетнюю перспективу при разработке обоснования инвестиций в строительство (ОИ) или технико-экономического обоснования (ТЭО).

Принадлежность автомобильной дороги к одной из групп по социально-экономическому значению определяют федеральный или

территориальные органы государственного управления автомобильными дорогами в установленном порядке. Категорию проектируемой автомобильной дороги устанавливают по табл. 8.3.

Таблица 8.3. Классификационные признаки и категории автомобильных дорог

Экономическое значение автомобильной дороги	Класс дороги	Категория дороги	Расчетное значение интенсивности движения	
			трансп. ед/сут	привед.ед/сут
Связь столицы Российской Федерации с административными центрами страны, международные маршруты, подъезды к аэропортам, морским и речным портам, связь между крупными и крупнейшими городами, пригородные участки этих городов	Автомостраль	IA	Более 10 000	Более 16 000
	Скоростная дорога	IB	Более 9 000	14 000
	Автомобильная дорога обычного типа	IV	Более 8000	12 000
		II (4 полосы)	Более 6000	10 000
II (2 полосы)		Более 4000	7000	
	III	Менее 4000	Менее 7000	
Связь между областными центрами	Скоростная дорога	IB	Более 8000	12 000
		IV	Более 7000	11 000
	Автомобильная дорога обычного типа	II (4 полосы)	Более 5000	10 000
		II (2 полосы)	Более 4000	7000
	III	Менее 4000	Менее 7000	
Связь между районными центрами, автомобильные дороги местного значения	Автомобильная дорога обычного типа	III	Более 1500	Более 2500
		IV	Более 200	Более 300
		V	Менее 200	Менее 300

8.5. Мероприятия по охране окружающей среды

При изысканиях, проектировании, строительстве и эксплуатации автомобильных дорог и сооружений на них действующие нормативные документы предусматривают обязательное выполнение комплекса мероприятий по охране окружающей среды и здоровья населения, по рациональному использованию и воспроизводству природных ресурсов.

При сравнении вариантов размещения трассы автомобильной дороги учитывают возникающие при этом перераспределение движения по участкам существующей сети автомобильных дорог и измене-

ние экологической нагрузки на звенья этой сети. В первую очередь эти факторы рассматривают при проектировании обходов населенных пунктов, улучшении плана и продольного профиля дорог при реконструкции, улучшении транспортно-эксплуатационных качеств дорог при капитальных ремонтах. При технико-экономическом сравнении вариантов учитывают затраты на осуществление природоохранных мероприятий, компенсацию экологического и иного ущерба, а также учитывают факторы, не поддающиеся стоимостной оценке.

Трассы вновь проектируемых дорог прокладывают с учетом экологической значимости природных объектов по наименее ценным земельным угодьям, по возможности по границам ландшафтов, полей севооборота или границам хозяйств.

Оценку воздействия строительства автомобильной дороги на окружающую среду (далее ОВОС) и государственную экологическую экспертизу, как правило, производят уже на стадии разработки предпроектной документации. При ОВОС определяют вероятные источники и факторы влияния дороги и сооружений на ней на окружающую среду, возможные последствия воздействия этих источников и факторов, разрабатывают с учетом мнения заинтересованных ведомств, организаций и общественных групп меры по уменьшению и предотвращению неблагоприятных воздействий на окружающую природную среду и связанных с ними социальных, экономических и иных последствий реализации проекта.

При ОВОС строительства автомобильной дороги, как правило, в первую очередь следует рассматривать воздействия следующих источников и факторов влияния на окружающую среду, связанных со строительством и эксплуатацией автомобильной дороги и сооружений на них:

воздействие автомобильного транспорта, в том числе загрязнение воздушной среды продуктами сгорания топлива при движении транспортных средств, загрязнение почв, в том числе соединениями тяжелых металлов, шумовое воздействие от движущегося автотранспорта, загрязнение придорожной полосы бытовым мусором, воздействие на растительность и животный мир движущегося автотранспорта, влияние движения автомобильного транспорта на условия жизни населения в придорожной полосе, изменение количества и тяжести дорожно-транспортных происшествий, вибрации зданий и сооружений;

воздействия автомобильной дороги как инженерного сооружения, в том числе расчленение в результате строительства или реконструкции дороги ценных ландшафтов, лесных и сельскохозяйственных угодий, отрицательное влияние на места массового обитания и размножения диких животных, птиц, обитателей водной среды, на сло-

жившиеся пути миграции животных, воздействие на водоохранные, рекреационные и селитебные зоны, природные феномены, переформирование рельефа, образование камнепадов, возникновение оползней, осыпей, сплывов, других видов подвижек земляных масс вследствие их подрезки в процессе строительных работ, изменение условий поверхностного водного стока, воздействия, вызывающие эрозию почв вследствие концентрации водных потоков водопрпускными дорожными сооружениями, кюветами и канавами, вызывающие изменение уровня режима грунтовых вод, осушение, обводнение и переувлажнение почв, изменение гидрологического режима болот, приводящее к негативному влиянию на экосистемы, изменение термического режима вечной мерзлоты, изменение условий землепользования, изъятие и возврат в хозяйственный оборот земель, а также плодородного слоя почвы, необходимость сноса зданий и сооружений, переселения людей, связанного со строительством автомобильной дороги, возможное нарушение памятников природы, истории и культуры, включая археологические памятники;

воздействие автомобильной дороги как элемента инфраструктуры, в том числе нарушение путей сообщения местных жителей, изменение условий их связи с культурными и административными центрами, увеличение потребного времени на дорогу к местам работы и отдыха, ухудшение условий движения для сельскохозяйственной техники, гужевого транспорта, пешеходов, велосипедистов, прогона скота, условий развития экономики в районе тяготения дороги, конкурентоспособности местной продукции, изменение занятости населения, нарушение среды проживания малых народов, изменение условий медицинского обслуживания;

технологические воздействия в период строительства автомобильной дороги, в том числе загрязнение воздушной среды, почв, водной среды продуктами сгорания топлива и производственным шумом при движении дорожных машин и работе асфальтобетонных, цементобетонных заводов и других дорожно-строительной техники и предприятий (АБЗ, ЦБЗ и т.д.), загрязнение территорий вблизи временных баз строительных организаций мусором, бытовыми отходами, изменение водного и руслового режимов в местах строительства;

технологические воздействия при эксплуатации автомобильной дороги, в том числе загрязнение воздушной среды, почв, вод при работе дорожно-эксплуатационной техники, предприятий дорожно-эксплуатационной службы и хранении материалов, используемых при содержании автомобильных дорог и дорожных сооружений, за-

грязнение почв и вод противогололедными реагентами и при ликвидации нежелательной растительности.

Комплекс технических решений по предупреждению и снижению негативного влияния автомобильной дороги и дорожных сооружений на окружающую среду, предложений по рациональному использованию природных ресурсов в строительстве в состав проектной документации должен обязательно входить раздел «Охрана окружающей среды».

При наличии в зоне строительства охраняемых памятников истории и культуры (старинные постройки, захоронения, археологические объекты, объекты особого отношения местного населения и т.д.), а также уникальных природных феноменов (особые геологические формы, водные источники, реликтовые деревья и т.д.) в проектах предусматривают специальные инженерные решения по защите указанных объектов.

Проекты автомобильных дорог, зданий и сооружений дорожной и автотранспортной службы, входящих в дорожный комплекс, должны обеспечивать сочетание их внешнего оформления с окружающим ландшафтом.

При строительстве автомобильных дорог, предназначенных для обслуживания транзитного движения, в рекреационных местах, вблизи расположения курортов, домов отдыха, пансионатов, пионерских лагерей и других учреждений лечения и отдыха в пределах установленных вокруг них санитарных зон, в проектах предусматривают необходимые защитные мероприятия. Автомобильные дороги, предназначенные главным образом только для местного движения и обслуживания вышеуказанных объектов, проектируют с наименьшим воздействием на функционирование этих лечебно-оздоровительных объектов.

Вновь проектируемые дороги I—III категорий, как правило, трассируют в обход населенных пунктов по возможности с подветренной стороны (по отношению к ветрам преобладающего направления) с устройством подъездов к ним. Для обеспечения последующей реконструкции дорог расстояние от бровки земляного полотна до линии застройки населенных пунктов принимают в соответствии с генеральными планами их развития.

В случае необходимости прохождения дорог I—III категорий через населенные пункты их проектируют в соответствии с требованиями СНиП 2.07.01—89*. «Градостроительство. Планировка в застройках городских и сельских поселений» и действующих санитарных норм.

В целях уменьшения согласно действующим нормативным актам вредного влияния автомобильной дороги на окружающую среду в проектах предусматривают технические решения, обеспечивающие соответствующие режимы движения автомобилей, а при необходимости предусматривают строительство защитных сооружений, таких как экраны, ограждения, валы, древесно-кустарниковые насаждения и т.д. Проектирование природоохранных защитных сооружений осуществляют на основе прогнозирования распространения вредных транспортных воздействий при неблагоприятном сочетании влияющих факторов (погодные условия, изменение интенсивности движения на 10-летнюю перспективу и т.д.).

При пересечении трассой сложившихся путей миграции животных на дорогах I—III категорий предусматривают строительство специальных сооружений (ограждения, переходы и пропускные сооружения, скотопрогоны и т.д.). На дорогах остальных категорий допускают применение организационных мероприятий по ограничению режима, скорости и времени движения дорожными знаками и иными средствами организации и регулирования движения.

При строительстве или реконструкции дорог и мостовых переходов на территориях рыбохозяйственных водоемов и водотоков в проектах предусматривают мероприятия по сохранению рыбных запасов.

На землях, нарушаемых при строительстве автомобильных дорог, предусматривают снятие плодородного слоя почвы и складирование его в штабеля в отведенных проектом местах. Глубину снятия плодородного слоя назначают по данным изысканий и технических условий владельцев и пользователей земель. Плодородный почвенный грунт используют для укрепления земляного полотна и дорожных сооружений, а также при рекультивации нарушенных при строительстве земель. Излишний объем плодородного почвенного грунта используется для повышения плодородия малопродуктивных угодий.

Все земельные участки, отведенные во временное пользование для нужд строительства дороги, по окончании строительства должны быть приведены в состояние, пригодное для дальнейшего использования с учетом технических условий владельцев и пользователей земель. Излишний, не используемый для нужд строительства грунт применяют для засыпки верхней части оврагов, эрозионных промоин, свалок и других неудобных земель с последующим уплотнением и планировкой поверхности. В проектах предусматривают мероприятия по предотвращению размыва уложенного грунта.

При трассировании дорог по высокопродуктивным пахотным, орошаемым, осушаемым или иным ценным угодьям в целях сокращения площадей отвода земель земляное полотно, как правило, проектируют без устройства кюветов, резервов и кавальеров.

При назначении конструктивных решений земляного полотна, водоотводных и водопропускных сооружений обеспечивают защиту угодий от размыва и заиления, заболачивания, нарушения растительного и дернового покрова, нарушения гидрологического режима водотоков и естественного уровня грунтовых вод.

При проектировании земляного полотна дорог не допускают изменения уровней грунтовых вод в лесах, водоемах, сельскохозяйственных и водно-болотных угодьях. Для предотвращения изменения уровня грунтовых вод, осушения и переувлажнения почв, как правило, отказываются от устройства выемок.

При проектировании насыпей через болота с поперечным по отношению к трассе дороги движением воды в водонасыщенном горизонте в проектах предусматривают мероприятия, исключающие изменение режима болота путем отсыпки насыпи или ее нижней части из дренирующих материалов, устройство вдоль земляного полотна продольных канав и, если это необходимо, водопропускных сооружений и т.д.

На дорогах в пределах водоохраных зон предусматривают организованный сбор воды с поверхности проезжей части с последующей ее очисткой или отводом в места, исключающие загрязнение источников водоснабжения. Качество сбросов в водоемы должно удовлетворять установленным требованиям.

При необходимости прохождения дорог через населенные пункты предусматривают покрытия дорожных одежд и типы укрепления обочин, исключающие пылеобразование. На остальных участках дорог с переходными и низшими типами покрытий предусматривают обработку покрытий обеспыливающими веществами, а при необходимости защитные мероприятия, ограничивающие ширину запыленной зоны.

Для предотвращения загрязнения полосы отвода автомобильных дорог бытовым мусором при необходимости в проектах предусматривают площадки, оборудованные контейнерами для мусора. Места установки туалетов и контейнеров для мусора, обычно, совмещают с площадками отдыха и предприятиями дорожного сервиса.

При трассировании дорог в хвойных лесах на сухих почвах по согласованию с органами лесного хозяйства предусматривают за грани-

цами полосы отвода противопожарные полосы шириной в соответствии с правилами пожарной безопасности в лесах РФ.

Выбор материалов для строительства, ремонта и содержания дороги производят с учетом прямого и косвенного влияния на экологическую обстановку как в период строительства, так и эксплуатации дороги. Состав и свойства применяемых материалов должны соответствовать государственным стандартам, техническим условиям и нормам.

Применение отходов производства осуществляют с учетом их возможной токсичности и радиоактивности. Производственные базы, здания и сооружения дорожно-эксплуатационной службы и дорожного сервиса, временные базы строительных организаций размещают с подветренной стороны (для ветров преобладающего направления) по отношению к селитебным территориям.

Раздел второй

ПОНЯТИЕ О СОВРЕМЕННОЙ ТЕХНОЛОГИИ ПРОИЗВОДСТВА ПРОЕКТНЫХ РАБОТ

Глава 9

ПРИНЦИПИАЛЬНЫЕ ОСНОВЫ ПОСТРОЕНИЯ СИСТЕМ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ АВТОМОБИЛЬНЫХ ДОРОГ И СООРУЖЕНИЙ НА НИХ (САПР-АД)

9.1. Понятие о системах автоматизированного проектирования (САПР)

Накопленный в настоящее время зарубежный и отечественный опыт показывает, что применение компьютерной техники и математических методов при проектировании существенно повышает технический уровень и качество проектируемых объектов при заметном снижении сметной стоимости строительства и существенном сокращении сроков разработки проектов при одновременном повышении качества проектно-сметной документации. Автоматизированное проектирование оказывается особенно эффективным, когда от отдельных компьютерных расчетов переходят к разработке и использованию систем автоматизированного проектирования, в которых уже взаимосвязаны все стадии проектно-исследовательских работ, начиная с этапа сбора, обработки и представления исходной для проектирования информации и кончая оформлением проектно-сметной документации.

Система автоматизированного проектирования (САПР) — это организационно-техническая система, состоящая из комплекса средств автоматизации проектирования, взаимосвязанного с подразделениями проектной организации, и выполняющая автоматизированное проектирование.

Следует различать проектирование автоматическое и автоматизированное. При *автоматическом* проектировании процесс получения, преобразования, передачи информации, формирования управляю-

щих команд осуществляется автоматически без участия инженера-проектировщика. Однако в этом случае проектировщик принимает участие в главных этапах проектного процесса: на этапе подготовки задания на проектирование и на этапе оценки полученного проектного решения, с последующей возможной его корректировкой. При *автоматизированном* проектировании инженер-проектировщик непосредственно участвует и в процессе выработки проектных решений, направляя проектный процесс по нужному руслу.

Главный эффект от применения САПР возникает в результате автоматизации различных творческих функций человека на ранних стадиях разработки проекта, когда вырабатываются самые принципиальные решения (например, выбор общего направления трассы автомобильной дороги, установление положения проектной линии продольного профиля и т.д.). Творческий процесс создания инженером-проектировщиком с помощью технических средств САПР математической модели объекта строительства, оперативный анализ в ходе этого процесса достоинств и недостатков модели определяют качественно новую ситуацию в проектировании: инженер-проектировщик в ходе диалога с компьютером всесторонне анализирует большое число вариантов, осуществляет оптимизацию проектных решений, моделирует поведение проектируемого объекта или отдельных его элементов во времени и пространстве и в конечном итоге выбирает наилучший вариант для последующей детальной проработки и строительства.

САПР — это принципиально новая организационно-техническая система, основу которой составляют компоненты: методического, программного, информационного, технического и организационного обеспечения. Проектирование на уровне САПР предусматривает фундаментальную перестройку всего проектно-изыскательского процесса: радикальное изменение состава и знаний инженерно-технического персонала, изменение существующей структуры проектно-изыскательских институтов и технологии изысканий и проектирования.

Функциями САПР являются разработка и выпуск проектно-сметной документации, обладающей уровнем качества, недостижимым средствами традиционного (неавтоматизированного) проектирования.

Коренное отличие системного проектирования от эпизодического использования компьютера при традиционном проектировании заключается в том, что все подсистемы САПР взаимосвязаны и результаты проектных проработок по одной из подсистем непосредственно используются в виде исходной информации для последующего

проектирования с помощью другой подсистемы без промежуточной обработки результатов. Эти результаты, кроме того, выдаются на экран монитора и могут непосредственно корректироваться инженером-проектировщиком. Таким образом осуществляется диалог инженера с компьютером.

Целью создания САПР являются:

повышение качества объектов проектирования. Например, разработка проектов автомобильных дорог, имеющих зрительно плавную и ясную трассу, органически вписывающуюся в окружающий ландшафт и обогащающая его, обеспечивающую наилучшие транспортно-эксплуатационные показатели (уровни удобства и безопасность движения, скорости движения, время сообщения, пропускную способность и т.д.);

снижение материалоемкости и стоимости строительства объектов. Материалоемкость проектных решений и строительная стоимость автомобильных дорог при системном автоматизированном проектировании оказываются на 10—15% (а иногда и более) ниже соответствующих показателей при использовании традиционных методов и технологий;

сокращение сроков проектирования, трудовых затрат и повышение качества проектно-сметной документации. При системном автоматизированном проектировании сроки проектно-изыскательского цикла (с соответствующим ростом производительности труда) сокращаются в среднем на 20—25% и более. Подготовка проектно-сметной документации с использованием соответствующих средств автоматизации обеспечивает оформление проекта (пояснительных записок, смет и чертежей) с качеством, недостижимом при традиционной технологии.

При автоматизированном проектировании на уровне САПР наибольшего экономического эффекта достигают в связи с повышением качества объекта проектирования и снижением материалоемкости и сметной стоимости строительства. Экономический эффект при проектировании с использованием САПР обеспечивают следующие факторы:

системное использование средств автоматизированного проектирования. Результаты проектирования по одной из подсистем САПР автоматически используются в качестве исходной информации для последующего этапа автоматизированного проектирования без трудоемкой ручной переподготовки, определяющей к тому же большое количество неизбежных ошибок. Использование САПР автоматизирует трудоемкие и рутинные операции традиционной технологии (подготовка пояснительных записок, чертежей, смет, расчетов и т.д.);

создание принципиально новой технологии производства проектно-изыскательских работ. Проектирование на уровне САПР предполагает использование качественно отличной технологии выполнения проектно-изыскательских работ, характеризующейся системностью, комплексностью, широтой охвата и исключительной глубиной проработки;

повышение специализации труда. Опыт системного автоматизированного проектирования убеждает в необходимости разделения функций изысканий и проектирования между специализированными, оснащенными соответствующим современным оборудованием, изыскательскими и проектными организациями, а также в разделении функций проектирования между узкими специалистами по проектированию: плана трассы, земляного полотна, дорожных одежд, малых водопропускных сооружений, мостовых переходов, транспортных развязок движения и т.д. Структура проектно-изыскательских институтов, определенная старой технологией производства проектно-изыскательских работ, должна быть существенно реорганизована;

совершенствование методов управления процессами проектирования;

внедрение математических методов оптимизации проектных решений. Использование оптимизирующих алгоритмов, реализация которых при ручном проектировании в связи с их многодельностью практически исключена, позволяет заметно снижать материалоемкость и стоимость основных проектных решений (земляного полотна, дорожных одежд, водопропускных сооружений и т.д.);

внедрение методов математического моделирования. Использование методов математического моделирования, реализация которых при ручном проектировании немислива, позволяет моделировать поведение проектируемого объекта во времени и пространстве (моделирование работы мостовых переходов, малых водопропускных сооружений, моделирование объектов проектирования, моделирование транспортных потоков и т.д.), что существенно повышает качество принимаемых проектных решений;

многовариантность проработки основных проектных решений. Элементы автомобильных дорог, для которых в настоящее время не представляется возможным аналитически находить экстремальные значения целевых функций или целевых функционалов, в САПР проектируются многовариантно, что позволяет находить проектные решения, приближающиеся к оптимальным.

9.2. Средства обеспечения САПР

С начала 80-х гг. XX века, когда началось массовое производство и внедрение персональных компьютеров, идея системной автоматизации процесса проектирования стала практически осуществимой для проектных организаций любого масштаба: от крупных проектных институтов до относительно небольших частных проектно-исследовательских фирм. Реально произошел процесс перехода от использования в автоматическом режиме отдельных автономных прикладных программ к созданию крупных объектно-ориентированных программных систем, предназначенных для комплексного выполнения проектных работ. В результате сложилось новое представление о системах автоматизированного проектирования, как об организационно-технических системах, основу которых составляют компоненты методического, программного, информационного, технического и организационного обеспечения (рис. 9.1).

Компоненты САПР — это элементы средств обеспечения, выполняющих определенные функции.

Компонентами *методического обеспечения* являются документы, в которых полностью или со ссылками на первоисточники изложены методы, теория, способы, математические модели, алгоритмы, алгоритмические специальные языки для описания объектов, терминология, нормативы и другие данные, обеспечивающие методологию проектирования в САПР.

Теория и методы проектирования автомобильных дорог и сооружений на них в последние десятилетия получили большое развитие именно в связи с переходом на системное автоматизированное проектирование, которое позволяет на качественно более высоком уровне реализовать основные вопросы проектирования автомобильных дорог (проектирование плана трассы, продольного профиля, земляного полотна, дорожных одежд, малых водопропускных сооружений, мостовых переходов, развязок движения), а также оценки проектных решений. Монографии, справочники, учебники, учебные пособия, труды институтов, журнальные статьи и другие издания, где изложе-



Р и с. 9.1. Виды обеспечения систем автоматизированного проектирования

ны теория и методы автоматизированного проектирования автомобильных дорог, составляют фундамент методического обеспечения САПР.

Методы решения конкретных задач проектирования автомобильных дорог выражают однозначно в виде, удобном для реализации на компьютерах, т.е. представляют в виде алгоритмов.

Алгоритм — это последовательность вычислительных и логических операций, по которым можно определять значения искомых величин при заданных значениях исходных. Алгоритмы обладают следующими свойствами: определенностью, т.е. конкретностью описания последовательности процедур; общепонятностью, при которой вычисления может произвести любой человек, знающий элементарную алгебру; массовостью, т.е. возможностью использовать любые исходные данные, принадлежащие определенному множеству, с получением искомых результатов.

Алгоритм отличается от метода большим совершенством и определенностью, а также формой написания, максимально приспособленной для реализации на компьютере. Для этого используют алгоритмические языки программирования, понятные инженеру и компьютеру.

Алгоритмы решения конкретных задач проектирования автомобильных дорог, содержащиеся обычно в программной документации, составляют вторую часть методического обеспечения САПР.

Проектирование автомобильных дорог и сооружений на них всегда осуществляется в соответствии с действующими нормативными документами, к которым относятся: государственные общероссийские стандарты (ГОСТ), стандарты отрасли (ОСТ), отраслевые дорожные нормы (ОДН), ведомственные строительные нормы (ВСН), общероссийские строительные нормы, инструкции, указания и правила (СН), строительные нормы и правила (СНиП), пособия к СНиПам, своды правил по изысканиям и проектированию (СП), руководящие документы системы (РДС, РСН) и разного рода методические указания и рекомендации.

Нормативно-методическая документация составляет третью часть методического обеспечения САПР.

По мере развития науки и технического прогресса непрерывно видоизменяются и совершенствуются методы и технологии проектирования автомобильных дорог, появляются новые методы изысканий и проектирования, новые алгоритмы и программы, совершенствуются и обновляются нормативно-методические документы. В связи с этим на методическое обеспечение САПР нельзя смотреть как на нечто раз и навсегда определенное. Методическое обеспечение в ходе

эксплуатации САПР непрерывно видоизменяется в соответствии с развитием научно-технического прогресса.

Компонентами *программного обеспечения* САПР являются документы с текстами программ, сами программы на машинных носителях информации и эксплуатационные документы, обеспечивающие функционирование системы.

Программа — это последовательность команд, написанных в кодах компьютера и дающих ему точное задание для всех этапов цикла обработки данных. *Подпрограмма* — это завершенная часть программы, которая не может, однако, функционировать как самостоятельная, а только лишь будучи включенной в основную программу или другую подпрограмму.

Программное обеспечение САПР подразделяют на общесистемное и прикладное.

Общесистемное программное обеспечение представлено различными операционными системами (ДОС, ОС, Windows 2000, Windows XP Professional и т.д.), которые управляют всеми процессами, происходящими в компьютерах, трансляторами (переводчиками программ с алгоритмических языков программирования), супервизорами (автоматическими диспетчерами) и т.д.

Компонентами *прикладного программного обеспечения* являются пакеты прикладных программ и системы прикладных программ, предназначенные для получения конкретных проектных решений. *Пакет прикладных программ (ППП)* — это несколько связанных между собой вычислительных программ для решения определенной проектной задачи, когда ввод и вывод данных каждой отдельной программы должны быть согласованы с остальными программами пакета. *Системы прикладных программ (СПП)*, составляющие основу технологических линий проектирования САПР, формируются таким образом, что связь между отдельными программами осуществляется через данные промежуточных результатов, когда результаты расчета по одной программе автоматически используются в качестве исходной информации для расчета по другой.

Технологическая линия проектирования (ТЛП) — это связанная проектно-технологическая фаза обработки главных этапов проектирования с использованием системы прикладных программ и других вспомогательных средств автоматизированного проектирования с обеспечением возможности контроля и изменения данных. ТЛП — это система с вполне определенной рациональной последовательностью выполнения конструкторских, расчетных, машинописных, чертежных, множительных и других работ, подобная конвейеру.

Компонентами *информационного обеспечения САПР* являются документы, содержащие описание стандартных проектных процедур, типовых проектных решений, типовых элементов, комплектовующих изделий, материалов и другие данные, а также массивы и базы данных на машинных носителях информации с записью указанных документов, обеспечивающие функционирование САПР.

К информационному обеспечению САПР-АД относят прежде всего типовые проектные решения по земляному полотну, дорожной одежде, конструкциям пролетных строений, опор мостов и путепроводов, водопропускным трубам, подпорным стенкам, укреплениям, обстановке и принадлежностям дороги, зданиям и сооружениям службы эксплуатации и т.д. Вся информация о типовых проектных решениях хранится в долговременной памяти компьютеров, к которым обеспечен оперативный доступ в ходе системного автоматизированного проектирования.

Типовые проекты постоянно совершенствуются, обновляются, разрабатываются новые. Все это требует систематического обновления и расширения информационной базы САПР.

Компонентами *технического обеспечения САПР* являются устройства вычислительной и организационной техники, средства передачи информации, измерительные и другие устройства или их сочетания, обеспечивающие функционирование САПР.

Создание комплекса технических средств САПР связано с необходимостью выполнения ряда противоречивых требований, которые включают:

быстрое освоение имеющегося парка вычислительной техники. Моральное старение вычислительной техники требует полной ее замены на принципиально новые более совершенные модели в среднем каждые 5—7 лет, что требует соответствующей организационной перестройки без остановки функционирования САПР;

увязку прикладного программного обеспечения с общесистемным;

обеспечение постоянного быстрого доступа инженера-проектировщика к компьютерам и другим средствам автоматизации;

повышение эффективности и качества проектирования, без чего реализация проектирования на уровне САПР становится бессмысленной.

Техническое обеспечение САПР представляет собой совокупность компьютеров, периферийных устройств и средств связи.

Компьютеры — это современная мощная персональная вычислительная техника типа PC IT, обладающая огромной оперативной и внешней памятью, а также быстродействием. Современные компакт-

ные компьютеры «Ноутбуки» часто объединяют в одном устройстве кроме собственно компьютера ряд других необходимых периферийных устройств: дисплеи, клавиатуры, манипуляторы, устройства ввода с дискеток и дисков. Кроме того, они имеют набор интерфейсов для быстрого и простого подключения принтеров, плоттеров и других средств автоматизации, используемых при системном автоматизированном проектировании.

Периферийное оборудование включает в себя три группы устройств: устройства ввода и вывода информации, объединенные или связанные каналами связи с центральным процессором; дисплеи; плоттеры; принтеры; клавиатуры; манипуляторы и т.д.;

устройства сбора, регистрации и обработки данных, не связанные с центральным процессором или периодически подключаемые к нему: аэро- и наземное стереосъемочное, стереофотограмметрическое оборудование; геодезическое оборудование для сбора топографической и других видов информации о местности (электронные теодолиты, электронные и компьютерные тахеометры, регистрирующие нивелиры, лазерные дальнометры, наземные устройства систем спутниковой навигации «GPS», геодезические лазерные сканеры и т.д.); инженерно-геологическое и геофизическое оборудование для инженерно-геологической разведки и т.д.;

обслуживающие устройства: хранилища, бумагорезательные, копировальные машины, переплетные мастерские и т.д.

Средства связи — это устройства, обеспечивающие связь между компьютерами, а также между компьютерами и периферийными устройствами, телефонная, телефаксная, радио- и другие виды связи между пользователями и компьютерами, электронная почта и т.д.

Компонентами *организационного обеспечения САПР* являются методические и руководящие материалы, положения, инструкции, приказы, штатные расписания, квалификационные требования и другие документы, обеспечивающие взаимодействие подразделений проектной организации или фирмы при создании, эксплуатации и развитии САПР.

Общие вопросы организации при создании, эксплуатации и развитии САПР регламентируются общеотраслевыми руководящими материалами (ОРММ) по созданию систем автоматизированного проектирования. Частные вопросы организации системного проектирования решаются в рамках конкретной проектной организации либо фирмы, являющейся разработчиком либо эксплуатирующей САПР.

9.3. Функциональная структура САПР

Создание САПР требует разработки комплекса математического обеспечения и средств автоматизации, которые, с одной стороны, позволяют полностью автоматизировать процесс конструкторского, расчетного и чертежно-графического решения проектных задач с использованием математического аппарата оптимизации и моделирования, ввода информации, обработки данных и т.д. и, с другой, оставляет за инженером проектировщиком право оперативного вмешательства в процесс проектирования, корректировать его результаты и менять исходные данные, последовательность и состав проектных работ. Общие принципы функционирования САПР состоят в следующем.

1. *Принцип соответствия автоматизированных функций проектирования требованиям набора запросов пользователя.*

Основным режимом функционирования САПР является автоматизированное решение проектных задач, при котором происходит обязательное чередование функций автоматического проектирования с функциями, выполняемыми инженером-проектировщиком по подготовке заданий, по визуальному логическому контролю и принятию окончательных решений. Как показывает уже накопленный опыт системного автоматизированного проектирования, даже незначительное ущемление возможностей инженера-проектировщика оперативно вмешиваться в процесс автоматизированного проектирования сильно снижает эффективность функционирования всей системы — возникают аварийные ситуации в связи с потерей информации, потери времени при длительной обработке сложных пакетов программ с незамеченной в начале счета ошибкой в исходных данных, получение явно непригодных по каким-либо показателям законченных проектных решений и т.д.

В САПР инженер-проектировщик является основным звеном, на плечи которого ложатся определяющие функции процесса автоматизированного проектирования: выбор исходных параметров для проектируемого объекта; анализ, контроль и подготовка исходной информации для проектирования; принятие решений о составе и последовательности проектных процедур; выбор методов решения тех или иных проектных задач, что требует от проектировщика широкого кругозора и достаточно глубоких теоретических знаний по современным методам расчета и проектирования; формулирование принципиальных вариантов проектных решений, которые подлежат последующей детальной автоматизированной проработке; разбивка вариантов объекта на участки проектирования и участки расчета, каждый

из которых целиком может быть подвергнут программной обработке; оперативная работа в интерактивном режиме; оценка результатов проектирования; принятие принципиальных решений (корректировка полученного проектного решения, принятие решения о переходе к последующему этапу программной обработки и т.д.); выполнение согласований по инстанциям.

2. Принципы комплексного и пошагового использования.

Методическое обеспечение САПР дает возможность решения расчетных, проектирующих и чертежно-графических задач, а также задач ввода и обработки данных как комплексно, с использованием функциональных возможностей САПР, так и поэтапно, например, с использованием в автономном режиме какой-либо технологической линии проектирования, либо пакета прикладных программ. Принцип комплексного использования характерен для развитых систем автоматизированного проектирования, а принцип пошагового использования — для систем в состоянии начального внедрения.

3. Принцип технологического деления проектируемого объекта на участки проектирования и участки расчета.

Системы автоматизированного проектирования автомобильных дорог отличаются от других САПР прежде всего спецификой проектируемого объекта, которая характеризуется: разрозненными наборами данных для различных участков проектируемой дороги; значительной протяженностью проектируемого объекта; различными топографическими, почвенно-грунтовыми, инженерно-геологическими, экономическими и другими условиями по длине одного и того же проектируемого объекта, что предопределяет необходимость применения различных методов и различной последовательности выполнения проектных работ; необходимостью многостадийной проработки объекта (технико-экономическое обоснование — ТЭО или обоснование инвестиций — ОИ, инженерный проект — ИП, рабочий проект — РП или техно-рабочий проект — ТРП); нередкой необходимостью проектирования различных участков дороги в разное время и по разным нормативам.

Все эти особенности вынуждают делить автомобильные дороги большой протяженности на участки проектирования, а эти участки, в свою очередь, иногда и на участки расчета, обрабатываемые пакетами прикладных программ или отдельной проблемной программой как одно целое.

4. Принцип многовариантного проектирования.

Помимо широкого использования математических методов оптимизации проектных решений, заложенных в алгоритмы многих программ, САПР предусматривает также и широкую возможность ис-

пользования эвристического подхода к тем задачам проектирования, для которых в настоящее время еще не получено математическое выражение функции цели или целевого функционала и отсутствует математический аппарат нахождения их экстремальных значений.

Проработка большого количества вариантов проектных решений дает определенное приближение к оптимальному.

5. *Принцип взаимосвязанности основных проектных задач*, входящих в САПР, заключается в том, что функциональная последовательность взаимосвязанных между собой проектных работ определяется в соответствии с общей технологией и стадийностью проектирования автомобильных дорог. Действительно, проектированию варианта плана автомобильной дороги предшествует получение топографической информации о местности и ЦММ; продольный профиль может быть запроектирован после получения черного профиля земли по варианту трассы, инженерно-геологического разреза и расчета водопропускных сооружений (труб, малых мостов, мостовых переходов и т.д.).

6. *Принцип преемственности информационных массивов* состоит в том, что передача информационных массивов возможна как непосредственно между пакетами программ и отдельными проблемными программами, так из баз данных с внешних носителей информации с использованием операционных систем.

7. *Принцип разветвляющейся функциональной взаимосвязи проектных задач* состоит в том, что на определенных этапах автоматизированного решения проектной проблемы перед инженером-проектировщиком может возникнуть в зависимости от полученного результата необходимость альтернативного принятия решения в части дальнейшего хода проектирования. Например, выполнив автоматизированное проектирование продольного профиля на заданном участке дороги, инженер-проектировщик может сделать оценку полученного решения по какому-либо критерию (скажем, по строительной стоимости) либо по нескольким показателям (например, по приведенным затратам, по обеспечению зрительной плавности и ясности трассы, по уровню удобства и безопасности движения и т.д.), может, оценивая полученное решение визуально, сразу же убедиться в его недостаточно высоком качестве и, внося коррективы, вернуться к началу проектного процесса по установлению положения проектной линии продольного профиля, может записать полученную информацию в базу данных на один из внешних носителей, а может использовать ее сразу же непосредственно для решения последующей проектной задачи и т.д.



Рис. 9.2. Функциональная структура САПР-АД

Любая система автоматизированного проектирования обычно в своей функциональной структуре содержит значительное число подобных узлов разветвления процесса проектирования.

К настоящему времени в разных странах мира разработано и функционирует большое число систем автоматизированного проектирования автомобильных дорог и сооружений на них (САПР-АД). В России получили наибольшее распространение несколько САПР-АД: «IndorCAD/Road» (Томск), «ГИП» (Москва); в Белоруссии САД «CREDO» (Минск).

Большинство функционирующих в настоящее время САПР-АД имеют сходную структуру (рис. 9.2) и идентичное распределение функций между инженером-проектировщиком и компьютером.

Они состоят из комплекса подсистем (технологических линий проектирования и пакетов прикладных программ), каждая из которых автоматизирует процесс выполнения следующих проектных операций: переработку исходной топографической, инженерно-геологической, экономической и другой изыскательской информации и представление ее в виде цифровой модели рельефа и инженерно-геологического строения местности; проектирование плана автомобильных дорог; проектирование продольного профиля автомобильных дорог; проектирование земляного полотна и дорожных одежд; проектирование искусственных сооружений; оценку проектных решений; подготовку (оформление) проектно-сметной документации.

9.4. Принципы оптимизации и моделирования при проектировании автомобильных дорог

Развитие вычислительной техники и технических средств автоматизации предопределило не только фундаментальное переосмысление и видоизменение технологии проектно-изыскательских работ, но и методов проектирования. В частности, широкое распространение в практике проектирования автомобильных дорог получили математические методы оптимизации и моделирования, применение

которых определяет заметное снижение материалоемкости и стоимости строительства и резкое повышение качества проектируемых объектов.

Бурное развитие прикладной математики, связанное с научно-технической революцией, и широкое внедрение компьютерной техники в практику проектирования определили процесс изменения методов решения основных задач проектирования автомобильных дорог: плана трассы, продольного профиля, земляного полотна, дорожных одежд, малых водопропускных сооружений, мостовых переходов, системы поверхностного и подземного дорожного водоотвода, транспортных развязок движения, оценки проектных решений.

Основная задача теории оптимизации сводится к отысканию экстремума (минимума или максимума) скалярной функции $f(x)$ n -мерного векторного аргумента при заданном комплексе ограничений. Эту задачу представляют следующим образом:

$$\begin{aligned} \min f(x), \\ x \in X, \end{aligned} \quad (9.1)$$

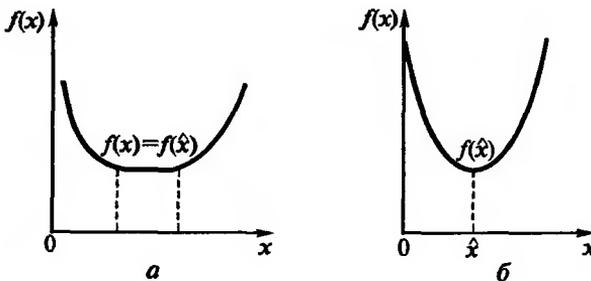
где X — некоторое множество n -мерного евклидова пространства.

Функцию $f(x)$ принято называть *целевой функцией* или *функцией цели*.

Точка \hat{x} определяет *глобальный* минимум функции цели $f(x)$ на множестве X , если $f(\hat{x}) \leq f(x)$ для всех значений $x \in X$ (рис. 9.3).

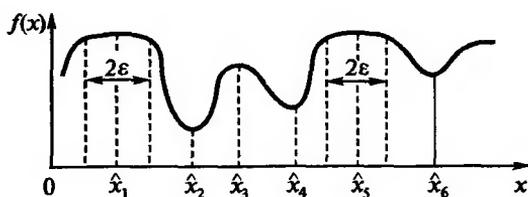
Точка \hat{x} определяет *локальный* минимум функции цели $f(x)$ на множестве X , если при некотором достаточно малом $\varepsilon > 0$ для всех $x \neq \hat{x}$, $x \in X$, удовлетворяющих условию $|x - \hat{x}| \leq \varepsilon$, выполняется неравенство $f(\hat{x}) \leq f(x)$ (рис. 9.4).

Как следует из рис. 9.4, точка \hat{x}_2 определяет глобальный минимум, в то время как точка \hat{x}_4 — локальный.



Р и с. 9.3. Глобальный оптимум функции $f(x)$:

a — в пределах интервала; b — в точке



Р и с. 9.4. Локальный оптимум функции $f(x)$

Применительно к решению задач проектирования автомобильных дорог функция цели (объемы работ, строительная стоимость, дисконтные затраты и т.д.) является функцией многих переменных, т.е. *целевым функционалом*, и поиск его экстремумов методами классического анализа в подавляющем большинстве случаев невозможен. В связи с этим в практике проектирования автомобильных дорог стали применять многочисленные специальные математические методы оптимизации, в частности:

методы оптимизации, основанные на решении задач линейного программирования и позволяющие определять экстремумы линейных функций при заданном комплексе ограничений;

методы оптимизации, основанные на решении задач нелинейного программирования и позволяющие определять экстремумы нелинейных функций при заданном комплексе ограничений;

эвристические методы, дающие возможность за приемлемое машинное время находить проектные решения, приближающиеся к оптимальным.

В настоящее время при автоматизированном проектировании автомобильных дорог с использованием оптимизационных алгоритмов решают главным образом задачи проектирования:

- сетей автомобильных дорог;
- плана автомобильных дорог;
- продольного профиля;
- земляного полотна;
- пойменных насыпей на подходах к мостам;
- дорожных одежд;
- водопропускных труб;
- системы поверхностного дорожного водоотвода;
- мостов и путепроводов на автомобильных дорогах;
- составления проекта организации строительства земляного полотна и дорожных одежд.

Ждут своего решения либо дальнейшего совершенствования в свете перехода на использование строгих математических методов

оптимизации и другие задачи проектирования автомобильных дорог — такие как пространственное трассирование автомобильных дорог, обоснование полосы варьирования трассы, проектирование специальных инженерных сооружений на автомобильных дорогах и т.д.

Широкое использование при проектировании математических методов оптимизации проектных решений, дальнейшее совершенствование их и разработка новых оптимизационных алгоритмов и программ составляют громадный резерв снижения материалоемкости и строительной стоимости автомобильных дорог и повышения эффективности инвестиций в дорожное строительство.

Моделирование предполагает построение и изучение действующих моделей (натурных, лабораторных и математических), обладающих свойствами элементов и характером их взаимодействия, подобным реальным объектам (системам). С точки зрения теории познания, под моделью понимают некоторую систему объектов, находящихся в определенных отношениях к оригиналу, изучение которой позволяет с минимальными затратами средств и времени получать новую информацию о реальной системе.

Многодельные виды моделирования, такие, как натурное и лабораторное, не получили широкого распространения при проектировании автомобильных дорог, прежде всего, в связи с краткостью цикла самого проектирования.

С появлением компьютерной техники и внедрением ее в область исследований и проектирования широкое распространение получил новый, чрезвычайно эффективный метод познания — *математическое моделирование*.

В основе метода математического моделирования лежит идея использования хорошо известных математических уравнений для исследования явлений слабо изученных. Физическая природа процессов, развивающихся в природе и на модели, при этом различна, однако сами процессы развиваются по одним и тем же законам.

Метод математического моделирования во многом является универсальным. Никогда еще наука не получала в свои руки столь могучего аппарата познания окружающего мира. Достоинствами математического моделирования являются: быстрота подготовки математической модели для выполнения тех или иных исследований; быстрота проведения цикла экспериментальных работ; возможность автоматизированной обработки результатов измерений с получением их в виде, удобном для экспериментатора; дешевизна эксперимента при минимальных материальных и трудовых затратах; получение результатов измерений в реальных масштабах пространства и времени изу-

чаемой реальной системы без искажающего влияния масштабных эффектов.

Все эти особенности метода математического моделирования обеспечили широкое его внедрение не только в область научных исследований, но и непосредственно в область проектирования автомобильных дорог. В математических моделях, используемых при автоматизированном проектировании автомобильных дорог, нашли применение:

аналитическая геометрия на плоскости и в пространстве. Методы аналитической геометрии широко применяют при геометрическом моделировании автомобильных дорог, транспортных развязок, водопропускных сооружений, рельефа, гидрогеологического и геологического строения местности и т.д.;

элементы теории погрешностей;

методы математической статистики;

методы интерполирования функций, используемые во многих математических моделях для аппроксимации аналоговой информации (например, для аналитического представления эскизных вариантов трассы автомобильных дорог, для аппроксимации гидрометрических кривых при моделировании мостовых переходов и решении других проектных задач);

методы линейной алгебры и линейного программирования;

численные методы решения алгебраических и трансцендентных уравнений;

численные методы интегрирования дифференциальных уравнений.

В настоящее время при автоматизированном проектировании автомобильных дорог и сооружений на них с использованием методов математического моделирования решают главным образом следующие задачи:

моделирование рельефа, гидрогеологического и геологического строения местности;

геометрическое моделирование элементов автомобильных дорог и развязок движения в разных уровнях;

проектирование земляного полотна;

расчет стока ливневых вод с малых водосборов;

расчет стока талых вод с малых водосборов;

расчет отверстий малых водопропускных сооружений с учетом аккумуляции;

проектирование мостовых переходов;

оценка проектных решений (оценка зрительной пространственной плавности и ясности трассы, моделирование транспортных пото-

ков, моделирование поездки одиночного расчетного автомобиля, построение киноперспектив, оценка степени загрязнения окружающей среды продуктами сгорания топлива, вибрацией, транспортным шумом и т.д.).

Широкое использование при проектировании автомобильных дорог методов математического моделирования, дальнейшее совершенствование их и разработка новых алгоритмов и программ с использованием принципов математического моделирования обеспечат дальнейшее значительное повышение транспортно-эксплуатационных качеств автомобильных дорог.

9.5. Понятие о геоинформационных системах (ГИС)

Геоинформационной системой (ГИС) называют интегрированную систему и комплексную компьютерную технологию, базирующуюся на последних достижениях науки и техники в области информатики, космической навигации, электронной тахеометрии, лазерного сканирования, аэрокосмической и наземной стереофотограмметрии, подповерхностного зондирования, связи, организации баз данных и предназначенную для получения, ввода, хранения, обновления, обработки, визуализации различных видов географически привязанной информации для оперативного комплексного анализа, прогнозирования и принятия решений по широкому кругу вопросов, связанных с картографированием, изысканиями, проектированием, строительством и эксплуатацией инженерных объектов, диагностикой, паспортизацией, экономикой, экологией, сервисом, демографией, безопасностью и т.д.

Анализ места ГИС среди других автоматизированных систем позволяет сделать вывод о том, что комплексная автоматизированная обработка информации в ГИС не имеет аналогов с технологиями обработки информации в других автоматизированных системах.

При значительном внешнем сходстве ГИС и САПР имеют принципиальные различия.

Различия по моделям данных:

в ГИС выделяются несколько основных типов данных: точки, линии, полигоны, поверхности и растры. Как правило, смешение этих данных в пределах одного слоя недопустимо, за исключением моделей данных типа «сеть» (состоит из узлов, которые соединены дугами) и «покрытие» (как и сеть, состоит из узлов, которые соединены дугами; кроме того, имеются регионы, границы которых задаются дугами);

одной из причин небольшого числа графических примитивов в ГИС является также то, что исторически они развивались как мелко-масштабные картографические системы, в которых не требуется большого разнообразия графики;

небольшое число типов данных позволяет строго определять различные пространственные операции: пространственный поиск (в заданном регионе, поиск смежных или пересекаемых объектов), построение оверлеев (объединения, пересечения и разности полигонов), построение буферных зон, зон близости (зон ближайшего обслуживания);

из-за того, что реальные электронные карты могут содержать тысячи и миллионы графических объектов, в ГИС значительно развиты различные алгоритмические методы для хранения больших объемов данных, быстрого поиска объектов, упрощения данных для быстрого вывода на экран;

в САПР, в отличие от ГИС, используют большое число различных графических примитивов, так как одной из главных задач САПР является получение качественных чертежей. Сложность структуры чертежей САПР не позволяет хранить чертежи в базах данных (а если они и хранятся, то целиком в виде единого большого поля), а поэтому они хранятся в виде отдельных файлов;

в дорожной отрасли ГИС используют для представления сети дорог на электронных мелкомасштабных картах, для анализа транспортного обеспечения районов, для получения оперативной информации по объектам дорожной сети;

при проектировании дорог ГИС применяют для выбора наилучшей возможной зоны варьирования проектируемой трассы с учетом существующей цифровой модели местности (ЦММ).

Различия по атрибутной поддержке:

в ГИС, как правило, в одном слое графических данных представляются графические объекты одного типа (например, здания, дороги или реки), имеющие одинаковый набор атрибутов. Таким образом, слой графических данных совместно с наборами атрибутов можно представить себе как таблицу реляционной базы данных, а следовательно, и адаптировать соответствующий аппарат баз данных для анализа атрибутов графических объектов. Например, в ГИС можно выделить все дорожные знаки, расположенные на консолях, или дорожные трубы, находящиеся в неудовлетворительном состоянии;

идеологическая близость моделей данных ГИС и реляционных баз данных позволила создать соответствующие надстройки над различными СУБД (системами управления базами данных) для хранения и анализа графических данных;

одним из принципиальных различий между ГИС и САПР является то, что графический примитив в ГИС является самостоятельным объектом, имеющим свои атрибуты, а в САПР — только изобразительным средством, т.е. частью объекта, а поэтому своих атрибутов, как правило, не имеет;

в САПР же объекты образуются обычно из нескольких графических примитивов, выстраиваясь в иерархии с помощью группировки. Глубокое отличие модели САПР от реляционной модели данных не позволяет полноценно сохранять чертежи САПР в современных базах данных и не позволяет анализировать атрибуты объектов;

в дорожной отрасли наличие атрибутивной поддержки является наиболее важным при решении задач диагностики, паспортизации, инвентаризации, кадастра дорог. В связи со скудностью возможностей атрибутивного описания САПР представляется наиболее целесообразным создание информационных систем автомобильных дорог на основе ГИС.

Различия по методам визуализации:

в САПР, как правило, графические объекты сразу создаются такими, как они выглядят на экране и печати. В ГИС же понятия модели объекта и его внешнего вида специально разнесены;

одной из сильнейших функций ГИС является возможность «тематического картографирования», когда для имеющихся геоинформационных данных задаются «визуализаторы», отображающие данные в зависимости от их геометрических и атрибутивных характеристик. Наиболее распространенными являются:

обозначение одинаковым условным знаком всех графических объектов;

обозначение разными знаками в зависимости от значений некоторого атрибута;

обозначение подписями из атрибутов (автоматическое подписывание объектов);

обозначение точками плотности (случайное размещение некоторого числа точек в полигоне, например, чтобы показать плотность населения страны);

обозначение диаграмм на объектах, показывающих распределение некоторых атрибутивных характеристик объектов;

обозначение линий сплайнами, различная декоративная отрисовка;

в САПР внешний вид объекта обычно уже жестко зафиксирован. Иногда проектировщику предоставляется несколько predeterminedных вариантов отрисовки.

Еще одной особенностью ГИС является возможность задания не-масштабируемых условных знаков и надписей. Этот способ визуализации применяются в основном для отображения на экране компьютера, когда важно быстрое получение информации без изменения текущего масштаба изображения.

В связи с тем, что ГИС и САПР в чистом виде имеют свои сильные и слабые стороны, в последнее время всё большее распространение получают интегрированные графические системы, обладающие возможностями, как ГИС, так и САПР.

В дорожной отрасли такие комбинированные возможности необходимы, например, для представления комплексных проектов автомобильных дорог на плане местности, когда в мелком масштабе пользователь на экране компьютера видит общую схему сети дорог, а при постепенном увеличении появляются детальные чертежи автомобильных дорог.

В мире существует ряд фирм, которые разрабатывают только ГИС-продукты. Наиболее известными из них являются: «ESRI» (USA) и «MapInfo» (Canada). Другие производители, такие, как «AutoDesk» (USA) и «Bentley System» (USA), разрабатывают на едином графическом ядре (AutoCAD в «Autodesk» и Microstation в «Bentley») как САПР, так и ГИС.

Среди отечественных ГИС наиболее известными являются GeoGraph (ИГ РАН, Москва) и GeoCAD («Геокад», Новосибирск). Для дорожной отрасли комплексное решение САПР (IndorCAD)+ГИС (IndorGIS) разработано фирмой «Индорсофт. Инженерные сети и дороги» (Томск).

Глава 10

ТЕХНОЛОГИЯ ПРОИЗВОДСТВА ПРОЕКТНЫХ РАБОТ ПРИ СИСТЕМНОМ АВТОМАТИЗИРОВАННОМ ПРОЕКТИРОВАНИИ

10.1. ГИС-технологии в автоматизированном проектировании

В последние годы в связи с бурным развитием геоинформационных систем (ГИС) рассматривается вопрос об их применимости, наряду с САПР, в автоматизированном проектировании автомобильных дорог.

Современные геоинформационные системы представляют собой новый тип автоматизированных интегрированных систем, которые включают в себя методы обработки данных многих существующих

или ранее существовавших систем, таких, как АСНИ (научные исследования), САПР (проектирование), АСИС (информационные системы), СУБД (управление базами данных), АСК (картографирование), АСЦФ (системы цифровой фотограмметрии), АКС (кадастровые системы) и т.д., а также обладают уникальной спецификой в организации и обработке данных, поставивших их на качественно более высокий уровень как многоцелевых, многоаспектных систем.

Существовавшее до недавнего времени представление о ГИС как об автоматизированной системе управления компьютеризированной базы данных следует считать устаревшим, поскольку в ГИС может входить много баз данных, а полная технология обработки в ГИС значительно шире, чем при работе с конкретной базой данных. Кроме того, любая ГИС обязательно включает в себя систему экспертных оценок, которую реализовать на уровне баз данных не представляется возможным. И наконец, базы данных в ГИС имеют не только пространственную, но и временную характеристику, что важно прежде всего для географических данных.

На основе анализа целей и задач существующих ГИС более правильным следует считать определение ГИС как *геоинформационных систем*, а не как *географических информационных систем*, поскольку процент чисто географических данных в них относительно невелик. Поэтому геоинформационным системам можно дать более короткое определение.

ГИС — автоматизированная интегрированная информационная система, предназначенная для обработки пространственно-временных данных, основой интеграции которых служит географическая информация.

С точки зрения функционального назначения ГИС можно рассматривать как:

систему управления, предназначенную для обеспечения принятия решений по оптимальному управлению разнообразными пространственными объектами (земельные угодья, природные ресурсы, городские хозяйства, транспорт, экология и т.д.);

автоматизированную информационную систему, объединяющую технологии и технологические процессы известных информационных систем типа САПР, АСНИ, АСИС и т.д.;

геосистему, включающую технологии (прежде всего технологии сбора информации) таких систем, как географические информационные системы, системы картографической информации (СКИ), автоматизированные системы картографирования (АСК), цифровые фотограмметрические системы (ЦФС), земельные информационные

системы (ЗИС), автоматизированные кадастровые системы (АКС) и т.д.;

систему, использующую базы данных, характеризуемую широким набором данных, собираемых с помощью различных методов и технологий и объединяющую в себе как базы данных обычной (цифровой) информации, так и графические базы данных. При этом особую роль здесь приобретают экспертные системы;

систему моделирования, использующую в максимальном объеме методы и процессы математического моделирования, разработанные и применяемые в рамках других автоматизированных систем;

систему получения проектных решений, использующую методы автоматизированного проектирования в САПР и решающую ряд других специфических задач, например согласования принципиальных проектных решений с землепользователями, заинтересованными ведомствами и организациями;

систему представления информации, являющуюся развитием автоматизированных систем документационного обеспечения (АСДО) и предназначенную, прежде всего, для получения картографической информации с различными нагрузками и в различных масштабах;

интегрированную систему, объединяющую в единый комплекс многообразный набор методов и технологий на базе единой географической информации;

прикладную систему, не имеющую себе равных по широте применения, в частности на транспорте, в навигации, военном деле, топографии, географии, геологии, экономике, экологии, демографии и т.д.;

систему массового пользования, позволяющую применять картографическую информацию на уровне деловой графики для широкого круга пользователей, когда используют картографические данные, далеко не всегда создавая для этой цели топографические карты.

Одним из основных принципов организации пространственной информации в ГИС является *послойный принцип* (рис. 10.1).

Концепция послойного представления графической информации была заимствована из систем САПР, однако в ГИС она получила новое качественное развитие, например:

тематические слои в ГИС могут представляться не только в векторной форме (как в САПР), но и в растровой форме;

векторные данные в ГИС обязательно являются объектными, т.е. несут информацию об объектах, а не об отдельных их элементах, как в САПР;

тематические слои в ГИС являются определенными типами цифровых картографических моделей, построенными на основе объеди-



Рис. 10.1. Пример совокупности тематических слоев как интегрированной основы графической части ГИС

нения пространственных объектов, имеющих общие свойства или функциональные признаки.

Совокупность тематических слоев образует интегрированную основу графической части ГИС, в которых объединяющей основой (подложкой) являются цифровые и электронные карты.

В рамках проектно-изыскательского процесса на уровне САПР-АД геоинформационные системы целесообразно использовать:

для обоснования полосы варьирования конкурентоспособных вариантов трассы. Этот этап, предшествующий выполнению комплекса полевых изыскательских работ, является чрезвычайно ответственным, поскольку определяет объемы и стоимость изыскательских работ: экономических, геодезических, инженерно-геологических и т.д. Необоснованное завышение ширины полосы варьирования трассы приводит к соответствующему завышению объемов, стоимости и сроков проведения полевых работ и, в конечном итоге, стоимости и сроков проектирования. Занижение ширины полосы варьирования еще более опасно, поскольку наилучший вариант трассы автомо-

бильной дороги может оказаться за пределами территории, охваченной материалами изысканий;

при производстве изысканий автомобильных дорог, особенно для учета природно-климатических факторов района проектирования;

при проектировании оптимальных сетей автомобильных дорог;

при проектировании вариантов плана трассы автомобильных дорог в пределах обоснованной полосы варьирования, с целью уточнения положения каждого варианта и подварианты трассы с учетом конкретных экономических, природных и других условий проектирования;

при проектировании на самых ранних стадиях разработки проекта — при разработке обоснований инвестиций (ОИ) или технико-экономических обоснований (ТЭО), т.е. на тех стадиях, на которых принимаются самые общие принципиальные решения по проектируемому объекту;

при разработке обязательных разделов проектов автомобильных дорог «Охрана окружающей среды» (ОВОС) — при оценке воздействия строительства автомобильной дороги на окружающую среду;

на этапе оценки проектных решений по широкому набору показателей;

при выполнении автоматизированных согласований принимаемых решений с землепользователями, заинтересованными организациями и ведомствами.

10.2. Цифровое и математическое моделирование местности

Цифровой моделью местности (ЦММ) называют совокупность точек местности с известными трехмерными координатами и различными кодовыми обозначениями, предназначенную для аппроксимации местности с ее природными характеристиками, условиями и объектами.

Кодовые обозначения характеризуют связи между соответствующими точками ЦММ.

Общая ЦММ — это многослойная модель, которая в зависимости от назначения может быть представлена сочетанием частных цифровых моделей (слоев): рельефа, ситуационных особенностей, почвенно-грунтовых, гидрогеологических, инженерно-геологических, гидрометеорологических условий, технико-экономических показателей и других характеристик местности.

Математической моделью местности (МММ) называют математическую интерпретацию цифровых моделей для компьютерного решения конкретных инженерных задач.

В зависимости от инженерного назначения математической модели для одной и той же ЦММ может быть использовано несколько различных МММ.

В рамках системного автоматизированного проектирования рациональным образом распределяются функции между инженером-проектировщиком, компьютером и другими средствами автоматизации. Поэтому при решении ряда инженерных задач строительства инженер работает с доступными ему топографическими картами и планами, поручая компьютеру работу с доступными ему цифровыми и математическими моделями тех же участков местности.

Конечным результатом инженерных изысканий при проектировании на уровне САПР по этой причине является получение крупномасштабных топографических планов и ЦММ на одних и тех же участках местности в единой системе координат. Однако нужно иметь в виду, что информационная емкость общей ЦММ при этом существенно больше информационной емкости самых подробных крупномасштабных топографических планов.

ЦММ и МММ используют прежде всего для получения необходимой исходной информации для автоматизированного проектирования (продольные профили земли по оси трассы, поперечные профили, инженерно-геологические разрезы и т.д.). Трудовые затраты на получение этой информации сокращаются до нескольких десятков раз по сравнению с получением той же информации при использовании топографических планов и стереоскопических моделей по традиционной технологии.

Возможности цифрового и математического моделирования позволили, в частности, в корне изменить технологию проектирования инженерных объектов и потребовали изменения технологии и методов сбора, регистрации и представления исходных данных при изысканиях.

10.3. Виды цифровых моделей местности (ЦММ)

Конечной целью изысканий для строительства линейных инженерных объектов (автомобильных, лесовозных дорог, каналов, коммуникаций и т.д.) является получение топографического плана местности в пределах широкой полосы варьирования конкурентных вариантов трассы и цифровой модели рельефа и геологического строения того же участка местности (ЦММ) в единой системе координат. По ЦММ и получаемым на их основе математическим моделям местности (МММ) в конечном итоге осуществляют системное, автоматизи-

рованное проектирование всех конкурентных вариантов трассы линейных сооружений.

При цифровом моделировании рельефа и геологического строения местности в зависимости от сложности рельефа, ситуационных особенностей местности, способа производства изысканий, задач проектирования, наличия парка современных геодезических приборов, приборов спутниковой навигации, средств геофизической подповерхностной разведки, средств автоматизации и вычислительной техники могут быть сформированы ЦММ с использованием самых разнообразных принципов.

Вопросам разработки различных видов ЦММ начиная с 60-х гг. XX в. было посвящено большое количество исследований. При этом все известные ЦММ можно разбить на три большие группы: регулярные, нерегулярные и статистические.

Регулярные ЦММ создают путем размещения точек в узлах правильных геометрических сеток различной формы (треугольных, прямоугольных, шестиугольных), накладываемых на аппроксимируемую поверхность с заданным шагом. Наиболее часто применяют ЦММ с размещением исходных точек в узлах сеток квадратов (рис. 10.2, а) или равносторонних треугольников (рис. 10.2, б). Регулярные ЦММ в узлах правильных шестиугольных сеток (рис. 10.2, в) нашли применение при проектировании нефтепромысловых дорог в условиях равнинного рельефа Западной Сибири.

Массив исходных данных для регулярных ЦММ (рис. 10.2 а–в) может быть представлен в следующем виде:

$$F, m, n, x_0, y_0, H_{11}, \dots, H_{1m}, \dots, H_{nm}, \quad (10.1)$$

где F — шаг сетки; m — число точек по горизонтали; n — число строк по вертикали; $H_{11}, \dots, H_{1m}, \dots, H_{nm}$ — высоты точек в узлах сетки.

Регулярные модели весьма эффективно использовать при проектировании вертикальной планировки городских улиц, площадей, аэродромов и других инженерных объектов на участках местности с равнинным рельефом. Однако опыт использования ЦММ с регулярным массивом исходных данных показал, что требуемая точность аппроксимации рельефа достигается лишь при очень высокой плотности точек местности, которая в зависимости от категории рельефа должна быть в 5–20 раз выше по сравнению с нерегулярными ЦММ. Появление высокопроизводительных дигитайзеров и координетров с автоматической регистрацией информации по заданному интервалу длины или времени, тем не менее, делает использование регулярных моделей (10.1) весьма перспективным.

топографических съемок, которые обеспечивают получение информации о местности в электронном виде, что позволяет максимально автоматизировать процесс подготовки топографических планов и ЦММ.

Тахеометрические съемки особенно эффективны, если выполняются с использованием электронных тахеометров или компьютерных геодезических станций с регистрацией снимаемой информации на магнитные носители в режиме реального времени и последующем ее вводе в память базового компьютера.

Фототеодолитные съемки. Обработку результатов фототеодолитных съемок целесообразно выполнять на универсальных стереофотограмметрических приборах с автоматической регистрацией измеряемых координат точек местности или выполнять системную компьютерную обработку фотоснимков, используя для этой цели автоматизированные системы типа «Fotomod».

Аэросъемки. Определение координат точек местности при обработке стереопар целесообразно производить на универсальных стереофотограмметрических приборах с автоматической регистрацией измеряемых координат на магнитных носителях либо производить системную компьютерную обработку, предварительно сканировав стереопары или используя для этой цели электронные цифровые фотографии.

Наземно-космические съемки с использованием систем спутниковой навигации «GPS» наилучшим образом подходят для создания ЦММ, поскольку обеспечивают получение информации о местности непосредственно в электронном виде на магнитных носителях, что позволяет максимально автоматизировать процесс подготовки моделей.

Воздушное и наземное лазерное сканирование местности — сравнительно новый метод полевого сбора информации о местности, особенно эффективен при изысканиях реконструкции и капитального ремонта автомобильных дорог. По необыкновенной полноте собираемой информации о местности метод лазерного сканирования не имеет себе равных среди современных методов топографических съемок местности, а получение информации исключительно в электронном виде делает его весьма привлекательным для автоматизированной подготовки топографических планов и ЦММ.

Инженерно-геологические изыскания выполняют комплексно с использованием методов традиционной инженерно-геологической разведки (механическое бурение, шурфование, устройство расчисток и т.д.), аэрогеологической разведки (цветные, спектрзональные, тепловые аэросъемки) и методов наземной геофизики с автоматической регистрацией результатов измерений на магнитные носители

(вертикальное электроразведание, электропрофилирование, сейсморазведка, статическое и динамическое зондирование и т.д.). Использование средств автоматизации и компьютерной обработки данных инженерно-геологических изысканий является совершенно обязательным.

Цифровые и математические модели, представляемые в геодезических прямоугольных координатах без искажения масштабов, тем не менее, могут характеризоваться различной точностью и степенью детализации элементов рельефа, ситуации и геологического строения местности, что связано с категорией рельефа, ситуационными особенностями аппроксимируемого участка местности, масштабами используемых для построения ЦММ топографических планов и материалов аэросъемок, принятым типом цифровой модели, плотностью исходных точек и методикой аппроксимации поверхности.

Необходимая точность модели обязательно должна быть увязана с требуемой точностью решаемых по ней инженерных задач.

При использовании для построения ЦММ материалов традиционных топографических съемок точность ситуационных контуров принимают в соответствии с точностью выполняемых топографических съемок, равной 1 мм в масштабе плана. Точность представления рельефа не должна выходить за пределы $\frac{1}{4}$ высоты сечения горизонта-

лей в равнинной местности, $\frac{1}{2}$ высоты сечения — в пересеченной ме-

стности и 1 высоты сечения — в горной. Точность ЦММ при использовании материалов топографических съемок, выполненных с помощью электронных тахеометров, лазерных сканеров или приемников спутниковой навигации «GPS», учитывая, что запись информации ведется безошибочно на магнитные носители, зависит главным образом от точности используемых приборов.

При построении ЦММ по существующим топографическим планам и картам характерные точки местности снимают с точностью, равной: 0,5 мм — для отображения ситуационных особенностей местности и 0,2; 0,3 и 0,5 высоты сечения — для отображения соответственно равнинного, пересеченного и горного рельефов.

При создании ЦММ по материалам аэросъемок или фототеодолитных съемок точность отображения ситуационных особенностей местности и рельефа определяется точностью считывания фотограмметрических координат, которую обеспечивает тот или иной используемый стереофотограмметрический прибор.

Для обеспечения необходимой точности аппроксимации рельефа местности плотность исходного массива точек (среднюю удаленность

друг от друга) для регулярных и нерегулярных (статистических) моделей принимают:

- в равнинной местности — 20—30 м;
- в пересеченной местности — 10—15 м;
- в горной местности — 5—7 м.

10.5. Математические модели местности (МММ)

Математические связи между исходными точками цифровых моделей описываются линейными либо нелинейными (степенными) зависимостями. В первом случае связь между смежными точками модели описывается уравнениями плоскостей, проходящими через каждые три смежные точки модели, во втором — криволинейными поверхностями разного порядка, и, таким образом, рельеф местности задается, либо множеством пересекающихся между собой плоскостей, либо поверхностей различной кривизны.

Решение наиболее актуальной задачи при математическом моделировании рельефа и инженерно-геологического строения местности заключается в определении высот точек местности, а также уровней грунтовых вод и соответствующих геологических напластований в пикетных и плюсовых точках по оси запроектированных вариантов трассы и на поперечниках.

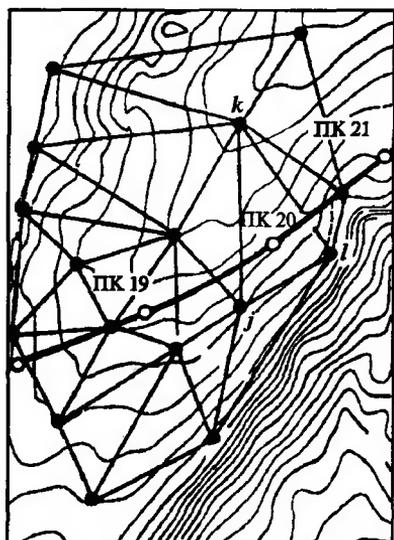
подавляющее число регулярных и нерегулярных ЦММ предполагают при последующем математическом моделировании линейную интерполяцию высот между смежными точками модели.

Задача определения высот точек трассы, уровней грунтовых вод и поверхностей геологических напластований сводится к нахождению в каждом случае тех трех смежных исходных точек модели, между которыми попадет соответствующая искомая точка трассы, в нахождении коэффициентов уравнения плоскости, проходящей через эти три точки, и, наконец, в определении по полученному уравнению искомой высоты (рис. 10.3).

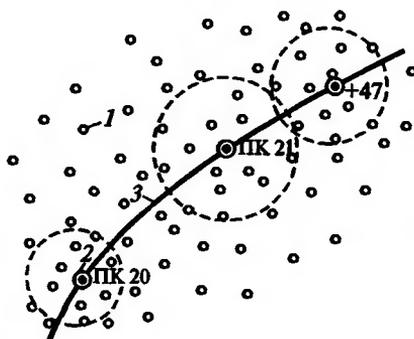
Если искомая точка трассы (например, ПК 20) попадает между смежными исходными точками ЦММ с номерами j , k и l , то уравнение искомой плоскости в общем виде может быть представлено:

$$H = AX + BY + C. \quad (10.7)$$

В уравнении (10.7) известны проектные координаты X и Y точки трассы (например, ПК 20), высоту которой нужно определить, но не известны коэффициенты A , B и C уравнения плоскости, проходящей через исходные точки j , k и l цифровой модели.



Р и с. 10.3. Линейное математическое моделирование рельефа и инженерно-геологического строения местности



Р и с. 10.4. Математическое моделирование рельефа «плавающей» криволинейной поверхностью:

1 — точки статистической ЦММ; 2 — точки трассы; 3 — трасса

Если в уравнение (10.7) подставить известные координаты трех исходных точек цифровой модели, то получим три уравнения, в которых не известны только три коэффициента A , B и C :

$$\begin{cases} H_j = Ax_j + By_j + C; \\ H_k = Ax_k + By_k + C; \\ H_l = Ax_l + By_l + C. \end{cases} \quad (10.8)$$

Система уравнений (10.8) решается в матричной форме или методом «прогонки», в результате чего определяют неизвестные коэффициенты A , B и C уравнения (10,7), подставив в которое проектные координаты X и Y искомой точки трассы, определяют ее высоту H .

Наиболее универсальными являются статистические ЦММ (10.6), математическая реализация которых заключается в использовании метода «плавающего квадрата» или «плавающего круга», в пределах которого строится криволинейная поверхность n -го порядка (рис. 10.4).

чески возрастут, а если плотность возросла — то, наоборот, уменьшатся.

Для математического описания ситуационных, почвенно-грунтовых, гидрогеологических и других условий местности используют контурную индексацию объектов местности с перечнем номеров точек вдоль каждого такого контура (граница пашни, лес, река, ЛЭП, газопровод и т.д.), например: К₃; 3; 21; 43; 24; 26. Для замкнутых контуров (здание, сад, огород, пруд и т.д.) точки замыкания повторяются, например: С₇; 13; 15; 52; 16; 13.

10.6. Задачи, решаемые с использованием цифровых и математических моделей

В рамках системного автоматизированного проектирования (САПР) объектов строительства с помощью цифровых и математических моделей решается широкий круг инженерных задач, которые ранее частично находили решение другими методами и средствами:

оптимальное пространственное трассирование автомобильных дорог, лесовозных дорог и каналов. Решение этой актуальной задачи с привлечением математического аппарата оптимизации проектных решений стало возможным благодаря развитию методов цифрового и математического моделирования местности;

получение продольных профилей земли по оси вариантов трассы, запроектированных с использованием крупномасштабных топографических планов. В рамках изысканий при традиционном проектировании продольный профиль по оси трассы получали в результате выполнения трудоемкого комплекса полевых геодезических работ, как правило, средствами традиционной наземной геодезии (трассирование, закрепление трассы, разбивка пикетажа, двойное геометрическое нивелирование и т.д.);

получение поперечных профилей земли. Эта работа при традиционных изысканиях выполнялась, как правило, методом тригонометрического нивелирования;

получение продольных по оси трассы и поперечных инженерно-геологических разрезов. При традиционных изысканиях эту совершенно необходимую для проектирования информацию получали в результате выполнения комплекса чрезвычайно трудоемких и дорогих инженерно-геологических работ путем механического бурения, шурфования, устройства расчисток и т.д.;

получение исходной инженерно-гидрологической информации для проектирования водопропускных сооружений и системы поверхностного водоотвода (площади водосборов, живые сечения,

морфостворы и гидростворы, уклоны логов и их склонов, математическое моделирование стока ливневых и талых вод и т.д.);

проектирование системы дорожного поверхностного водоотвода (кюветы, быстротоки, нагорные и водоотводные канавы и т.д.);

решения задачи распределения земляных масс и подсчеты объемов земляных работ;

решение задач вертикальной планировки при проектировании площадей, городских улиц, дорог и аэродромов;

пространственное моделирование полотна автомобильных дорог и прилегающего ландшафта. Решение этой задачи широко используют при ландшафтном проектировании автомобильных дорог для обеспечения зрительной плавности и ясности трассы и обеспечения гармоничного вписывания полотна автомобильных дорог в прилегающий ландшафт с обеспечением высоких уровней удобства и безопасности движения;

проектирование транспортных развязок автомобильных дорог в одном и разных уровнях.

Развитие и совершенствование методов цифрового и математического моделирования местности во многом предопределили и повлияли на изменение технологии и методов изысканий и проектирования объектов инженерного строительства, и дальнейший прогресс проектно-изыскательского дела невозможен без широкого использования в ходе выработки проектных решений, их оценки и корректировки цифровых и математических моделей местности.

10.7. Технология автоматизированного проектирования автомобильных дорог

Технология автоматизированного проектирования автомобильных дорог представляет собой совокупность правил, определяющих действия инженерно-технического персонала по высококачественному решению проектной проблемы в фиксированные сроки и с минимальными затратами при комплексном использовании всех компонентов обеспечения САПР-АД: методического, программного, информационного, технического и организационного.

Технология автоматизированного проектирования автомобильных дорог определяется рядом факторов, основные из которых следующие:

стадия проектирования (ОИ — обоснование инвестиций; ИП — инженерный проект; РД — рабочая документация или РП — рабочий проект). Разработка проектов автомобильных дорог на разных стадиях проектирования различается кругом решаемых экономиче-

ских и проектных проблем; составом, объемом и точностью исходной изыскательской информации; степенью детализации проектных проработок и их оценки по основным показателям; шириной полосы варьирования трассы и, наконец, конечной целью проектирования. Характерными особенностями проектирования автомобильных дорог на разных стадиях является постепенное сужение полосы поиска наилучшего положения трассы, возрастание точности исходной изыскательской информации (увеличение масштабов топографических планов, детализация ЦММ и т.д.) и возрастание детализации проектных проработок;

категория проектируемой дороги. С категорией дороги связаны параметры плана трассы и проектной линии продольного профиля, размеры земляного полотна, конструкции дорожных одежд и искусственных сооружений, требования по обеспечению уровней удобства и безопасности движения, требования по охране окружающей среды и решение других экологических проблем;

административно-хозяйственное значение проектируемой дороги (дороги федерального, республиканского, краевого и областного значения, курортные дороги, подъездные пути, городские дороги, сельскохозяйственные дороги) имеет свои специфические особенности, что находит отражение в методах и технологии их проектирования;

природные условия района проектирования. На те или иные проектные решения оказывают существенное влияние: дорожно-климатическая зона района изысканий и проектирования дороги, категория рельефа, инженерно-геологические, гидрогеологические, почвенно-грунтовые и другие условия района проектирования;

вид, качество и объем исходной изыскательской информации для проектирования (материалы тахеометрических, наземно-космических, лазерных, фототеодолитных, аэрофотосъемок, материалы инженерно-геологических и инженерно-гидрологических обследований, данные экономических изысканий и т.д.). Все это во многом определяет различия в технологии и методах автоматизированного проектирования и, прежде всего, на начальных этапах проектного процесса при создании цифровых и математических моделей рельефа и геологического строения местности на полосе варьирования трассы;

вид проектируемого объекта и его размеры (протяженность). Круг решаемых проектных задач, а также этапная последовательность оказываются несколько различными при проектировании объектов нового строительства, при разработке проектов реконструкции и капитального ремонта, при разработке проектов титульных мостовых пе-

реходов и т.д. При этом проектирование новой автомобильной дороги принято рассматривать как частный случай реконструкции;

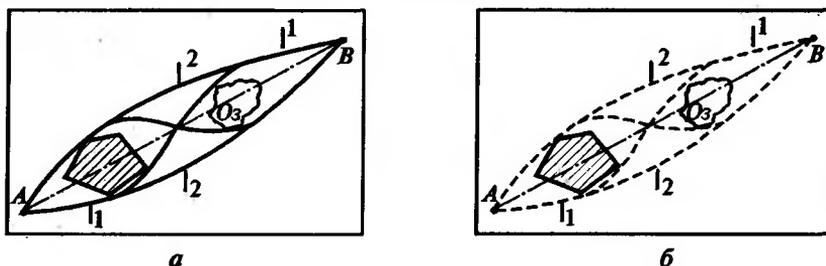
состояние средств обеспечения САПР-АД, находящихся в процессе непрерывного развития и совершенствования, влияет на соответствующие изменения технологии и методов автоматизированного проектирования.

Таким образом, технология и методы автоматизированного проектирования автомобильных дорог в каждом конкретном случае определяются множеством разнообразных факторов. Однако есть и общие черты автоматизированного проектирования, отличающие его от традиционного и присущие всем известным САПР-АД. Это прежде всего:

комплексная автоматизация сбора, регистрации и обработки данных изысканий и представление их в виде крупномасштабных топографических планов в общей системе координат и ЦММ в той же системе координат на полосу варьирования конкурирующих вариантов трассы автомобильной дороги;

многовариантная камеральная проработка многих принципиальных направлений трассы (по крупномасштабным топографическим планам на полосу варьирования трассы рассматривают, как правило, несколько десятков вариантов и подвариантов трассы) с получением исходных данных для проектирования по каждому варианту (черный профиль, поперечные профили земли, почвенно-грунтовые и инженерно-геологические разрезы, исходные данные для расчета поверхностного стока ливневых и талых вод, экономические показатели местности и т.д.) (рис. 10.5);

автоматизированное проектирование с использованием систем прикладных программ (СПП) всех элементов автомобильной дороги



Р и с. 10.5. Принципиальная схема камерального вариантного трассирования по крупномасштабным топографическим планам и получение исходных данных для проектирования с ЦММ:

а — крупномасштабный топографический план; *б* — цифровая модель местности (ЦММ); 1 — варианты трассы; 2 — подварианты трассы

(план трассы, варианты проектной линии продольного профиля, поперечные профили земляного полотна, варианты конструкции дорожной одежды, искусственные сооружения, система дорожного водоотвода, транспортные развязки движения, обстановка и принадлежности дороги, здания и сооружения дорожной и автотранспортной служб, подсчеты объемов строительных работ и т.д.);

системное использование средств автоматизации и вычислительной техники;

проектирование в интерактивном режиме (взаимодействие в ходе выработки проектных решений инженера-проектировщика и компьютера);

четкая этапность выполнения всех проектных процедур;

широкое использование методов математического моделирования (цифровое и математическое моделирование рельефа и инженерно-геологического строения местности, геометрическое моделирование полотна автомобильной дороги в трехмерном пространстве, моделирование стока ливневых и талых вод с малых водосборов, моделирование работы малых водопропускных сооружений и мостовых переходов, моделирование транспортных потоков и т.д.);

использование математических методов оптимизации проектных решений (проектирование оптимального продольного профиля, оптимального земляного полотна, оптимальных дорожных одежд, малых водопропускных сооружений и т.д.);

многовариантная проработка тех элементов проектируемых автомобильных дорог, для которых еще не созданы целевые функции и функционалы и математический аппарат аналитического поиска их экстремумов;

всесторонняя глубокая оценка принципиальных проектных решений по каждому варианту и подварианту трассы и их соответствующая корректировка по многим критериям: объемы строительных работ, сметная стоимость, транспортно-эксплуатационные расходы, приведенные затраты, стоимость отчуждения земель, затраты на зимнее содержание дороги, обеспечение видимости, зрительная плавность и ясность трассы и вписывание ее в окружающий ландшафт, время сообщения, уровни удобства и безопасность движения, пропускная способность, степень загрязнения окружающей среды транспортным шумом, тяжелыми окислами свинца, отработанными машинными маслами и т.д.;

полная автоматизация подготовки, оформления, тиражирования и хранения проектно-сметной документации.

На каждой стадии проектирования выполняют согласования проектных решений с заказчиком, землепользователями, заинтересованными организациями, ведомствами и министерствами. Согласования — весьма трудоемкий, длительный, но совершенно необходимый процесс. В связи с этим на современном этапе все чаще согласования проектов автомобильных дорог осуществляют в автоматизированном режиме в рамках геоинформационных систем (ГИС).

Глава 11

СИСТЕМА АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ CAD «CREDO»

11.1. История развития

Система автоматизированного проектирования автомобильных дорог CAD «CREDO» (Минск) развивается с 1989 г. в научно-производственном объединении (НПО) «Кредо-Диалог». Изначально это был пакет программ по проектированию капитального ремонта дорожных покрытий. Название этой системы проектирования сохранилось с тех времен по аббревиатуре слов: Капитальный РЕМонт Дорожных Одежд.

Система была разработана сильным творческим коллективом специалистов дорожной отрасли из России, Украины, Белоруссии и ориентирована прежде всего на эксплуатацию в производственных условиях. CAD «CREDO» получила широкое распространение в дорожных проектно-изыскательских организациях, а также в организациях других отраслей, занимающихся проектированием линейных объектов (гидромелиоративной, нефтегазовой, электроэнергетической и т.д.).

В 2003 г. была завершена разработка системы «CREDO» третьего поколения под управлением операционной системы ОС Windows.

В состав системы «CREDO» третьего поколения входят четыре подсистемы: «Топоплан», «Линейные изыскания», «Генеральный план», «Дороги» и ряд пакетов прикладных программ, таких как «Проектирование индивидуальных дорожных знаков», «Расчет нежесткой дорожной одежды» и т.д. Функциональная структура и технические возможности подсистем «Линейные изыскания» и «Дороги» представлены далее.

11.2. Функциональная структура подсистемы «Линейные изыскания»

В подсистему САД «CREDO» «Линейные изыскания» полностью входят все функции подсистемы «Топоплан». Так как подсистема предназначена, в первую очередь, для обработки материалов инженерных изысканий, в том числе и линейных, в нее дополнительно, кроме перечисленных для подсистемы «Топоплан», включен набор специальных функций.

Трассирование.

Интерактивное создание и редактирование трасс с использованием различных стилей и методов трассирования, в том числе с использованием полевых материалов, включая проектирование плана трасс автомобильных дорог в сложных, стесненных условиях, например в горной местности или при реконструкции дорог.

Создание и редактирование отдельных простых и сложных элементов трасс разнообразными методами, в том числе аппроксимацией фрагментов реконструируемых линейных сооружений, эквидистантным переносом уже существующих трасс, с рациональным подбором параметров составных закруглений.

Использованы разнообразные механизмы создания трасс:

из отдельно созданных элементов с последующим их сопряжением многообразными, рациональными способами;

с одновременным построением составляющих трассу элементов; эквидистантным переносом, инверсией, разделением, «склеивкой» ранее построенных трасс.

Разбивка пикетажа, в том числе с использованием «рубленных» пикетов различных видов. Создание и редактирование закруглений трасс на углах поворота.

Поддержка отдельного и вариантного трассирования.

Обеспечение возможности трассирования с учетом специфики изысканий автомобильных дорог.

Таблицы нивелирования.

Таблицы высот точек продольного нивелирования с заполнением данных из рукописных журналов, таблиц журналов технического нивелирования, таблиц журналов нивелирования поперечников или загрузкой данных из ЦММ по выбранным поверхностям.

Таблицы журналов нивелирования (геометрического и тригонометрического) поперечников с интерактивным графическим редактированием геометрии. Возможность создания «косых» поперечников.

Профили.

Создание, просмотр, редактирование продольных профилей трасс по данным ЦММ, таблиц продольного нивелирования, данных, полученных по растровой подложке. Дополнение профиля выборкой из ЦММ.

Разбивки.

Полная подготовка данных (координат, длин линий, дирекционных углов, параметров закруглений) для выноса трасс в натуру. Создание проекта выноса — формирование ведомостей и чертежей разбивочных работ нескольких видов.

Чертежи.

Создание и редактирование чертежей топографических планов полосы трассы с отображением ее элементов. Создание развернутого плана трассы. Создание и редактирование чертежей продольного и поперечных профилей. Использование настраиваемых шаблонов подвалов продольных и поперечных профилей для выпуска чертежей.

Ведомости.

Создание ведомостей геометрии трассы. Создание основных ведомостей (пересекаемых коммуникаций, угодий, землепользований, рубки) с выборкой данных из семантики топографических объектов ЦММ.

11.3. Функциональная структура подсистемы «Дороги»

Подсистема «Дороги» предназначена для проектирования автомобильных дорог обычного типа всех категорий, городских дорог и улиц, а также автомагистралей, скоростных дорог и транспортных развязок.

Исходные данные.

Проектирование ведется по цифровой модели местности площадки или полосы варьирования трассы. В качестве ЦММ используют данные изысканий, обработанных в системе «Топоплан» или «Линейные изыскания». Обеспечено чтение данных CREDO_TER, CREDO_PRO, CREDO_MIX. Кроме того, система имеет инструментарий самостоятельного формирования ЦММ с использованием существующих картографических материалов, представленных в растровом или векторном видах.

Организация данных.

Набор данных изысканий и проектирования на полосу варьирования формируется в иерархической структуре проектов, позволяющих размещать данные либо по разделам проекта, либо по составу элементов проектируемого объекта, а также в необходимых для пользователя комбинациях. В свою очередь проекты формируются

из иерархически организованных слоев с редактируемыми свойствами. Обеспечивается врезка, вырезка участков модели. Менеджер проектов обеспечивает работу в базе данных с большими, сложно организованными объектами и осуществление их коллективной обработки.

Трассирование.

Интерактивное создание и редактирование трассы дороги с использованием различных стилей трассирования, от «жестких», представляемых лишь прямыми и круговыми кривыми, до очень плавных и эстетичных трасс, представляемых прямыми, круговыми кривыми, клотоидами, отрезками клотоид и сплайнами, с удовлетворением архитектурно-ландшафтных требований. Трассирование в стесненных и сложных условиях, например в горной местности или при реконструкции дорог.

Создание и редактирование отдельных простых и сложных элементов трасс разнообразными методами, в том числе аппроксимацией фрагментов реконструируемых дорог, эквидистантным переносом уже существующих трасс, с рациональным подбором параметров составных закруглений.

Создание и редактирование осей проездов, границ проезжей части, бровок земляного полотна с использованием базовых геометрических элементов наиболее подходящими методами:

из отдельно созданных элементов с последующим их сопряжением многообразными, рациональными способами;

с одновременным построением составляющих трассу элементов; эквидистантным переносом, инверсией, разделением, «склеивкой» ранее построенных трасс.

Разбивка пикетажа, в том числе с использованием «рубленых» пикетов различных видов.

Поддержка раздельного и вариантного трассирования с сохранением вариантов для последующего анализа.

Проектирование продольного профиля.

Проектирование традиционного продольного профиля и проектирование оптимального продольного профиля дороги. Использование при интерактивном проектировании профилей всего многообразия геометрических элементов (прямых, квадратных парабол, сплайнов) в любых возможных комбинациях. Применение при проектировании продольного профиля методов, аналогичных созданию и редактированию трасс дорог в плане: аппроксимация фрагментов реконструируемого профиля, создание и последующее сопряжение

элементов. Проектирование продольного профиля наиболее подходящими методами, в том числе:

- полное автоматизированное проектирование;
- по секущим с вписыванием вертикальных кривых;
- методом «опорных точек» и «элементов», с учетом ограничений, накладываемых технологией производства земляных работ или особенностями реконструкции дорог.

Динамическая связь проекта продольного профиля с другими пространственными данными исходной модели, обеспечивающая максимальную информативность и учет всевозможных ограничений, включая координаты и другие параметры пересекаемых топографических объектов, транспортных сооружений, коммуникаций и т.д.

Автоматизированные методы выявления и исправления «трудных» участков проектной линии, например по критерию не обеспеченной видимости, безопасности движения, обеспечения зрительной плавности и ясности трассы и т.д.

Возможность использования разнообразных информационных и рабочих сеток для отображения параметров, характеристик и свойств проектной линии профиля и проектируемого объекта в целом.

Поддержка вариантного проектирования профиля с сохранением вариантов для последующего анализа.

Проектирование земляного полотна и проезжей части.

Проектирование земляного полотна и проезжей части с необходимым количеством и параметрами их элементов: полос движения, обочин, разделительных полос, тротуаров, переходно-скоростных полос, карманов автобусных остановок и т.д. Конструирование поперечного профиля как в интерактивном режиме по поперечным уклонам, так и с использованием шаблонов поперечников. Задание зависимостей от оси (или другой характерной линии) по уклонам. Моделирование разнообразных конструкций отгона выража.

Интерактивное конструирование насыпей и выемок с разнообразными сочетаниями в поперечном профиле откосов переменной крутизны, берм, закуветных полок, подпорных стен. Конструирование земляного полотна на участках раздельного трассирования. Возможность использования редактируемой библиотеки шаблонов, применение типовых решений в зависимости от величины и знака рабочих отметок земляного полотна.

Проектирование элементов поверхностного водоотвода.

Расчет площадей и объемов элементов земляного полотна и проезжей части.

Генеральный план дороги.

Моделирование элементов генерального плана дороги с возможностью использования типовых решений и настраиваемого классификатора. Проектирование сопряжений пересекающихся дорог, различные способы создания и редактирования вертикальной планировки развязок, автобусных остановок, стоянок и т.д. Проектирование (укладка в плане) инженерных коммуникаций, озеленения, элементов обустройства дороги.

Оценка проектных решений.

Анализ вариантов дороги по видимости в плане и профиле и по коэффициентам аварийности. 3D-визуализация.

Разбивки.

Полная подготовка данных (координат, длин линий, дирекционных углов, параметров закруглений) для выноса трасс в натуру. Создание проекта выноса — формирование ведомостей и чертежей разбивочных работ нескольких видов.

Чертежи.

Формирование необходимых чертежей, в том числе плана, продольного профиля, поперечных профилей, совмещенных чертежей. Дополняемая и редактируемая пользователем библиотека шаблонов чертежей.

Ведомости.

Формирование комплекта ведомостей, в том числе элементов плана трассы; разбивки оси, других характерных линий; параметров продольного профиля; оттона и разбивки виража.

Вспомогательные подсистемы:

редактор шаблонов чертежей с возможностью создания шаблонов и настройки собственных штампов, координатной сетки, таблиц, рамок и зарамочного оформления, состава и вида подвала чертежей профиля;

генератор отчетов с возможностью модификации состава и вида выходных текстовых документов;

редактор условных знаков;

редактор классификатора, обеспечивающий создание собственных типов объектов, состава семантической информации и условий отображения.

Система CAD «CREDO» третьего поколения реализована с применением современного математического и программно-технологического аппарата.

Глава 12

СИСТЕМА АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ «IndorCAD/Road»

12.1. История развития

Система автоматизированного проектирования автомобильных дорог «IndorCAD/Road» (Томск) развивается с 1991 г. До 2003 г. система разрабатывалась в Инженерном дорожном центре «Индор» и называлась CAD «ReCAD» (по аббревиатуре слов РеКонструкция Автомобильных Дорог). На начальном этапе развития система «ReCAD» представляла собой исследовательскую систему, на которой отрабатывались новые алгоритмы и технологии автоматизированного проектирования автомобильных дорог. До 2001 г. система в опытном порядке применялась в производственной практике ряда дорожных проектных организаций Западной Сибири.

В 2001 г. была завершена разработка системы CAD «ReCAD» третьего поколения под управлением ОС Windows, которая была анонсирована и сертифицирована как программный продукт для массового применения. С этого времени система CAD «ReCAD» нашла широкое применение в производственной практике в России и в странах СНГ.

В марте 2003 г. система CAD «ReCAD» была передана для дальнейшего развития в специализированную фирму по разработке программного обеспечения «ИндорСофт. Инженерные сети и дороги», которая наряду с системами автоматизированного проектирования разрабатывает и геоинформационные системы (ГИС). С этого времени система CAD «ReCAD» была переименована в систему CAD «IndorCAD/Road».

Теоретические основы и практические методы, а также расчетные схемы и алгоритмы для системы CAD «IndorCAD/Road» были разработаны д-ром, техн. наук, профессором Г.А. Федотовым, д-ром техн. наук В.Н. Бойковым, д-ром техн. наук А.В. Скворцовым, д-ром физ.-мат. наук Б.М. Шумиловым, канд. техн. наук С.П. Крысиным, инженерами С.Р. Люстом, Д.А. Петренко, М.О. Ивановым и т.д.

Система CAD «IndorCAD/Road» позволяет проектировать автомобильные дороги всех категорий на стадии нового строительства, реконструкции и ремонта. В основу идеологии системы положены, в первую очередь, расчетные схемы реконструкции дорог. Новое строительство здесь следует рассматривать как частный случай ре-



Р и с. 12.1. Фрагмент обработки данных из тахеометрического журнала

конструкции, т.е. без учета наличия элементов существующей дороги.

В системе реализован принцип единой модели дороги, т.е. любые изменения в одной из проекций дороги (план, продольный и поперечные профили) приведут к немедленным изменениям в других проекциях. Такой подход позволяет получать непротиворечивые проектные решения, дает возможность одновременно корректировать поперечный и продольный профили и обеспечивает организацию коллективной работы над одним проектом.

Инструментальные средства системы предоставляют возможность:

обрабатывать геодезическую информацию, полученную разными методами: нивелирование, тахеометрическая съемка (рис. 12.1), GPS-съемка;

на основе обработанных данных формировать цифровые модели местности (ЦММ), редактировать их, отображать в различных представлениях (изолинии, твердотельная модель, уклоны и т.д.) для визуального анализа;

трассировать автомобильные дороги в плане и продольном профиле как с применением традиционных геометрических элементов (прямые, круговые кривые, клотоиды, отрезки клотоид), так и с при-

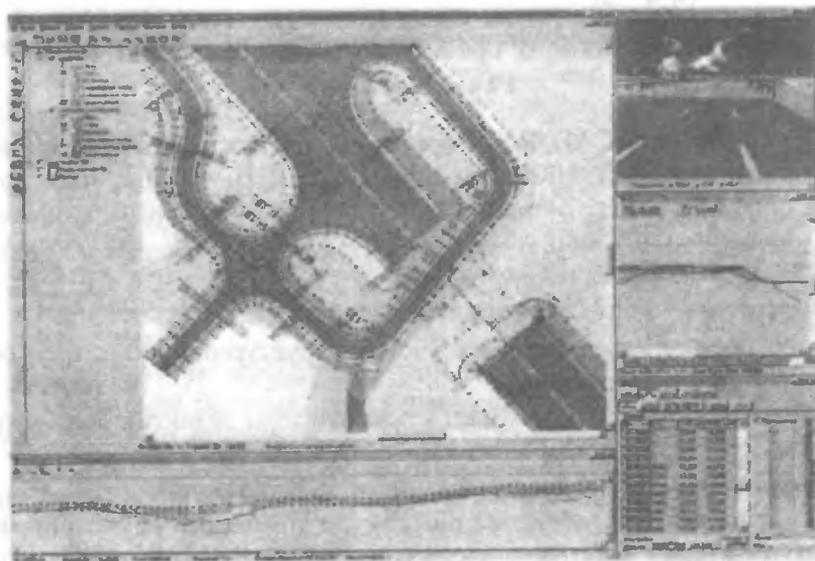


Рис. 12.2. Система «IndorCAD/Road» в режиме полиэкрана

менением современного аппарата вычислительной математики (кривые Безье и сплайны);

объединять несколько проектов в один, что позволяет легко разбивать сложный проект на несколько более мелких проектов, обработать их и затем производить «склежку» в единый проект;

осуществлять параллельный перенос трассы, изменять азимут ее начального направления;

проектировать верх земляного полотна (виражи), в том числе и с учетом сплайновой природы трасс;

конструировать дорожную одежду и поперечные профили как типовые, так и индивидуальные;

отображать 3D-вид как существующей поверхности, так и проектируемой;

одновременно отображать на экране все проекции проектируемого объекта (рис. 12.2);

формировать чертежи, ведомости и таблицы для последующего их редактирования соответственно в «IndorDrawing» и «Microsoft Excel»;

богатый «ActiveX»-интерфейс позволяет создавать собственные модули расширения и надстройки системы для решения частных задач.

12.2. Функциональная структура системы автоматизированного проектирования «IndorCAD/Road». Раздел «План»

Система «IndorCAD/Road» состоит из пяти основных разделов — технологических линий проектирования (ТЛП): «План», «Продольный профиль», «Верх земляного полотна», «Поперечный профиль», «3D-вид».

Раздел «План» включает в себя:

- различные формы представления рельефа;
- построение поверхностей с учетом структурных линий рельефа (рис. 12.3);
- возможность «подкрашивать» поверхность, редактировать ребра триангуляции в ручном режиме;
- возможность построения разности поверхностей;
- получение сечений поверхностей по произвольным линиям;
- возможность работы с несколькими поверхностями;
- возможность отключения ненужных элементов отображения;
- возможность использования специализированных библиотек условных знаков, линий, заливок;

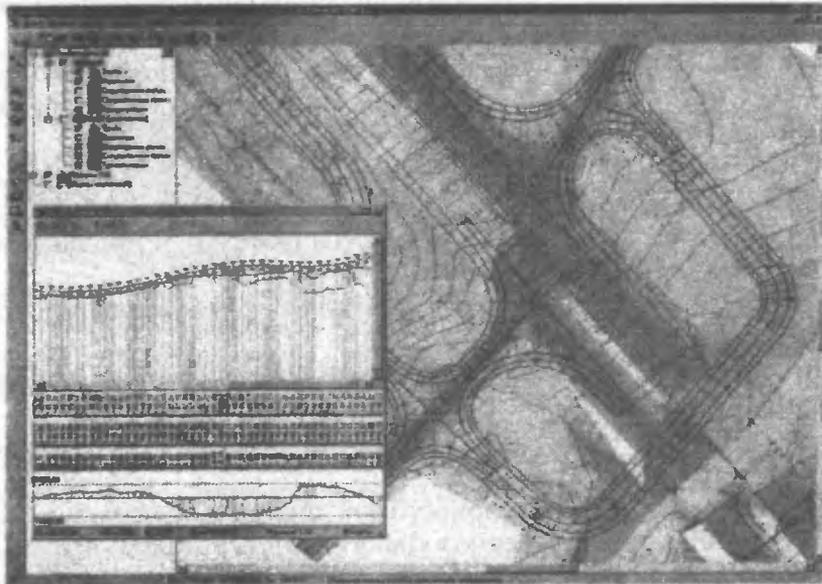


Рис. 12.3. Раздел «План» системы «IndorCAD/Road»

возможность широкого выбора инструментов для работы с объектами: полигонами, точками, линиями, трассами и т.д.;
 возможность одновременного использования нескольких растровых подложек (сканированные карты, чертежи, аэрофотоснимки).

12.3. Раздел «Продольный профиль»

Раздел (подсистема) «Продольный профиль» системы «IndorCAD/Road» при автоматизированном проектировании обеспечивает:

- классическое и сплайновое проектирование продольного профиля (рис. 12.4);
- осуществление микропрофилирования;
- отображение рабочих, проектных, интерполированных отметок земли, графика кривизны, уклонов;
- закрепление точек проектной линии различными типами фиксации;
- сплайн-сглаживание с последующим ручным редактированием проектной линии, как профиля всей трассы, так и заданного фрагмента;

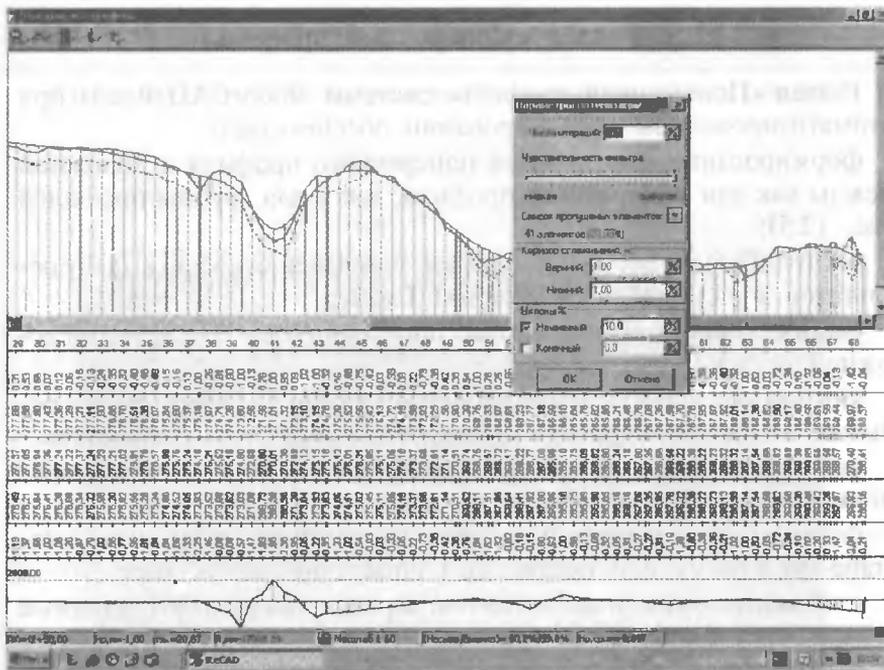


Рис. 12.4. Раздел «Продольный профиль» системы «IndorCAD/Road»

возможность формирования чертежа продольного профиля различной степени детализации как для проектов реконструкции, так и для проектов нового строительства.

12.4. Раздел «Верх земляного полотна»

Раздел «Верх земляного полотна» системы «IndorCAD/Road» при автоматизированном проектировании обеспечивает:

формирование проезжих частей и обочин, разделительных полос, бордюров с применением как линейного, так и синусоидального интерполирования;

моделирование отгонов виражей, виражей, уширений проезжей части на кривых;

формирование автобусных карманов и переходно-скоростных полос;

анализ соответствия виража расчетной скорости автомобиля при заданном коэффициенте поперечной силы;

локальную псевдо-3D-визуализацию формируемого полотна.

12.5. Раздел «Поперечный профиль»

Раздел «Поперечный профиль» системы «IndorCAD/Road» при автоматизированном проектировании обеспечивает:

формирование конструкций поперечного профиля и дорожной одежды как для конкретного профиля, так и для группы профилей (рис. 12.5);

расчет объемов дорожной одежды, площадей откосов, выдачу результатов в виде таблиц «Microsoft Excel»;

работу с библиотеками типовых поперечников и конструкций дорожной одежды;

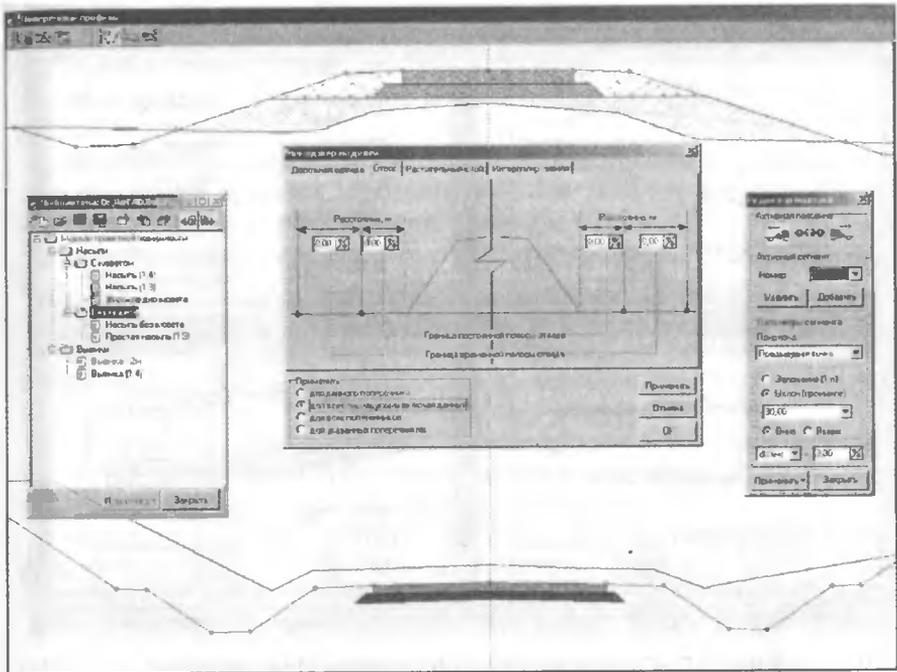
автоматическое доведение проектной линии до пересечения с реальной или интерполированной землей по выбору проектировщика;

формирование своих собственных библиотек поперечных профилей и конструкций дорожной одежды;

формирование чертежей поперечных профилей в заданном масштабе по одному или нескольким поперечникам на лист;

отображение точечных объектов: деревья, опоры ЛЭП, уличные фонари, светофоры и т.д. (рис. 12.6);

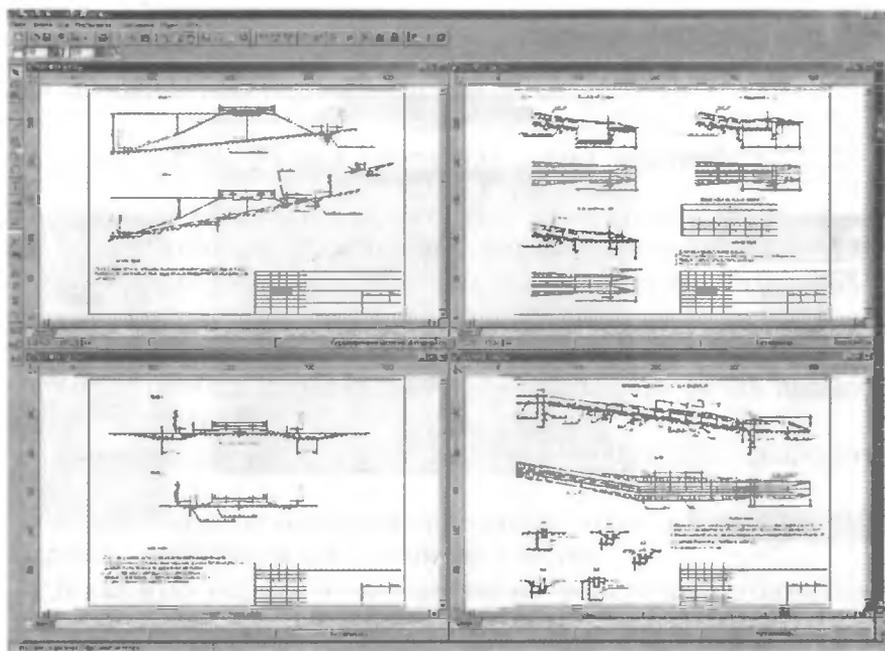
отображение площадных объектов: здания, водоемы, лесные массивы и т.д.;



Р и с. 12.5. Раздел «Поперечный профиль» системы «IndorCAD/Road»



Р и с. 12.6. Раздел «3D-вид» системы «IndorCAD/Road»



Р и с. 12.7. Специализированный редактор «IndorDrawing»

отображение линейно-протяженных объектов: мосты, ограждения, шумозащитные экраны и т.д.;

отображение в реальном времени всех производимых изменений;

интерактивное перемещение по свободной траектории;

имитацию «проезда» по автомобильной дороге (киноперспектива);

запись проезда в AVI-файл любого формата;

«врезку» проектной поверхности в существующую, отображение результата врезки;

возможность создания сторонними разработчиками моделей расширения возможностей 3D-вида, используя технологию «ActivX»;

моделирование транспортного потока с учетом заданной для каждой трассы интенсивности и возможных направлений движения.

По завершении работы с моделью проектируемого объекта (автомобильной дороги) в системе «IndorCAD/Road» проекции модели на уровне чертежей передаются в специализированный графический редактор «IndorDrawing» (рис. 12.7).

12.6. Графический редактор «IndorDrawing»

Редактор «IndorDrawing» обеспечивает:
возможность встраивания документов и компоновку чертежей любой сложности;

возможность использования библиотек условных обозначений знаков, линий, заливок, соответствующих ГОСТу, что значительно упрощает процесс оформления чертежа;

использование встроенных в редактор форм стандартных штампов, что делает удобным оформление листов чертежей;

необходимую структуру чертежа и позволяет хранить данные в различных слоях, что дает возможность легко отключать ненужную информацию. Часть слоев может быть заблокирована от изменения пользователем;

экспорт чертежей в стандартные растровые и векторные форматы, в том числе «AutoCAD», что позволяет передавать чертежи пользователям, работающим на другой платформе;

использование технологии «ActiveX», что позволяет сторонним разработчикам создавать свои инструменты и модули для решения специальных задач; использование библиотек, часто требуемых при оформлении чертежей, элементов, что значительно сокращает время создания чертежа. Пользователи могут создавать свои собственные библиотеки.

Помимо того, что «IndorDrawing» имеет достаточно развитые функции и инструментальные средства, характерные для векторных графических редакторов, в его состав входит также ряд специализированных модулей, значительно расширяющих возможности редактора по подготовке дорожной проектной документации.

Система автоматизированного проектирования автомобильных дорог «IndorCAD/Road» совместно со специализированным графическим редактором «IndorDrawing» является универсальным программным комплексом по проектированию автомобильных дорог общего пользования, автомагистралей, городских дорог и генеральных планов.

Раздел третий

УЧЕТ ПРИРОДНЫХ ФАКТОРОВ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ

Глава 13

ПРИРОДНЫЕ ФАКТОРЫ И ИХ ВЛИЯНИЕ НА ФУНКЦИОНИРОВАНИЕ ДОРОГ

13.1. Основные природные факторы, учитываемые при проектировании

Функционирование автомобильных дорог во многом зависит от воздействия на них многочисленных и разнообразных природных факторов, из которых наиболее существенное влияние оказывают: рельеф, почвенно-грунтовое, инженерно-геологическое и гидрогеологическое строение местности, климат, гидрологические и гидрометеорологические условия.

При общей оценке природных условий района проектирования трассы автомобильной дороги все многообразие природных факторов учитывают комплексно применительно к соответствующим ландшафтным зонам, характеризующимся определенным сочетанием этих природных факторов с учетом перспективы их изменения во времени. При этом особое внимание уделяют антропогенному воздействию на природные условия района проектирования (вырубка лесов, распашка склонов, искусственное орошение или осушение местности, гидротехническое строительство, строительство других инженерных объектов и т.д.). Учитывают также возможное негативное влияние строительства самой автомобильной дороги на окружающую среду.

Рельеф местности в огромной степени оказывает влияние на принципиальные инженерные решения, принимаемые при проектировании плана трассы, продольного профиля, поперечных профилей земляного полотна, объемы строительных работ и в конечном итоге не только на строительную стоимость автомобильной дороги, но и на

последующие транспортно-эксплуатационные расходы, а следовательно, и на экономическую эффективность инвестиций в дорожное строительство и, в частности, на сроки окупаемости капитальных вложений.

Применительно к проектированию дорог выделяют пять категорий рельефа по сложности дорожного строительства (табл. 13.1).

Таблица 13.1. Категории сложности рельефа

Категория сложности	Наименование рельефа	Характеристика рельефа
1	Равнинный	Равнины с широкими водоразделами, пологими склонами речных долин
2	Слабохолмистый	Местность с отдельными невысокими холмами и котловинами, пологими водоразделами, расчлененная редкими оврагами и балками
3	Сильно пересеченный	Сильно холмистая местность с пересеченным рельефом, узкими извилистыми водоразделами и большим числом лощин и оврагов. Предгорья и нижние части склонов гор. Места с густо расположенными сопками
4	Гористый	Склоны гор и предгорий с сильно расчлененным рельефом, узкими ущельями и долинами горных рек, большой крутизной склонов и русел водотоков
5	Горный	Чередующиеся хребты, извилистые горные ущелья с очень крутыми обрывистыми, сильно изрезанными горными склонами. Перевальные участки горных хребтов

Рельеф местности во многом определяет величины используемых продольных уклонов трассы и необходимость развития трассы автомобильной дороги по склонам и, следовательно, ее удлинение по сравнению с кратчайшим направлением по воздушной линии, определяет необходимость обхода затапливаемых и заболоченных мест. Чем более сложный рельеф, тем большие продольные уклоны трассы приходится допускать и тем более извилистой она оказывается:

Категории сложности рельефа	1	2	3	4	5
Коэффициент удлинения трассы	1,1	1,1—1,15	1,15—1,25	1,25—1,4	1,5

От рельефа местности во многом зависят количество поверхностных вод от выпадающих ливней и таяния снега на склонах водосборных бассейнов и размеры многочисленных малых мостов, водопропускных труб и других сооружений поверхностного дорожного водоотвода.

Особенности рельефа находят непосредственное отражение на стоимости автомобильных перевозок в процессе эксплуатации автомобильной дороги. Крутые и затяжные подъемы вызывают повышенный расход топлива и снижение скоростей транспортных потоков. Движение автотранспорта по участкам автомобильных дорог с большими продольными уклонами может характеризоваться высокой аварийностью, особенно в периоды скользкого покрытия (влажное и грязное покрытие, снежный накат, гололед и т.д.).

Особенности рельефа во многом связаны с инженерно-геологическим и гидрогеологическим строением местности. Наличие опасных инженерно-геологических процессов и явлений (осыпи, камнепады, оползни, процессы карстообразования и т.д.), во многом связанных с рельефом местности, обязательно учитывают при проектировании автомобильных дорог.

Геологические условия в районе проложения трассы существенно влияют на принимаемые принципиальные инженерные решения при проектировании автомобильных дорог, прежде всего на конструкции земляного полотна, дорожных одежд и на организацию строительства.

Участки местности с неустойчивыми поверхностными напластованиями (оползни, осыпи, карстовые образования, просадочные грунты и т.д.) в ряде случаев приходится обходить с соответствующим удлинением трассы автомобильных дорог либо предусматривать специальные, как правило, дорогостоящие инженерные мероприятия по обеспечению устойчивости земляного полотна и дорожных сооружений.

В ходе инженерно-геологических изысканий устанавливают наличие местных дорожно-строительных материалов — камня, песка, гравия, которым отдают предпочтение перед дорогами привозными материалами, что важно, учитывая высокую строительную стоимость автомобильных дорог.

Почвенно-грунтовые условия местности в районе проложения трассы автомобильной дороги влияют на принимаемые инженерные решения при проектировании земляного полотна и условия последующей эксплуатации дороги. Сильно заболоченные, засоленные участки местности, участки слабых и просадочных грунтов стараются обходить, а физико-механические свойства грунтов во многом опре-

деляют возвышение бровки земляного полотна над поверхностью земли и глубины водоотводных канав.

При проектировании дорожных одежд (назначении вариантов конструкции одежды) — этого самого дорогого и ответственного элемента автомобильных дорог, учитывают расчетные показатели прочности грунтов земляного полотна (модули упругости). В процессе эксплуатации автомобильных дорог почвенно-грунтовые условия во многом определяют возможность повреждения дорог пучинами, размыва водой откосов земляного полотна и водоотводных канав, ветровой эрозией.

Стоимость производства земляных работ составляет существенную часть строительной стоимости дороги в целом. Вид и прочностные показатели разрабатываемых грунтов влияют на выбор используемых дорожно-строительных машин и способы производства земляных работ при возведении земляного полотна.

Климатические условия оказывают большое влияние на организацию строительных работ и последующую эксплуатацию автомобильной дороги. К климатическим условиям, учитываемым при проектировании автомобильных дорог и сооружений на них, относят амплитуду и быстроту изменения температуры воздуха, минимумы и максимумы температуры, осадки и испарение, направления и скорости ветров, мощности снегового покрова, глубины сезонного промерзания грунтов, наличие вечномерзлых и многолетнемерзлых грунтов. Эти факторы учитывают при проектировании земляного полотна автомобильных дорог. Климатические условия часто ограничивают продолжительность строительного сезона в целом или по отдельным видам строительных работ, требуют специальных способов производства строительных работ, осложняющих и увеличивающих стоимость их выполнения.

В ходе зимней эксплуатации автомобильных дорог снегопады и метели могут резко осложнять условия движения транспортных потоков по дороге, вплоть до полного перерыва движения. Объемы снега, приносимые к дороге, зависят от ее расположения по отношению к господствующим в зимний период направлениям ветрам и величины бассейна снеговосбора. Гололед, резко уменьшая коэффициент сцепления шин автомобилей с покрытием, создает опасность дорожно-транспортных происшествий.

Закономерные процессы перемещения влаги в земляном полотне в течение годового цикла могут приводить к образованию ледяных линз в грунтовом основании дорожной одежды (пучин), которые в весенний период оттаивая вызывают переувлажнение грунтового осно-

вания дорожной одежды и существенное снижение его прочности, нередко сопровождаемое разрушением дорожной конструкции.

Для учета при проектировании автомобильных дорог изменения климатических условий в течение года строят график климатических характеристик района проложения трассы (рис. 13.1), на котором отмечают годовое изменение температуры воздуха, количество выпадающих осадков, глубины сезонного промерзания почв, высоты снегового покрова и другие характеристики, которые необходимо учитывать при проектировании элементов автомобильных дорог и организации строительства. Для планирования числа рабочих смен и расчета искусственного освещения строительных площадок на графике показывают продолжительность светлого периода суток, а также в зависимости от хода температуры воздуха отмечают периоды выполнения тех или иных видов строительных работ (земляные работы, устройство оснований дорожных одежд, устройство асфальтобетонных покрытий, сооружение цементобетонных покрытий, строительство малых мостов и труб и т.д.).

Следует иметь в виду, что в связи с закономерным развитием процессов механизации и индустриализации строительных работ, применения новых материалов и дорожных конструкций, а также новых технологий производства строительных работ влияние климатических факторов на организацию строительных процессов неуклонно снижается и, таким образом, проблема сезонности дорожно-строительных работ становится менее актуальной.

Гидрологические условия — увлажнения поверхностными водами и *гидрогеологические условия* — увлажнения грунтовыми водами учитывают при разработке проектов дорожного поверхностного и подземного водоотвода. Учитывая, что «вода — это злейший враг дороги», этому вопросу в проектах автомобильных дорог уделяют особое внимание. Условия поверхностного стока и испарения обязательно учитывают при проектировании. Осадки, выпадающие в виде снега и дождей, формируют быстрый поверхностный сток и относительно медленный подземный сток и требуют проектирования на дорогах большого количества водопропускных сооружений (водопропускных труб, малых, средних и больших мостов) и других сооружений поверхностного водоотвода (водоотводных канав — кюветов, нагорных канав, испарительных бассейнов). Особенности режима подземного стока учитывают, проектируя немалое количество закрытых дренажей различных конструкций, предназначенных для отвода и снижения уровня грунтовых вод и для перехвата подземных потоков.

При оценке влияния природных факторов на условия функционирования сооружений автомобильных дорог учитывают также и об-

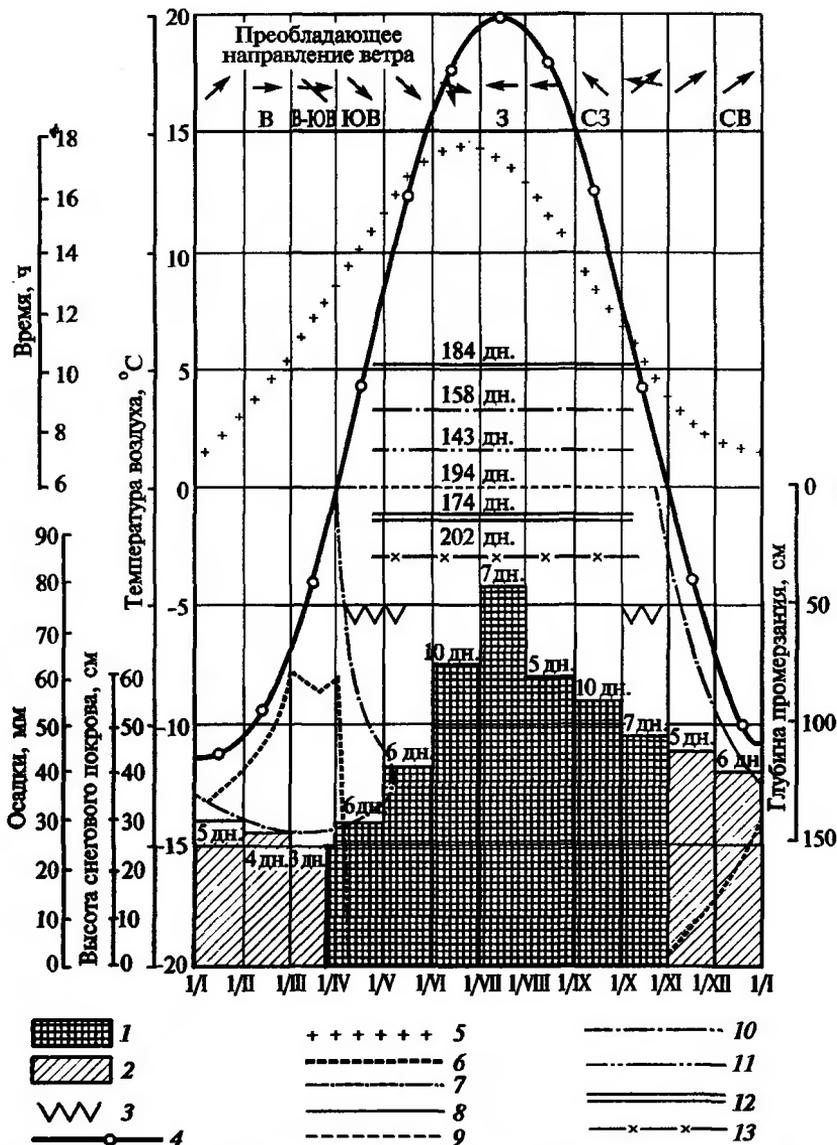


Рис. 13.1. График климатических характеристик района проложения дороги:

- 1 — осадки дождевые; 2 — осадки снеговые; 3 — периоды распутицы на грунтовых дорогах; 4 — температура; 5 — продолжительность светового периода дня; 6 — высота снежного покрова; 7 — глубина промерзания; 8 — период производства земляных работ и устройства оснований; 9 — постройка малых мостов и труб; 10 — постройка асфальтобетонных покрытий; 11 — постройка облегченных усовершенствованных покрытий; 12 — постройка цементобетонных покрытий; 13 — разработка притрассовых карьеров

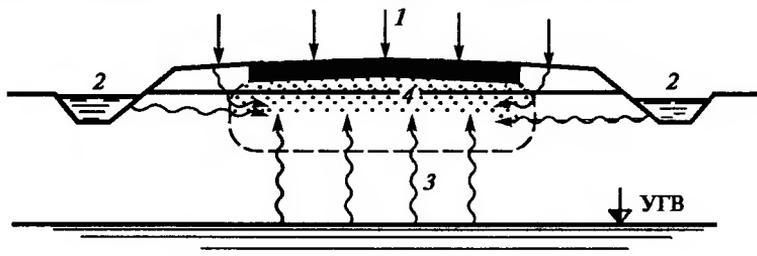
ратную связь — изменение природных условий в связи со строительством дороги. Так, вырубка леса на полосе отвода и расчистка придорожной полосы приводят к ее осушению, более глубокому промерзанию грунтов зимой и к более быстрому оттаиванию весной. Строительство дорог на косогорных участках местности может приводить к сильному изменению режима грунтовых вод и провоцировать появление опасных оползневых явлений и т.д.

13.2. Источники увлажнения земляного полотна

Закономерное увлажнение земляного полотна дорог — явление крайне неприятное прежде всего потому, что приводит к потере прочности грунтового основания дорожных одежд — этого наиболее дорогого элемента автомобильных дорог, что определяет, в конце концов, повреждения и преждевременное разрушение дорожной одежды. Насыщение влагой земляного полотна, кроме того, приводит к снижению устойчивости откосов высоких насыпей и глубоких выемок, что нередко сопровождается общими недопустимыми деформациями земляного полотна дорог (осадками, оползанием откосов насыпей и выемок, сползанием насыпей по косогорам и т.д.).

Переувлажнение грунтов земляного полотна происходит двумя путями: просачиванием поверхностных вод в тело насыпей и выемок и перемещением парообразной, капиллярной и пленочной влаги от поверхности грунтовых вод в вышележащие слои (рис. 13.2).

Поверхностная вода, образуемая в результате выпадения ливней и таяния снега, частично стекает по поверхности земли, а частично просачивается в глубь ее. Поверхность образовавшейся таким образом грунтовой воды, заполняющей поры грунта, представляет собой смягченную копию рельефа местности, поднимается под холма-



Р и с. 13.2. Источники увлажнения земляного полотна:

1 — атмосферные осадки; 2 — поверхностная вода; 3 — капиллярная влага от уровня грунтовых вод; 4 — парообразная влага

ми и снижается под низинами. В местах, где уровень грунтовых вод выходит на поверхность земли, появляются ключи и болота. На грун-товом профиле в плоскости направления течения воды поверхность грунтовых вод образует *кривую депрессии*, которая имеет тем больший уклон, чем менее водопроницаем грунт.

Промежутки между грунтовыми частицами, имеющие малые раз-меры, образуют тонкие каналы неправильной формы — капилляры, по которым под действием молекулярных сил вода поднимается вверх от уровня грунтовых вод. Одновременно от мест застоя воды на поверхности земли капиллярная вода опускается вниз и таким обра-зом в грунте образуются две зоны капиллярной воды: поднимающая-ся вверх от уровня грунтовых вод и подвешенная, не связанная с уров-нем грунтовых вод, а образующаяся у поверхности земли в результате выпадения атмосферных осадков.

Уровень, которого достигает капиллярная вода, поднимаясь от поверхности грунтовых вод, зависит от крупности грунтовых частиц и степени уплотнения грунта. В песчаных грунтах высота капиллярного поднятия невелика и обычно не превышает 30—50 см, в то время как в пылеватых грунтах может достигать нескольких метров.

С повышением уровня грунтовых вод повышается и уровень ка-пиллярного поднятия. Слой грунта выше уровня капиллярного под-нятия содержит воду в виде тончайших пленок, измеряемых долями микрона (пленочная, связанная вода), и, кроме того, в грунте нахо-дится влага в виде водяных паров, содержащихся в воздухе, который находится в порах между частицами.

Все виды грунтовой воды в земляном полотне в течение года не остаются в статическом равновесии. Под влиянием притока атмо-сферной влаги, при изменении температуры и атмосферного давле-ния происходят изменения уровней грунтовых вод и капиллярного поднятия, а также перемещение пленочной влаги и водяных паров из мест более теплых к местам более холодным.

Таким образом, источниками увлажнения земляного полотна до-рог являются: атмосферные осадки, выпадающие в виде дождей и об-разующиеся от таяния снега, капиллярное поднятие от уровня грун-товых вод, перемещение пленочной влаги по поверхности грунтовых частиц и конденсация водяных паров из воздуха.

В зависимости от климатических условий района строительства, местных условий и времени года могут преобладать те или иные причины увлажнения и меняться степень увлажнения земляного полотна.

13.3. Водно-тепловой режим земляного полотна

Под *водно-тепловым режимом* земляного полотна понимают закономерности изменения во времени температуры и влажности грунта под воздействием погодно-климатических факторов.

Изменения температуры и влажности в земляном полотне тесно связаны друг с другом и поэтому их рассматривают комплексно в виде вводно-теплого режима.

Общее количество влаги W в земляном полотне в течение годового цикла не остается постоянным, а закономерно меняется в соответствии с уравнением водного баланса:

$$W = (A + B + C) - (D + E + F), \quad (13.1)$$

где A — слой осадков, выпавших на земляное полотно; B — осадки, впитавшиеся в грунт земляного полотна; C — приток воды в земляное полотно от уровня грунтовых вод по капиллярам; D — сток воды с земляного полотна; E — количество испарившейся влаги; F — количество влаги, просочившейся из земляного полотна за то же время в нижележащие слои грунта.

Исследования профессоров Г.Д. Дубелира, Н.В. Орнатского, А.К. Бируля, Н.А. Пузакова, Г.М. Шахунянца, А.Я. Тулаева и других позволили изучить закономерности изменения температуры и влажности грунта в земляном полотне дорог в течение годового цикла.

Земляное полотно дорог (в насыпи или в выемке) имеет водно-тепловой режим, несколько отличный от водно-теплого режима грунтов прилегающих к дороге участков местности. Основным источником увлажнения грунтов земляного полотна являются атмосферные осадки, часть из которых стекает с земляного полотна по откосам и испаряется, а значительная их часть впитывается в грунт. В грунте вода перемещается в жидком или парообразном состоянии от мест более теплых к местам более холодным и из мест с большей упругостью паров в места с их меньшей упругостью.

Теловой обмен между грунтом земляного полотна автомобильных дорог и воздухом сильно отличается от теплового обмена грунтов прилегающей к дороге местности, поскольку теплопроводность и теплоемкость дорожных покрытий (асфальтобетонных и цементобетонных) и поверхности грунта за пределами дороги неодинаковы.

Подъем проезжей части над поверхностью земли в насыпях или опускание ее ниже поверхности земли в выемках ставят земляное полотно дорог в условия, сильно отличные от окружающей местности. И наконец, на грунт земляного полотна воздействуют через конст-

руктивные слои дорожных одежд различные статические и динамически нагрузки.

В процессе эксплуатации автомобильных дорог вода и снег систематически удаляются с проезжей части и обочин, в то время как на прилегающей местности они на продолжительное время сохраняются. Это приводит к тому, что земляное полотно дорог промерзает на большую глубину, чем грунт прилегающей местности.

В годовом цикле изменения температуры и влажности грунтов земляного полотна, по предложению проф. А.Я. Тулаева, различают следующие этапы: первоначальное накопление влаги осенью в результате просачивания в грунт дождевых осадков; промерзание земляного полотна и зимнее перераспределение влаги; оттаивание земляного полотна и весеннее переувлажнение грунта; летнее просыхание земляного полотна.

Характер водно-теплового режима земляного полотна в сильной степени зависит от местных климатических условий, поскольку влияния факторов, входящих в уравнение водного баланса (13.1), по-разному проявляются в разных климатических зонах, в зависимости от средней температуры воздуха. Поэтому при перемещении с севера на юг по территории РФ, с ростом средней температуры воздуха сильно меняется роль различных источников увлажнения земляного полотна.

Так, в северных районах, при сравнительно невысоких температурах окружающего воздуха и большом количестве выпадающих атмосферных осадков, в увлажнении земляного полотна определяющую роль играют атмосферные осадки и капиллярное поднятие влаги от грунтовых вод высокого залегания, при невысокой величине испарения.

При перемещении к югу водно-тепловой режим земляного полотна становится все более благоприятным: растет средняя температура воздуха, уменьшается количество выпадающих атмосферных осадков с одновременным ростом испарения, увеличивается глубина залегания грунтовых вод, снижается роль зимних температурных перемещений влаги. Поэтому в южных районах роль атмосферных осадков и грунтовых вод в изменении водного баланса земляного полотна заметно снижается, а роль парообразного перемещения влаги, напротив, повышается, при этом консистенция грунтов в основании дорожных одежд в весенний период становится все более плотной.

13.4. Прогноз пучинообразования

Температурное зимнее перемещение влаги в земляном полотне дорог при достаточно мощных источниках подпитывания вызывает повышенное влагонакопление в грунтовом основании дорожных

конструкций в виде ледяных прослоек и линз, известное под названием *пучин*.

Это опасное явление свойственно дорогам в лесной равнинной северной и средней зонах с неблагоприятными грунтовыми, гидрогеологическими и климатическими условиями.

Вследствие наличия мощных источников увлажнения (осадки, высокие уровни залегания грунтовых вод и недостаточное испарение) в пылеватых грунтах медленно и глубоко промерзающего земляного полотна происходит скопление и рост ледяных прослоек и линз, вызывающих увеличение объема грунта и неравномерное поднятие (вспучивание) поверхности покрытий до 10—25 см в виде бугров, ступеней и волнистости. Явление пучинообразования особенно ярко проявляется к концу периода с отрицательными температурами и может вызывать появления трещин в покрытиях. Весной, при оттаивании скоплений льда в земляном полотне, происходит переувлажнение грунтового основания с резкой потерей его несущей способности, в результате чего под воздействием транспорта, особенно с большими нагрузками на оси, образуются неравномерные просадки и проломы покрытий. Явление пучинообразования, даже не выраженное в явном виде, настолько снижает прочность дорожных конструкций, что это приводит к заметному снижению срока их службы. Поэтому при проектировании автомобильных дорог всегда предусматривают комплекс мероприятий по снижению последствий или полному устранению пучинообразования.

Первые исследования зимнего влагонакопления и пучинообразования в земляном полотне железных и автомобильных дорог в России были начаты еще во второй половине XIX столетия инж. В.И. Штукенбергом (1885) и проф. Р. Войславом (1891). В дальнейшем фундаментальные исследования зимнего влагонакопления и пучинообразования в земляном полотне дорог были выполнены проф. Н.А. Пузиковым, В.М. Сиденко, Н.В. Орнатским, М.Н. Гольдштейном и др.

Согласно этим исследованиям, в процессе промерзания в земляном полотне создается разность температур в пределах от 4—6° выше нуля на уровне грунтовых вод до отрицательных температур в зоне уже промерзшего грунта. В промерзшей толще грунта однако все еще происходит интенсивное перемещение влаги, поскольку капиллярная влага замерзает при температуре $-0,2$ °С, а пленочная (физически связанная) жидкость замерзает при еще более низких температурах порядка -3 °С. Процесс зимнего влагонакопления оказывается тем более ощутимым, чем дальше температура какого-либо слоя грунта находится в пределах от 0 до -3 °С.

Установлено, что при влажности ниже полной молекулярной, при которой капилляры начинают замыкаться кольцами менисков воды, перемещение влаги в замерзшем грунте происходит тремя путями:

в виде перемещения пленочной влаги, обволакивающей грунтовыми частицы, из мест с более высокой температурой и более толстыми пленками (где влажность больше) вверх в места более холодные, к кристаллам льда (где влажность меньше), пленки тоньше, а поверхностная энергия больше;

путем конденсации парообразной влаги на поверхности охлажденных грунтовых частиц, приносимой воздухом из нижних, теплых слоев при конвекционной циркуляции в порах грунта;

по тонким капиллярам, из которых незамерзшая вода перемещается в промерзшую часть грунта к центрам кристаллизации.

Растущие ледяные кристаллы, заполняя имеющиеся в грунте поры, образуют ледяные линзы и прослойки, раздвигающие грунтовые частицы, вызывают поднятие (пучение) поверхности грунта (рис. 13.3). При весеннем оттаивании грунта и сильном его увлажнении сопротивляемость грунта внешним нагрузкам заметно снижается, в результате чего на дорожных покрытиях возникают характерные деформации, прежде всего, связанные с проломами дорожной одежды (весеннее пучение).

Свободная и капиллярная влага замерзает в порах грунта при температурах, близких к 0°C , а пленочная замерзает и прекращает дви-

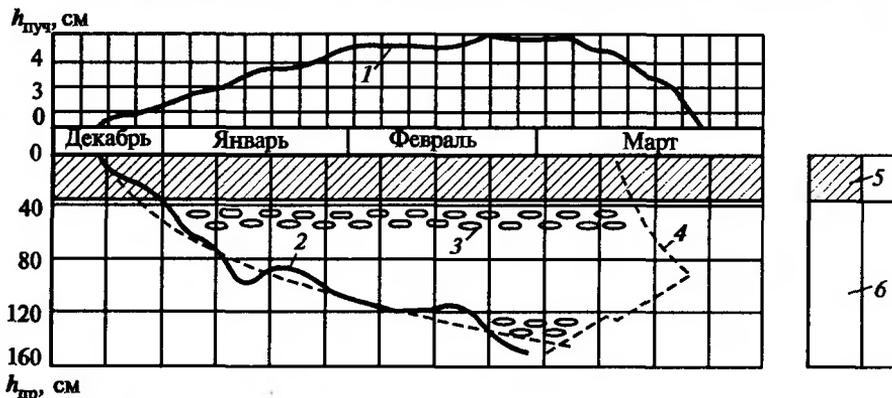
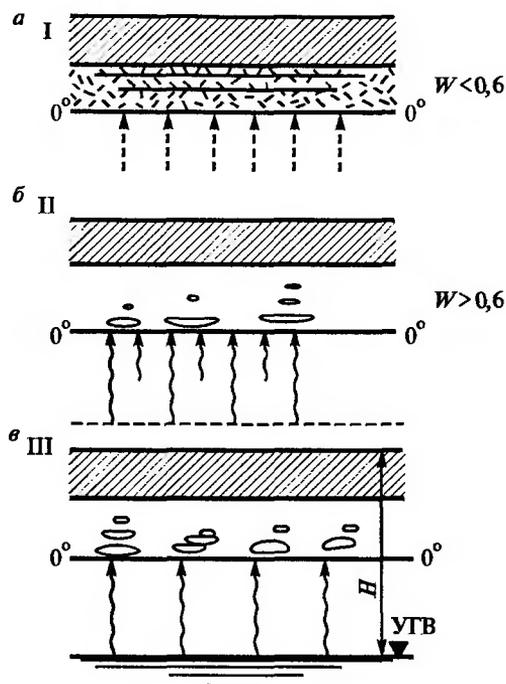


Рис. 13.3. Процесс промерзания и вспучивания грунта в течение зимнего периода:

1 — вспучивание дорожного покрытия; 2 — промерзание грунта земляного полотна; 3 — линзы льда; 4 — оттаивание грунта; 5 — дорожная конструкция; 6 — грунт земляного полотна



Р и с. 13.4. Три схемы притока влаги в зависимости от местных условий увлажнения:

a — сухие места; *б* — временно увлажненные места; *в* — постоянно увлажненные места

жение практически при минус -3°C . Таким образом, в замерзающем слое грунта с температурой от 0 до -3°C имеется лед и пленочная влага, перемещающаяся снизу вверх из мест более теплых к кристаллам и прослойкам льда в места более холодные, и это происходит до тех пор, пока температура в данном слое не опустится ниже той, при которой замерзает и пленочная влага.

Для определения общего количества влаги, накопившейся в земляном полотне в зимний период при различных источниках увлажнения, разработан ряд методов. Одним из наиболее простых и достаточно точных для практических расчетов является метод проф. Н.А. Пузакова.

В зависимости от местных условий увлажнения имеются три расчетные схемы притока влаги в мерзлый слой (рис. 13.4).

1. При относительно невысокой начальной влажности земляного полотна (сухие места) происходит перемещение влаги в зоне положительных температур в виде водяного пара. В сухих местах и засушли-

вых районах, при относительной влажности грунта менее 0,6, это перемещение парообразной влаги способно лишь поддерживать убыль пленочной жидкости и не создает накопления капиллярной влаги близ границы нулевых температур (рис. 13.4, а). Наблюдения за ходом промерзания грунта показывают, что глубина распространения H_t определенной отрицательной температуры t в грунте может быть определена по эмпирической зависимости:

$$H_t = \sqrt{2\alpha_t T}, \quad (13.2)$$

где α_t — коэффициент, зависящий от рассматриваемой температуры и климатических условий местности, $\text{см}^2/\text{сут}$; T — продолжительность промерзания, сут.

Значения α_t для каждой географической точки местности устанавливаются по данным многолетних наблюдений на метеорологических станциях. Как показывают лабораторные эксперименты, количество незамерзшей воды в грунте на изотерме -1°C близко к молекулярной влагоемкости W_0 , а на изотерме -3°C , при которой грунтовая влага практически утрачивает подвижность, — W_1 . Таким образом, разность $W_0 - W_1$ характеризует количество рыхло связанной воды, которая может перемещаться в грунте за счет температурных градиентов.

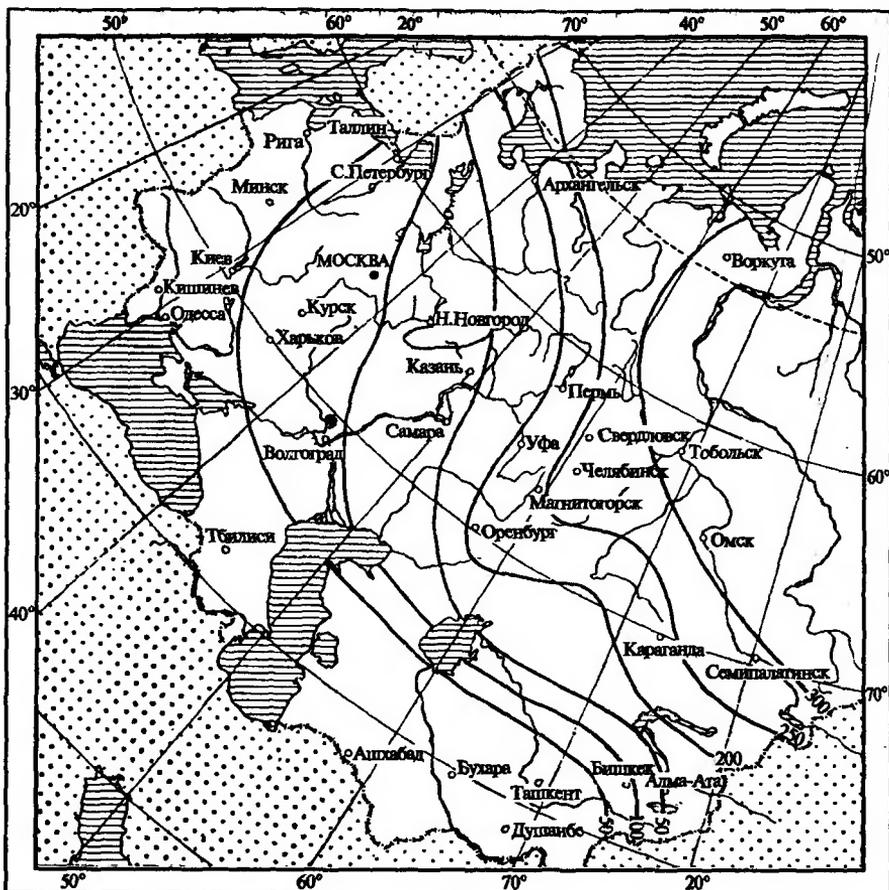
Средние значения α_t для изотермы -1°C , при которой практически начинает промерзать грунт, колеблется в пределах от $\alpha_t \leq 50 \text{ см}^2/\text{сут}$ в западных районах европейской части РФ, от 50 до $150 \text{ см}^2/\text{сут}$ — в центральных районах и более $\alpha_t \geq 150 \text{ см}^2/\text{сут}$ — для восточных (рис. 13.5).

Мощность мерзлой зоны, в пределах которой происходит зимнее перемещение влаги через T дней после начала промерзания (рис. 13.6, а), составляет:

$$L = H_{-1^\circ\text{C}} - H_{-3^\circ\text{C}} = (\sqrt{\alpha_{-1^\circ\text{C}}} - \sqrt{\alpha_{-3^\circ\text{C}}})\sqrt{2T}. \quad (13.3)$$

В период от начала промерзания до достижения критической глубины $h_{\text{кр}}$, на которой нагрузка от собственного веса промерзшего грунта и дорожной одежды практически прекращает приток воды, как следует из выражения (13.3), средний путь перемещения незамерзшей пленочной влаги (рис. 13.6, б) равен:

$$L_{\text{ср}} = \frac{L_0 + L_{T_{\text{кр}}}}{2} = \frac{\sqrt{2T_{\text{кр}}} (\sqrt{\alpha_{-1^\circ\text{C}}} - \sqrt{\alpha_{-3^\circ\text{C}}})}{2}. \quad (13.4)$$



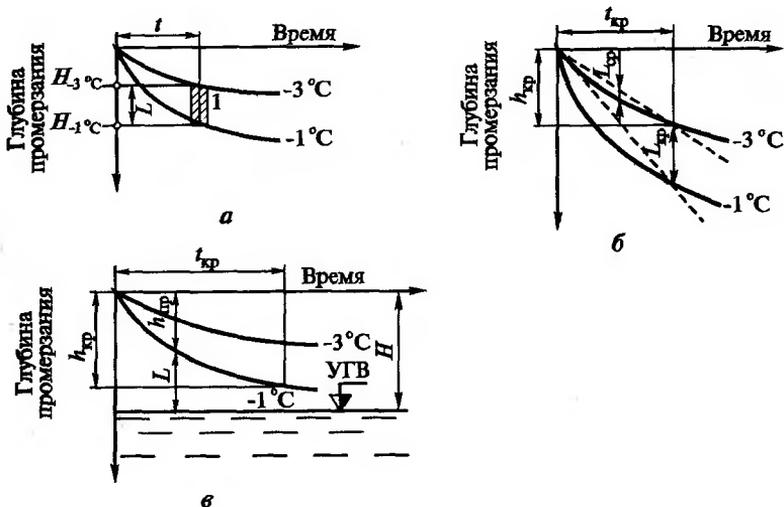
Р и с. 13.5. Карта изолиний климатического параметра $\alpha_{-1}C$ (по Н.А. Пузакову)

Значения критической глубины промерзания $h_{кр}$ для различных грунтов для средней части европейской территории РФ представлены в табл. 13.2.

Учитывая, что скорость перемещения пленочной влаги может быть выражена уравнением Дарси:

$$V = k_m \frac{W_0 - W_1}{L}, \quad (13.5)$$

где k_m — коэффициент молекулярной влагопроводности грунта, $см^2/сут$ (см. табл. 13.2).



Р и с. 13.6. Схемы к определению количества влаги, поступающей в зону промерзания:

а — изменение во времени мощности мерзлой зоны; *б* — средний путь перемещения незамерзающей влаги; *в* — путь перемещения в зоне капиллярного увлажнения

Тогда подставив выражение (13.4) в (13.5), окончательно получим скорость перемещения влаги:

$$V = \frac{k_m (W_0 - W_1)}{\sqrt{2T_{кр}} (\sqrt{\alpha_{-1^\circ\text{C}}} - \sqrt{\alpha_{-3^\circ\text{C}}})}$$

Отсюда количество влаги ($\text{см}^3/\text{см}^2$), поступившее в слой промерзшего грунта за период его промерзания $T_{кр}$:

$$Q_1 = \int_0^{T_{кр}} V dt = \int_0^{T_{кр}} \frac{k_m (W_0 - W_1)}{(\sqrt{\alpha_{-1^\circ\text{C}}} - \sqrt{\alpha_{-3^\circ\text{C}}}) \sqrt{2T_{кр}}} dt = \frac{1,4k_m (W_0 - W_1)}{(\sqrt{\alpha_{-1^\circ\text{C}}} - \sqrt{\alpha_{-3^\circ\text{C}}})} \sqrt{T_{кр}}. \quad (13.6)$$

2. В местах, где нет близко расположенных к поверхности грунтовых вод, но относительная влажность грунтового основания более 0,6, передвижение влаги в промерзшую зону происходит в капиллярном виде (рис. 13.4, б). Происходит процесс перехода части капиллярной влаги, находящейся в зоне положительных температур, в пленочную, которая перемещается в область более низких температур. Таким образом, постепенно весь столб капиллярной влаги подтягивается кверху и происходит переувлажнение верхнего слоя грунтового основания (рис. 13.6, в).

Сила, движущая влагу кверху, пропорциональна разности между начальной влажностью W_n и молекулярной W_0 . Разность $(W_n - W_0)$ представляет собой количество влаги, способной к передвижению под действием сил всасывания, которые появляются в капиллярной влаге при ее переходе в пленочную в процессе промерзания грунта. Приток капиллярной влаги в мерзлую зону, по Н.А. Пузакову, за период времени промерзания до критической глубины $T_{кр}$ составит:

$$Q_2 = 1,15(W_k - W_0) \sqrt{k_k T_{кр}}, \quad (13.7)$$

где k_k — коэффициент капиллярной влагопроводимости грунта (табл. 13.2), $\text{см}^2/\text{сут}$.

3. Согласно третьей расчетной схеме (рис. 13.4, в), верхние слои земляного полотна увлажняются капиллярной водой, поднимающихся от близко расположенной поверхности грунтовых вод, при этом путь перемещения капиллярной влаги L сокращается по мере роста глубины промерзания $h_{пр}$ (рис. 13.6, в), т.е. с приближением нулевой изотермы к уровню грунтовых вод.

Общее количество влаги, накопленное в промерзшем слое грунта за время $T_{кр}$, составит:

$$Q_3 = 2k_k \frac{W_k - W_0}{\alpha_{-1} \text{ } ^\circ\text{C}} \left(2,3 H \lg \frac{H}{H - \sqrt{2\alpha_{-1} \text{ } ^\circ\text{C} T_{кр}}} - \sqrt{2\alpha_{-1} \text{ } ^\circ\text{C} T_{кр}} \right), \quad (13.8)$$

где H — глубина залегания грунтовых вод от поверхности, см .

Т а б л и ц а 13.2. Характеристики грунтов для расчетов зимнего влагонакопления

Грунты	Критическая глубина промерзания $h_{кр}$, см	Коэффициент влагопроводимости		$W_k - W_0$	$k_k(W_0 - W_1)$
		молекулярной, $\text{см}^2/\text{сут}$	капиллярной, $\text{см}^2/\text{сут}$		
Глины	120—160	1,20	17,0	0,18	0,12
Суглинки	120—160	1,10	10,0	0,13	0,14
Пылеватые суглинки	140	1,20	—	—	0,14
Пылеватые супеси	120—130	2,80	7,1	0,10	0,31
Мелкие супеси	120	1,85	—	—	0,19
Супеси	120	1,70	6,6	0,05	0,17
Пылеватые пески	80	1,65	—	—	0,16

Зная количество воды, поступившей в промерзшую зону за время $T_{кр}$, можно для всех случаев увлажнения определить соответствующую высоту пучения:

$$f_{пуч} = 1,1Q. \quad (13.9)$$

Средние значения входящих в расчетные формулы параметров, по данным Н.А. Пузакова, представлены в табл. 13.2.

13.5. Дорожно-климатическое районирование

Как говорилось ранее, проектирование, строительство и эксплуатацию автомобильных дорог в существенной мере определяет водо-тепловой режим земляного полотна, который, в свою очередь, зависит от климатических, почвенно-грунтовых и гидрологических условий, сильно меняющихся на обширной территории РФ. Все это не позволяет проектировать земляное полотно автомобильных дорог и дорожные одежды во всех районах страны по единым правилам. Поэтому территорию РФ делят на *дорожно-климатические зоны*, каждая из которых характеризуется некоторой общностью климатических, гидрологических и геоморфологических условий. Следствием определенного постоянства в пределах каждой дорожно-климатической зоны тепла и влаги являются примерно одинаковые типы почв, условия увлажнения и растительность.

Поскольку климатические условия на земной поверхности подчиняются определенной закономерности, в основу дорожно-климатического районирования было положено учение о географических ландшафтах и ландшафтных зонах (по акад. Л.С. Бергу), с рядом поправок в их границах.

Сопоставление карт дорожно-климатического районирования со схемой распространения различных типов почв и с картами ландшафтных, естественно-исторических зон на территории бывшего СССР, по Л.С. Бергу (рис. 13.7), показывает, что они достаточно хорошо согласуются между собой.

По дорожно-климатическому районированию территорию РФ делят на пять зон (рис. 13.8):

I — зона *распространения вечномерзлых и многолетнемерзлых грунтов* — севернее линии Мончегорск — Поной — Несь — Ошкурья — Сухая Тунгуска — Канск — Государственная граница и Биробиджан — Де-Кастри.

Эта зона включает зоны тундры, лесотундры и северо-восточную часть лесной зоны. Включает районы распространения вечномерзлых и многолетнемерзлых грунтов и характеризуется сильным пере-

Р и с. 13.7. Дорожно-климатические и почвенные зоны европейской части бывшего СССР:

1 — тундровые почвы; 2 — подзолистые и заболоченные почвы; 3 — горно-лесные подзолистые почвы; 4 — дерновые перегнойно-карбонатные почвы; 5 — серые лесные земли и другие почвы лесостепи; 6 — черноземные почвы; 7 — каштановые почвы и солонцы; 8 — бурые почвы, солонцы и развесаемые пески; 9 — буроземы южных лиственных лесов; 10 — красноземы, желтоземы и субтропические подзолистые почвы. Римские цифры обозначают номера дорожно-климатических зон

увлажнением верхних слоев грунта. Просачивание воды вглубь ограничено в связи с наличием вблизи от поверхности мерзлого грунта. Испарение незначительно в связи с низкими температурами и кратковременностью теплого периода года.

II — зона *избыточного увлажнения* — к югу от границы зоны I до линии Львов — Житомир — Калуга — Нижний Новгород — Ижевск — Кыштым — Тобольск — Томск — Канск и далее на участке южнее I зоны до Государственной границы с КНР, включая также Сахалин и южную часть Камчатки.

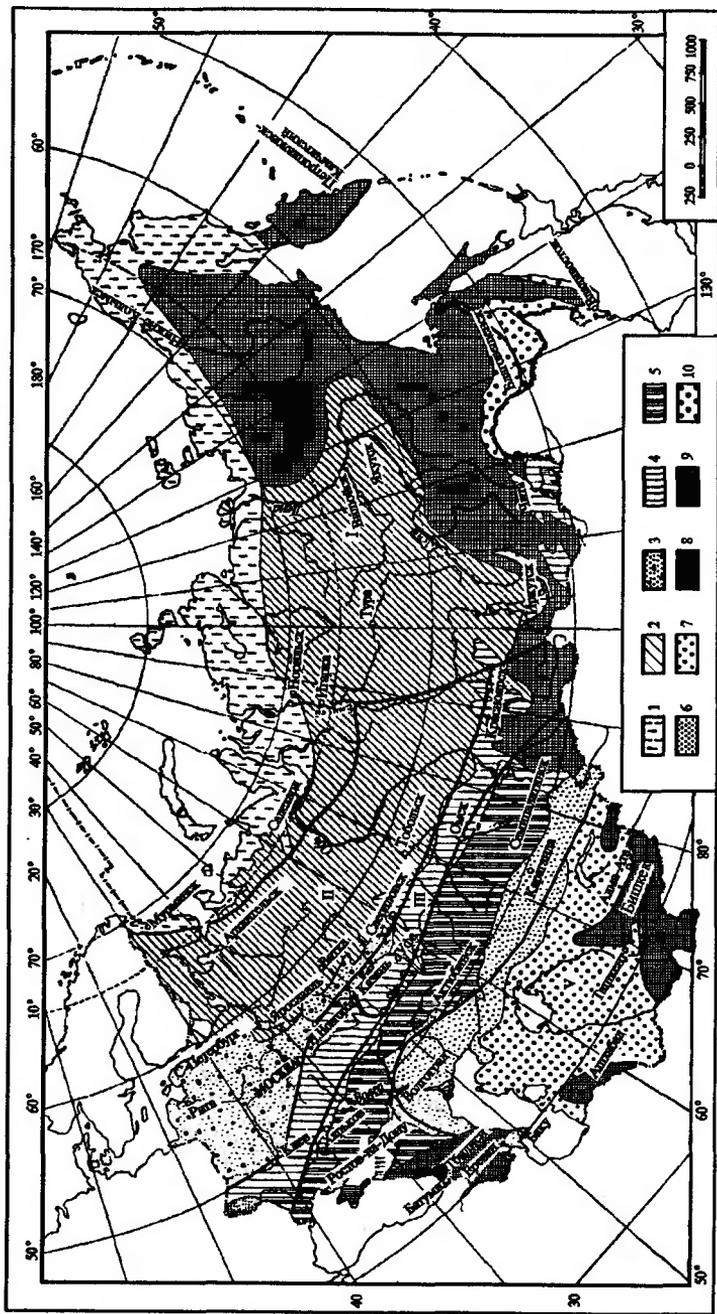
II дорожно-климатическая зона характеризуется избыточным увлажнением грунтов в связи с большим количеством выпадающих атмосферных осадков, относительно малой испаряемостью и высоким положением уровней грунтовых вод. Зона характеризуется таежными и смешанными лесами и почвами подзолистого типа. В отличие от других дорожно-климатических зон II зона включает значительную часть территории РФ с резко различными климатическими условиями, поэтому в дальнейшем в ее пределах предполагается выделить самостоятельные подзоны.

III — зона *значительного увлажнения* — ограничивается с юга линией Кировоград — Белгород — Самара — Магнитогорск — Омск — Бийск — Туран. В нее входят также Ставрополье и западная часть Северного Кавказа.

В пределах III зоны распространены оподзоленные лесостепные почвы и выщелоченные черноземы. Зона характеризуется избыточным увлажнением в весенние и осенние периоды. Испарение играет существенную роль в водно-тепловом режиме земляного полотна. Уровни грунтовых вод располагаются достаточно глубоко.

IV — зона *недостаточного увлажнения* — к югу от границы зоны III и до северной границы зоны V. К зоне IV относится Черноморское побережье Кавказа и степи Северного Кавказа.

Территории зоны покрыты черноземами, а в южной части каштановыми почвами. В северной части зона относится к лесостепи, в южной — к степи. Характеризуется умеренной влажностью верхних слоев грунта, значительной испаряемостью и относительно небольшим



Р и с. 13.8. Ландшафтное районирование территории бывшего СССР (по акад. Л.С. Бергу) и дорожно-климатическое районирование:

1 — тундра; 2 — тайга; 3 — смешанный лес; 4 — лесостепь; 5 — степь; 6 — полупустыня; 7 — пустыня; 8 — субтропики; 9 — горные районы; 10 — широколиственные и смешанные леса

количеством атмосферных осадков. Грунтовые воды располагаются на большой глубине.

V — *засушливая зона* — юго-восточнее линии Джульфа — Степанакерт — Буйнакск — Кизляр — Волгоград и далее южнее на 200 км линии Уральск — Актюбинск — Караганда до северного побережья оз. Балхаш.

Зона характеризуется незначительным увлажнением грунтов вследствие малого количества атмосферных осадков, высокой испаряемостью и очень глубоким залеганием уровней грунтовых вод. Однако на участках искусственного орошения в весенний период земляное полотно может переувлажняться. Зона V примерно совпадает с ландшафтной зоной сухих степей и полупустынь, характеризуемых распространением бурых и каштановых почв с включением части солонцов и солончаков.

В направлении с северо-запада на юго-восток европейской части РФ роль поверхностного увлажнения уменьшается, возрастает интенсивность испарения и увеличивается глубина залегания грунтовых вод (рис. 13.9).

Высокогорные районы Северного Кавказа и Средней Азии не охватываются дорожно-климатическим районированием, поскольку климат, расположение растительности и почв, а также условия увлажнения в этих районах подчиняются высотной зональности.

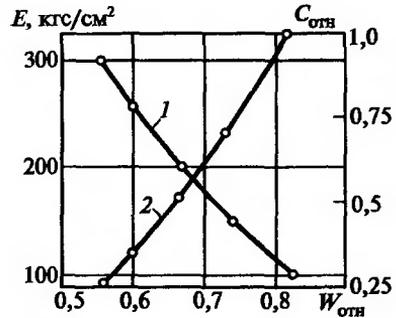
13.6. Обоснование возвышения бровки земляного полотна над поверхностью грунта

Земляное полотно автомобильной дороги, воспринимающее на себя все внешние нагрузки, включая вес проходящих транспортных средств, вес дорожной одежды и собственный вес, сопротивляется этим нагрузкам тем в большей степени, чем меньше его влажность. Однако прочность грунтов земляного полотна, в сильной степени зависящее от их влажности, существенно меняется в течение каждого годового цикла. Именно поэтому обеспечение относительного постоянства водного режима земляного полотна является важным показателем надежности работы дорожных одежд и обеспечивает необходимые транспортно-эксплуатационные качества дорог в течение расчетных межремонтных сроков.

Основными инженерными мероприятиями для этого являются различные способы предотвращения проникновения в верхние слои земляного полотна капиллярной влаги от уровня грунтовых вод и из мест застоя поверхностных вод при необеспеченном водоотводе.

Рис. 13.10. Влияние влажности грунтового основания на величину его модуля деформации и относительной стоимости дорожной одежды:

1 — модуль деформации; 2 — относительная стоимость. Влажность выражена в долях влажности, соответствующей наиболее неблагоприятной степени увлажнения за расчетный срок службы дорожной одежды



Преобладающие источники увлажнения верхних слоев земляного полотна и продолжительность их действия неодинаковые в разных дорожно-климатических зонах, поскольку зависят от гидрологических, гидрогеологических и климатических условий района проектирования дороги. В северных районах избыточного увлажнения при высоких уровнях грунтовых вод и большом количестве атмосферных осадков верхние слои земляного полотна (относительно невысоких насыпей) часто могут находиться в переувлажненном состоянии. В южных засушливых районах при относительно небольшом количестве выпадающих осадков и высокой испаряемости земляное полотно работает в условиях невысокой степени увлажнения в течение значительных отрезков времени.

Чем выше высота насыпи, тем больше путь прохождения капиллярной влаги в период зимнего влагонакопления и в периоды весеннего и летне-осеннего увлажнения местности, тем меньше влажность верхних слоев земляного полотна и тем выше сопротивляемость грунтов рабочего слоя нагрузкам (рис. 13.10).

Очевидно, при высоких насыпях можно, в связи с этим, снизить материалоемкость и стоимость дорожных конструкций, однако за счет увеличения объемов земляных работ и стоимости строительства земляного полотна. В действующих строительных нормах и правилах СНиП 2.05.02—85* определены наиболее рациональные высоты насыпей — возвышения поверхности покрытия проезжей части над уровнем грунтовых или длительно стоящих поверхностных вод в разных дорожно-климатических зонах (табл. 13.3).

Необходимое возвышение бровки земляного полотна обеспечивают также над уровнем снегового покрова 5% вероятности превышения, определяемого по данным многолетних наблюдений на ближайших к объекту проектирования метеорологических станциях. Минимальное возвышение проезжей части над уровнем снегового покрова для предотвращения снежных заносов дороги во время метелей, зави-

сущее от ширины земляного полотна (категории дороги), определяют как:

$$H = h_{\text{сн}5\%} + \Delta, \quad (13.10)$$

где H — минимальная высота снегонезаносимой насыпи, м; $h_{\text{сн}5\%}$ — расчетная высота снегового покрова вероятностью превышения 5%, м, определяемая по данным многолетних наблюдений ближайшей метеостанции или упрощенно с использованием метеорологических справочников; Δ — возвышение бровки насыпи над расчетным уровнем снегового покрова, необходимое для ее снегонезаносимости, м, определяемое в зависимости от ширины земляного полотна (категории дороги):

Категория дороги	I	II	III	IV	V
Возвышение бровки, м	1,2	0,7	0,6	0,5	0,4

Таблица 13.3. Наименьшее возвышение поверхности покрытия над уровнями грунтовых и длительно стоящих поверхностных вод

Грунт рабочего слоя	Наименьшее возвышение поверхности покрытия, м, в дорожно-климатических зонах			
	I-II	III	IV	V
Песок мелкий, супесь легкая крупная, супесь легкая	1,1	0,9	0,75	0,5
	0,9	0,7	0,55	0,3
Песок пылеватый, супесь пылеватая	1,5	1,2	1,1	0,8
	1,2	1,0	0,8	0,5
Суглинок легкий, суглинок тяжелый, глина	2,2	1,8	1,5	1,1
	1,6	1,4	1,1	0,8
Супесь тяжелая пылеватая, суглинок легкий пылеватый, суглинок тяжелый пылеватый	2,4	2,1	1,8	1,2
	1,8	1,5	1,3	0,8

Примечания: 1. В числителе — возвышение поверхности покрытия над уровнем грунтовых вод, верховодки или уровнем длительно (более 30 суток) стоящих поверхностных вод. 2. В знаменателе — то же, над поверхностью земли на участках с необеспеченным поверхностным стоком или над уровнем кратковременно (менее 30 суток) стоящих поверхностных вод.

Руководящую рабочую отметку при проектировании продольного профиля дорог принимают большей из двух определенных из условия необходимого возвышения поверхности покрытия над уровнем грунтовых и поверхностных вод и из условия снегонезаносимости.

13.7. Регулирование водно-теплового режима земляного полотна

В тех случаях, когда при проектировании земляного полотна оказывается невозможным обеспечить необходимый водно-тепловой режим верхней его части поднятием до необходимой высоты бровки насыпи (на участках пересечений и примыканий дорог в одном и разных уровнях, в населенных пунктах, когда высота насыпей регламентируется условиями существующей застройки, на пересечениях железных дорог в одном уровне и т.д.), предусматривают инженерные мероприятия по обеспечению прочности и устойчивости рабочего слоя земляного полотна посредством регулирования водно-теплового режима либо усиления дорожной конструкции:

устройство морозозащитных слоев;

регулирование водно-теплового режима земляного полотна с помощью гидроизолирующих, теплоизолирующих, дренирующих или капиллярпрерывающих прослоек;

укрепление и улучшение грунта рабочего слоя с использованием вяжущих, гранулометрических добавок и т.д.;

применение армирующих прослоек;

понижение уровней грунтовых вод с помощью дренажа;

применение специальных типов поперечных профилей земляного полотна;

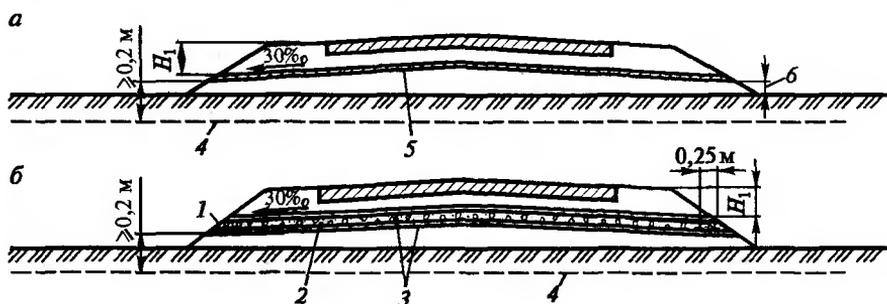
сооружение дорожных одежд с технологическими перерывами или в две стадии.

Наиболее часто для создания благоприятного водного режима верхней части земляного полотна прибегают к устройству внутри его изолирующих прослоек, прерывающих перемещение влаги. Однако ниже прослоек нередко грунт остается в сильно переувлажненном состоянии.

Обычно прослойки устраивают двух видов (рис. 13.11):

водонепроницаемые толщиной 3—8 см из грунта, обработанного битумом или из других гидрофобных материалов, полиэтиленовых пленок, толя или рубероида. Эти прослойки прерывают как капиллярное, так и плечное и парообразное перемещение влаги;

капиллярпрерывающие, устраиваемые из крупнозернистого хорошо фильтрующего материала (гравия, щебня или гравийно-песчаной смеси), общей толщиной 15—20 см. Для предотвращения заиливания прослоек более мелкими частицами их изолируют сверху и снизу слоями грунта из крупного песка, супеси или мелкого гравия, задерживающими мелкие частицы.



Р и с. 13.11. Влагопрерывающие прослойки земляного полотна:

a — водонепроницаемые; *б* — капилляропрерывающие; 1 — щебень; 2 — крупнозернистая прослойка; 3 — противозаиливающие прослойки; 4 — уровень грунтовых вод; 5 — слой грунта, обработанного вяжущими органическими материалами, или прослойка из водонепроницаемых материалов; *б* — возвышение над горизонтом поверхностных вод не менее 0,2 м

Водонепроницаемые прослойки устраивают на дорогах в IV—V дорожно-климатических зонах, где грунтовые воды залегают глубоко и увлажнение земляного полотна происходит в результате парообразного перемещения и конденсации влаги.

Капилляропрерывающие прослойки устраивают на дорогах во II и III дорожно-климатических зонах.

Прослойки обычно устраивают сквозными на всю шину земляного полотна. Низ их размещают на высоте не менее 20 см от дна кюветов или других источников увлажнения.

Верх прослоек располагают от поверхности покрытий проезжей части на глубине:

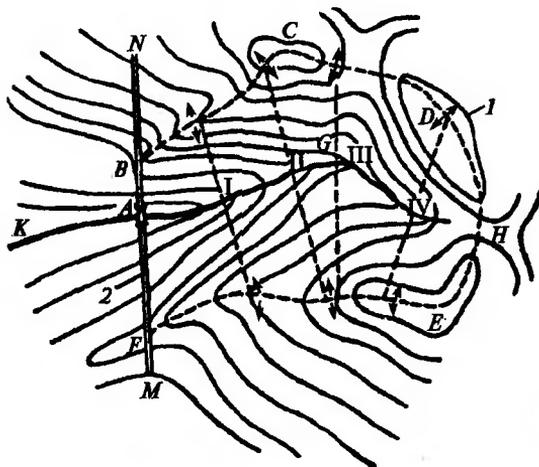
Дорожно-климатическая зона	I	III	IV	V
Глубина заложения верха прослоек, м . . .	0,90	0,80	0,75	0,65

Глава 14

ПРОГНОЗ ПОВЕРХНОСТНОГО СТОКА С ВОДОСБОРОВ

14.1. Виды поверхностного стока

Опаснейшим природным явлением для функционирования сооружений автомобильных дорог является поверхностный сток с водосборов. Поверхностный сток для данного конкретного сечения земной поверхности формируется на определенной площади, называемой *водосбором (бассейном)*.



Р и с. 14.1. Пример определения площади водосбора по топографической карте:

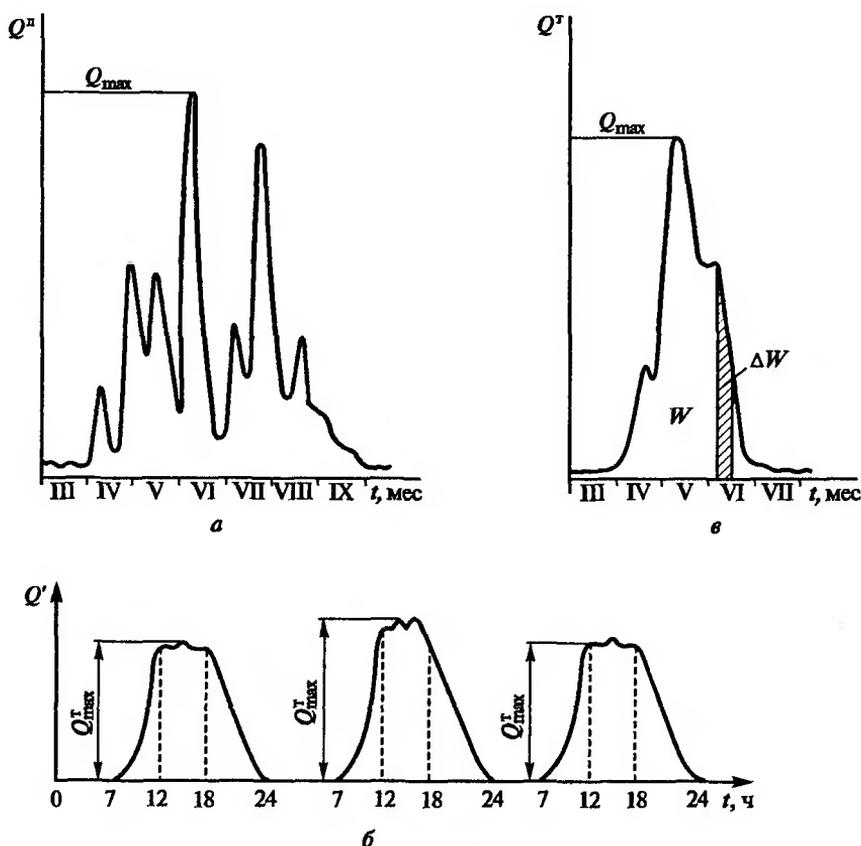
1 — водораздел; 2 — дорога; I–IV — линии деления бассейна на элементарные фигуры

Линию на местности, от которой вода стекает вправо и влево, называют *водоразделом*. Очевидно, что водосбор, или бассейн, представляет собой площадь, оконтуренную водораздельными линиями и замыкающим створом (осью дороги), с которой происходит сток поверхностных вод. Определить положение водосбора и его площадь проще всего по топографическим картам (рис. 14.1) или материалам аэрокосмических съемок.

Чем больше площадь водосбора, тем больший секундный приток поверхностных вод Q ($\text{м}^3/\text{с}$) и тем больший объем стока W (м^3) следует ожидать в замыкающем створе. Наиболее полно поверхностный сток можно охарактеризовать его *гидрографом* — графиком изменения расхода воды в данном створе во времени (рис. 14.2).

По гидрографу стока определяют важнейшие его показатели, используемые в дальнейшем для проектирования всех сооружений поверхностного водоотвода и водопропускных сооружений на дорогах, такие как максимальный расход Q_{max} , объем стока W , продолжительность стока $t_{\text{пав}}$, форму гидрографа, характеризующую его полнотой P , и относительное время подъема паводка f .

Поверхностный сток, формирующийся в результате выпадения интенсивных дождей — ливней, называют стоком *ливневых вод*. Сток ливневых вод приурочен к теплomu времени года, но совершенно не представляется возможным назвать месяц и день, когда его следует ожидать. Ливневой сток кратковремен, но интенсивен и происходит по впитываемой почве, которая поглощает большую часть его объема.



Р и с. 14.2. Гидрографы стока с водосборов:

a — ливневых вод; *б* — талых вод с малых водосборов; *в* — талых вод с больших водосборов

В среднем около 90% дождей полностью впитываются в почву и не дают поверхностного стока. Дожди, дающие поверхностный сток, называют *ливнями*.

По гидрографу ливневого стока $Q_n = f(t)$ (см. рис. 14.2, *a*) устанавливают: максимальный ливневой расход Q_{\max}^n как наибольшую ординату расчетного гидрографа; расчетный объем стока W_n как площадь гидрографа; общую продолжительность ливневого паводка $t_{\text{пав}}$; форму гидрографа $\Pi = \frac{Q_{\text{ср}}}{Q_{\max}^n}$ как отношение средней его высоты к макси-

мальной — полноту; относительное время подъема паводка $f = \frac{t_{\text{пл}}}{t_{\text{пав}}}$ как

отношение времени подъема к общей продолжительности ливневого паводка.

Поверхностный сток, формирующийся в результате таяния снега на поверхности водосбора в весенний период, называют стоком *талых вод*. Сток талых вод обычно приурочен к определенному времени года и происходит по мерзлomu грунту практически без впитывания.

Гидрографы стока талых вод $Q_T = f(t)$ для сравнительно небольших площадей водосбора до $F = 50-100 \text{ км}^2$ (см. рис. 14.2, б) многомодальны и наблюдаются практически каждый день в течение всего периода снеготаяния. По гидрографам стока талых вод устанавливают прежде всего величину максимального расхода Q_{max}^T и расчетный объем стока талых вод W_T .

В пределах Российской Федерации на каждом водосборе может формироваться как сток ливневых, так и сток талых вод. При проектировании тех или иных сооружений автомобильных дорог принимают в качестве расчетного сток того происхождения, который оказывается наиболее опасным для функционирования этих сооружений.

Для средней полосы РФ на водосборах разной площади F (км^2) могут превалировать максимальные расходы различного происхождения или ливневого Q_{max}^L , или стока талых вод Q_{max}^T (рис. 14.3).

При относительно малых площадях водосбора до $F = 50-100 \text{ км}^2$ обычно превалирует сток ливневых вод и такие водосборы принято называть *малыми*, что связано с максимальными площадями ливневых туч, которые могут сформироваться в этих регионах. При больших площадях водосбора начинает превалировать сток талых вод, при этом гидрограф стока талых вод становится одномодальным и

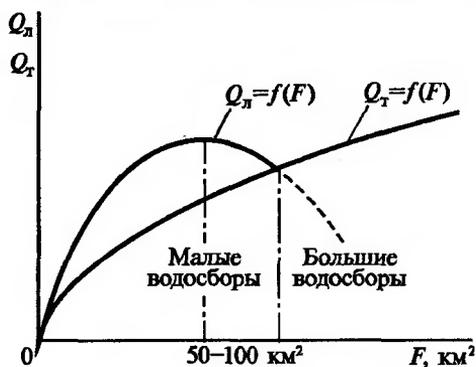


Рис. 14.3. Максимальный сток различного происхождения в зависимости от площади водосбора в средней полосе РФ

сток происходит непрерывно в течение всего периода снеготаяния (см. рис. 14.2, *в*). Такие водосборы называют *большими*.

В районах с сезонным выпадением дождей (субтропики Черноморского побережья Кавказа, Приморье Дальнего Востока и т.д.) в связи с огромными площадями ливневых туч (например, в бассейне на р. Хор постами гидрометеослужбы был зафиксирован ливень, который шел одновременно на площади $F = 10\,000\text{ км}^2$) сток ливневых вод превалирует и на водосборах со значительными площадями.

14.2. Расчет ливневого стока с малых водосборов

Количество воды, притекающее к дорожным сооружениям с малых водосборов в ходе стока, поддается теоретическим расчетам. Однако, учитывая исключительную сложность этого природного явления, все используемые в настоящее время и использовавшиеся в прошлом методы расчета стока строились с определенной долей схематизации. Именно поэтому расчеты ливневого стока производят по установленным нормам, т.е. с одинаковой схематизацией для всех водосборов и со стандартной оценкой метеорологических факторов формирования стока в конкретных географических районах.

На основе обобщения выполненных многолетних теоретических и натурных исследований проф. О.В. Андреев сформулировал основные положения, которые должны быть положены в основу любых разрабатываемых норм стока:

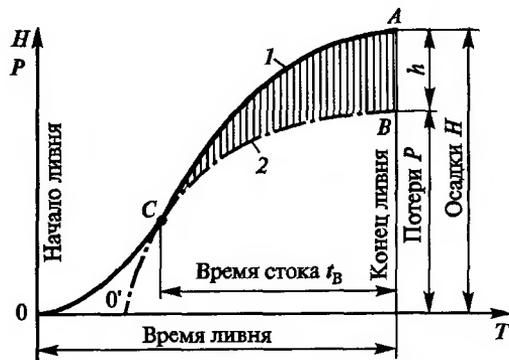
нормы стока должны давать возможность определения максимальных расходов Q_{\max}^n и соответствующих объемов стока W_n с любой вероятностью превышения (ВП) в любых климатических и топографических условиях;

теория и нормы стока должны проверяться по материалам натуральных наблюдений по парам: осадки — сток (обычно считают, что ВП расходов и объемов стока та же, что и основных стокообразующих факторов, т.е. ливней, вызывающих сток);

слой стока h должен определяться как разность между слоем выпавших осадков H и потерь на впитывание за время дождя P (рис. 14.4):

$$h = H - P. \quad (14.1)$$

В общих формулах ливневого стока часто выражение (14.1) заменяют на:



Р и с. 14.4. Схематический график к определению слоя стока:

1 — кривая хода дождя; 2 — кривая хода впитывания

$$h = \alpha H,$$

где α — коэффициент стока ($\alpha \leq 1$), зависящий от вида грунта на поверхности водосбора;

объем стока на любой момент времени определяется зависимостью:

$$W_n = \int_0^t Q_t dt = (h - z) F \gamma,$$

где Q_t — расход в t -й момент времени; h — слой стока; z — потери стока на заполнение неровностей микрорельефа; γ — коэффициент, учитывающий неравномерность выпадения осадков по площади F ;

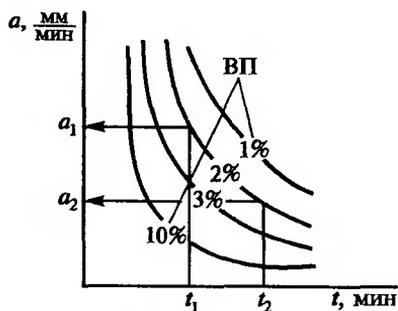
максимальный расход ливневого паводка находят как наибольшую ординату гидрографа $Q_n = f(t)$ на основе решения уравнения баланса стока:

$$W_t = W_{лн} + W_{ск} + W_{от},$$

где W_t — общий объем стока на момент времени t ; $W_{лн}$ — объем стока в логу соответственно; $W_{ск}$ — объем стока на склонах; $W_{от}$ — объем стока, уже прошедший через замыкающий створ водосбора.

Таким образом, физическая схема построения норм стока должна основываться на раздельном рассмотрении гидрологических и гидравлических факторов формирования стока.

На основе обработки громадного по объему натурального материала по ходу ливней во времени (*плювиограмм*) установлена следующая связь предельной интенсивности ливня a (мм/мин) с его продолжительностью t (мин):



Р и с. 14.5. Связь интенсивности ливня различной ВП a (мм/мин) с его продолжительностью t (мин)

$$a_{p\%} = \frac{K_{p\%}}{t^{2/3}}, \quad (14.2)$$

где $K_{p\%}$ — климатический коэффициент; $p\%$ — вероятность превышения ливня.

Как следует из выражения (14.2), для одного и того же климатического района имеется бесчисленное множество ливней одной и той же вероятности превышения (ВП), но характеризующихся различной продолжительностью и соответствующей ей предельной интенсивностью выпадения осадков (рис. 14.5).

Какой же ливень заданной ВП для каждого конкретного водосбора является наиболее опасным? В 1851 г. ирландский инженер Мальвани сформулировал принцип «предельных интенсивностей», согласно которому для каждого водосбора наиболее опасным является ливень с продолжительностью t (мин), равной времени добега воды от наиболее удаленной точки водосбора до замыкающего створа.

Одним из распространенных методов расчета ливневого стока, основанных на принципе «предельных интенсивностей», является метод О.В. Андреева — А.Ф. Шахидова¹:

$$Q_{\max}^n = 16,7 a_{\text{ч}} K_i F \alpha \varphi, \text{ м}^3/\text{с}, \quad (14.3)$$

где F — площадь водосбора, км²; $a_{\text{ч}}$ — интенсивность ливня часовой продолжительности по данным проф. Б.Ф. Перевозникова (табл. 14.1, рис. 14.6), мм/мин. Эти ливни имеют хорошую обоснованность натурными данными:

α — коэффициент потерь стока (табл. 14.2);

¹ См. методическую разработку по расчету ливневого стока с малых водосборов.

Таблица 14.1. Интенсивности ливней a_c

Районы	Интенсивность ливня часовой продолжительности, мм/мин. при ВП							
	10	5	4	3	2	1	0,3	0,1
1	0,27	0,27	0,29	0,32	0,34	0,40	0,49	0,57
2	0,29	0,36	0,39	0,42	0,45	0,50	0,61	0,75
3	0,29	0,41	0,47	0,52	0,58	0,70	0,95	1,15
4	0,45	0,59	0,64	0,69	0,74	0,90	1,14	1,32
5	0,46	0,62	0,69	0,75	0,82	0,97	1,26	1,48
6	0,49	0,65	0,73	0,81	0,89	1,01	1,46	1,79
7	0,54	0,74	0,82	0,89	0,97	1,15	1,50	1,77
8	0,79	0,98	1,07	1,15	1,24	1,41	1,78	2,07
9	0,81	1,02	1,11	1,20	1,28	1,48	1,83	2,14
10	0,82	1,11	1,23	1,35	1,46	1,74	2,25	2,65

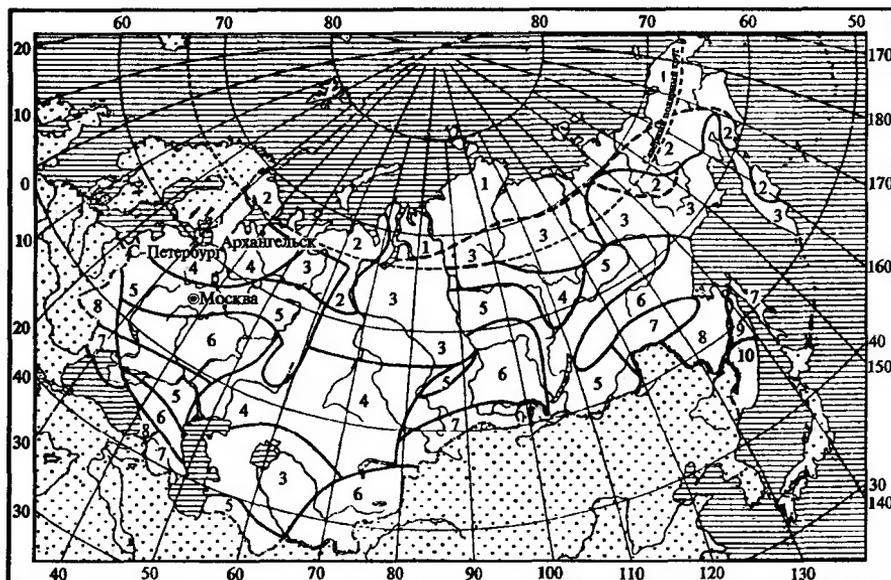


Рис. 14.6. Карта-схема ливневых районов РФ и стран СНГ

Т а б л и ц а 14.2. Коэффициенты потерь стока α

Вид и характер поверхности	Коэффициент α при F (км ²)		
	$\leq 0,1$	0,1—10	10—100
Асфальт, скала без трещин, бетон	1	1	1
Жирная глина, такыры и такыровые почвы	0,80—0,95	0,65—0,95	0,65—0,90
Суглинки, подзолы, подзолистые и серые лесные суглинки, сероземы тяжелосуглинистые, тундровые и болотные почвы	0,70—0,90	0,55—0,90	0,50—0,75
Чернозем обычный и южный, светло-каштановые почвы, лёсс, карбонатные почвы, темно-каштановые почвы	0,55—0,80	0,45—0,75	0,35—0,65
Супеси, бурые и серо-бурые пустынно-степные почвы, сероземы супесчаные и песчаные	0,35—0,60	0,20—0,55	0,20—0,45
Песчаные, гравелистые, рыхлые каменистые почвы	0,25	0,15—0,20	0,10

Примечание. Меньшие значения коэффициентов α соответствуют суточным слоям осадков $H < 80$ мм, большие значения — $H > 200$ мм. В пределах $80 \text{ мм} < H < 200 \text{ мм}$ значения α определяют интерполяцией.

φ — коэффициент редукиции, учитывающий неполноту стока в связи с неравномерным распределением осадков по площади водосбора для площадей, определяется по формуле проф. Б.Ф. Перевозникова:

$$\varphi = \frac{1}{\sqrt[4]{10F}},$$

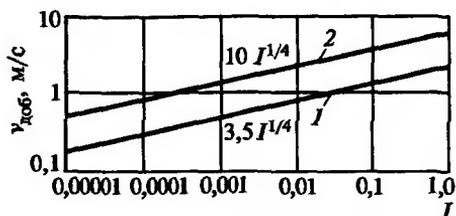
где F — площадь водосбора, км² ($0,1 \text{ км}^2 \leq F \leq 100 \text{ км}^2$). При $F \leq 0,1 \text{ км}^2$ $\varphi = 1$. Значения коэффициентов редукиции φ можно также определять по табл. 14.3;

Т а б л и ц а 14.3. Коэффициенты редукиции φ

F (км ²)	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
φ	1	0,84	0,76	0,71	0,67	0,64	0,61	0,59	0,58	0,56
F (км ²)	1,5	2,0	2,5	3	4	5	6	8	10	12
φ	0,51	0,47	0,45	0,43	0,40	0,38	0,36	0,33	0,32	0,30
F (км ²)	14	16	20	25	30	40	50	60	80	100
φ	0,29	0,28	0,27	0,25	0,24	0,22	0,21	0,20	0,19	0,18

Рис. 14.7. Связь скорости добега-
ния с уклоном бассейна:

1 — задернованная поверхность бассейна;
2 — гладкая укрепленная поверхность



K_i — коэффициент перехода от интенсивности ливня часовой продолжительности a , к интенсивности ливня расчетной продолжительности $a_{расч}$. Теоретически выводимая величина коэффициента K_i зависит от длины водосбора L (км), «скорости добега воды» $v_{доб}$ (км/мин) от наиболее удаленной точки водосбора до замыкающего створа и шероховатости бассейна и определяется по формуле:

$$K_i = \left(\frac{60 v_{доб}}{L} \right)^{2/3} = \frac{5,5}{L^{2/3}} I^{1/6} \leq 5,24. \quad (14.4)$$

Скорость добега определяют по данным Д.Л. Соколовского, согласно которым главным фактором, определяющим скорость, является уклон бассейна I , при этом для обычных задернованных поверхностей бассейна скорость $v_{доб}$ равна (рис. 14.7):

$$v_{доб} = 3,5 I^{1/4} \text{ (м/с), или } v_{доб} = 0,2 I^{1/4} \text{ (км/мин)}$$

Для гладких поверхностей (дорожные одежды, асфальтированные дворовые территории в городах и т.д.) (см. рис. 14.7):

$$v_{доб} = 10 I^{1/4} \text{ (м/с), или } v_{доб} = 0,6 I^{1/4} \text{ (км/мин).}$$

Таблица значений переходных коэффициентов K_i (табл. 14.4) составлена для задернованных поверхностей бассейна. Для бассейнов с гладкими поверхностями табличные значения коэффициента K_i удваивают, но принимают не более 5,24, что соответствует постоянному расходу, который уже не зависит от длительности ливня (полный сток).

Таблица 14.4. Значения переходного коэффициента K_i

Длина бассейна L , км	Переходные коэффициенты K_i при уклонах бассейна I							
	0,0001	0,001	0,01	0,1	0,2	0,3	0,5	0,7
0,15	4,21							
0,30	2,57	3,86						
0,50	1,84	2,76	3,93					

Полный сток 5,24

Длина бассейна L , км	Переходные коэффициенты K_t при уклонах бассейна I							
	0,0001	0,001	0,01	0,1	0,2	0,3	0,5	0,7
0,75	1,41	2,08	2,97	4,50	5,05	Полный сток		5,24
1,0	1,16	1,71	2,53	3,74	4,18	4,50	4,90	5,18
1,25	1,00	1,49	2,20	3,24	3,60	3,90	4,23	4,46
1,50	0,88	1,30	1,93	2,82	3,15	3,40	3,70	3,90
1,75	0,80	1,18	1,75	2,58	2,84	3,06	3,33	3,52
2,0	0,73	1,07	1,59	2,35	2,64	2,85	3,09	3,27
2,5	0,63	0,92	1,37	2,02	2,26	2,44	2,65	2,80
3,0	0,56	0,82	1,21	1,79	2,00	2,16	2,34	2,49
3,5	0,50	0,74	1,10	1,62	1,81	1,95	2,12	2,31
4,0	0,46	0,68	1,00	1,48	1,65	1,78	1,94	2,11
4,5	0,42	0,62	0,93	1,37	1,53	1,65	1,78	1,95
5,0	0,40	0,58	0,86	1,27	1,42	1,54	1,67	1,82
6,0	0,35	0,52	0,76	1,13	1,26	1,36	1,48	1,68
7,0	0,32	0,47	0,69	1,02	1,14	1,23	1,33	1,45
8,0	0,29	0,43	0,63	0,93	1,04	1,12	1,22	1,33
9,0	0,27	0,39	0,58	0,86	0,96	1,04	1,13	1,23
10,0	0,25	0,37	0,54	0,80	0,90	0,97	1,05	1,14
11,0	0,23	0,34	0,51	0,75	0,84	0,91	0,98	1,07
12,0	0,22	0,32	0,48	0,71	0,79	0,86	0,93	0,99
13,0	0,21	0,31	0,46	0,67	0,75	0,81	0,88	0,96
14,0	0,20	0,29	0,43	0,64	0,72	0,79	0,84	0,91
15,0	0,19	0,28	0,41	0,61	0,68	0,74	0,80	0,87
20,0	0,16	0,23	0,34	0,50	0,56	0,61	0,66	0,72

При продолжительности ливня 5 мин и менее коэффициент K_t достигает предельного значения $K_t = 5,24$, что соответствует полному стоку, т.е. длительному притоку воды с постоянным расходом $Q_{\text{пс}}$. Как следует из формулы (14.3), расход полного стока (при $K_t = 5,24$ и $\varphi = 1$) определится:

$$Q_{\text{пс}} = 87,5 a_{\text{ч}} F \alpha. \quad (14.5)$$

Объем ливневого стока определяют как произведение слоя стока h на площадь водосбора F . Тогда

$$W_{\text{л}} = K_i a_{\text{ч}} \alpha \varphi t_{\text{расч}} F, \quad (14.6)$$

где $h = K_i a_{\text{ч}} \alpha \varphi t_{\text{расч}}$ — расчетный слой стока, мм.

Как следует из формулы (14.4), расчетное время ливня $t_{\text{расч}}$ (мин) составляет:

$$t_{\text{расч}} = \frac{60}{K_i^{3/2}}. \quad (14.7)$$

Тогда подставив выражение (14.7) в (14.6), окончательно получим объем ливневого стока в м^3 :

$$W_{\text{л}} = 60\,000 a_{\text{ч}} \frac{F}{\sqrt{K_i}} \alpha \varphi, \text{ м}^3, \quad (14.8)$$

где F — площадь водосбора, км^2 .

14.3. Расчет стока талых вод с малых водосборов

Согласно СНиП 2.01.14—83 «Определение расчетных гидрологических характеристик» расчетный максимальный расход талых вод определяется по редуцированной формуле ГГИ (преобразованная формула Д.Л. Соколовского):

$$Q_{\text{max}}^{\tau} = \frac{k_0 h_p F}{(F+1)^n} \delta_1 \delta_2, \quad (14.9)$$

где k_0 — коэффициент дружности половодья, определяемый для водосборов в равнинной местности по табл. 14.5, для горных бассейнов с весенне-летними половодьями — по табл. 14.6;

Таблица 14.5. Коэффициенты дружности половодья k_0 , показатели степени n для равнинных районов

Природная зона (район)	n	k_0 для малых водосборов
<i>Зоны тундры и лесная</i>		
Европейская территория РФ и Восточная Сибирь	0,17	0,010
Западная Сибирь	0,25	0,013
<i>Лесостепная и степная зоны</i>		
Европейская территория РФ (без Северного Кавказа)	0,25	0,020
Северный Кавказ	0,25	0,030
Западная Сибирь	0,25	0,030

Таблица 14.6. Коэффициенты дружности половодья k_0 для горных районов

Географический район	Средняя высота водосбора над уровнем моря, м	k_0
Урал	До 500	0,025
	Более 500	0,018
Карпаты	—	0,045
Алтай	До 1000	0,025
	1000—2000	0,015
	Более 2000	0,010
Центральный Алтай (Чуйские степи)	—	0,007
Северо-Восток РФ	—	0,03
Камчатка	—	0,010
Северный Сахалин	—	0,014
Южный Сахалин	—	0,020

n — показатель степени, учитывающий климатическую зону. Для равнинных районов принимается по табл. 14.5, для горных районов с уклонами водосборов более 0,05 — $n = 0,015$;

h_p — расчетный слой стока весенних вод той же ВП, что и расчетный расход, мм;

δ_1 и δ_2 — коэффициенты, учитывающие снижение расхода в залесенных и заболоченных бассейнах соответственно:

$$\delta_1 = \frac{1}{A_n + 1};$$

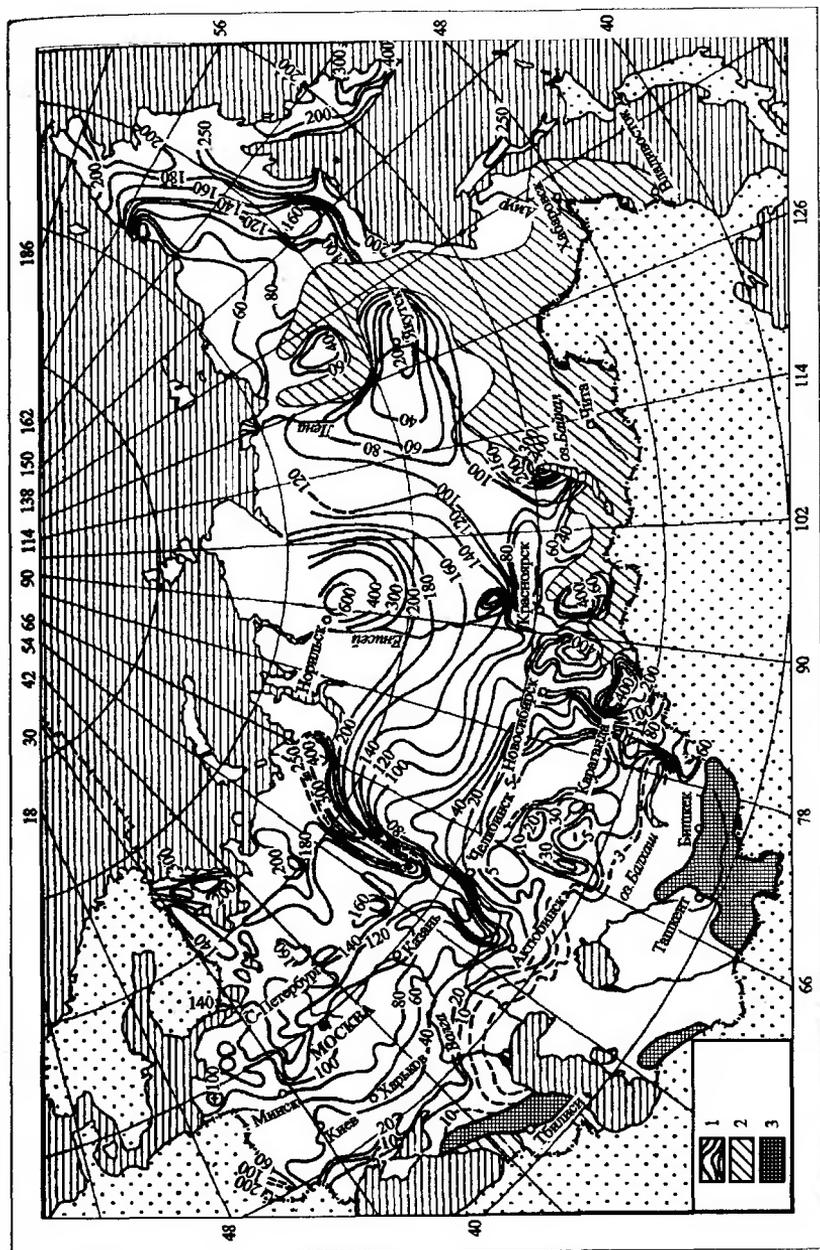
$$\delta_2 = 1 - 0,7 \lg(0,1 A_6 + 1),$$

где A_n , A_6 — залесенность и заболоченность соответственно, %.

Расчетный слой стока h_p устанавливают по аналогам, т.е. по результатам натуральных наблюдений. Учитывая, что на малых водосборах натурные наблюдения за стоком, как правило, отсутствуют, то средний слой стока талых вод h_{cp} определяют по карте (рис. 14.8), а расчетный h_p по формуле:

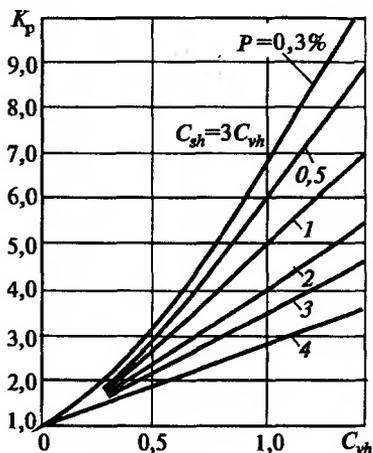
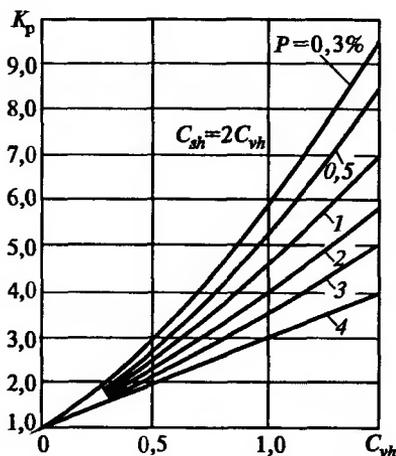
$$h_p = K_p h_{cp},$$

где K_p — модульный коэффициент, определяемый по графикам (рис. 14.9) в зависимости от коэффициента вариации слоев стока талых вод C_{vh} и коэффициента асимметрии C_{sh} .



Р и с. 14.8. Карта РФ и стран СНГ средних слоев стока талых вод:

1 — районы, в которых превалирует сток талых вод; 2 — районы, где более опасны ливневые паводки; 3 — горные районы



Р и с. 14.9. Кривые модульных коэффициентов слоев стока K_p

Коэффициенты вариации слоев стока талых вод C_{vh} определяют по карте изолиний (рис. 14.10), при этом для водосборов площадью менее 200 км^2 получаемые значения умножают на коэффициенты:

Площадь водосбора, км^2	0—50	51—100	101—150	151—200
Коэффициенты	1,25	1,20	1,15	1,05

Коэффициенты асимметрии C_{sh} для равнинных водосборов принимают равными $C_{sh} = 2 C_{vh}$. Для районов северо-запада и северо-востока РФ, где в формировании максимального стока участвуют ливни, $C_{sh} = 3 C_{vh}$. Для горных водосборов $C_{sh} = (3 \div 4) C_{vh}$.

Сток талых вод с малых водосборов сопровождается проходящими ежедневно отдельными паводками трапецеидальной формы (см. рис. 14.2, б). Тогда, очевидно, объем стока каждого суточного паводка талых вод W_τ , определяемый площадью соответствующей отдельной трапеции, составляет:

$$W_\tau = 43200 Q_{\max}^\tau, \text{ м}^3. \quad (14.10)$$

14.4. Математическое моделирование стока с водосборов

Традиционные методы расчета стока ливневых и талых вод с водосборов, в частности методы, изложенные § 14.2, 14.3, основаны на целом комплексе серьезных допущений, существенно влияющих на точность результатов расчета и полноту получаемой информации.

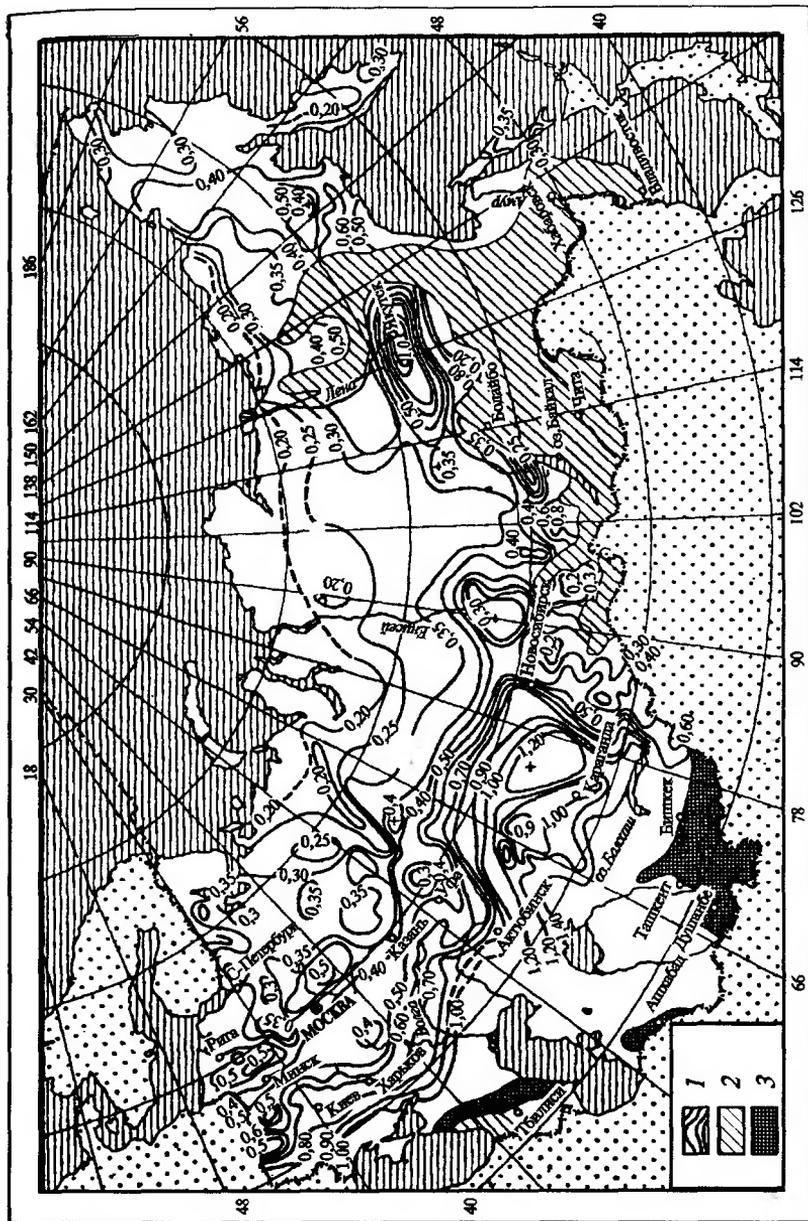


Рис. 14.10. Карты РФ и стран СНГ коэффициентов вариации C_v слоев стока талых вод:

1 — районы с преобладающими расходами талых вод; 2 — районы с опасным ливневым стоком; 3 — горные районы

Современная компьютерная техника дает возможность в приемлемые для практических целей сроки существенно уточнить и расширить объем получаемой информации, необходимой для надежного проектирования малых мостов и труб, а также других сооружений поверхностного дорожного водоотвода.

Одна из первых математических моделей ливневого стока была разработана еще в 1931 г. М.М. Протодьяконовым. Однако этот метод в то время не получил широкого распространения в связи со сложностью и многодельностью расчетов. Последнее обстоятельство явилось причиной введения в эту математическую модель целого ряда серьезных допущений, главные из которых следующие:

конфигурация всех бассейнов схематизировалась в прямоугольную форму, эквивалентную натурному водосбору по площади и длине и состоящую из двух равнонаклонных плоскостей, симметрично расположенных по обе стороны тальвега, подобно раскрытой книге;

живое сечение лога принималось всегда треугольной формы со склонами 1:5 и постоянным для всех водосборов коэффициентом шероховатости;

движение воды по склонам и логу принималось установившимся и равномерным.

Современная компьютерная техника сняла проблемы быстроты и объема оперативной памяти, что предопределило ускоренное развитие методов математического моделирования и, в частности, моделирования процесса формирования стока ливневых вод.

К настоящему времени уже разработано достаточно большое количество математических моделей процесса формирования речного стока. Анализ достоинств и недостатков каждой из них выполнен Л.С. Кучментом. С точки зрения описания процесса стока ливневых вод с малых водосборов (а именно этот случай наиболее интересен для инженера-дорожника) представляется целесообразным использовать идею М.М. Протодьяконова, исключив перечисленные выше грубые допущения, свойственные его расчетной схеме.

Водосбор любой сложной формы и любых размеров может быть представлен в виде системы эквивалентных по площади и длине прямоугольников, примыкающих в соответствующих местах к главному логу (рис. 14.11).

Учитывая, что время добегаания воды по логу существенно влияет на формирование максимальных расходов в замыкающем створе, длины схематизированных прямоугольных водосборов целесообразно принимать равными фактической длине каждого бокового лога. Тогда ширина B_i каждого схематизированного водосбора i -го бокового лога определится как:

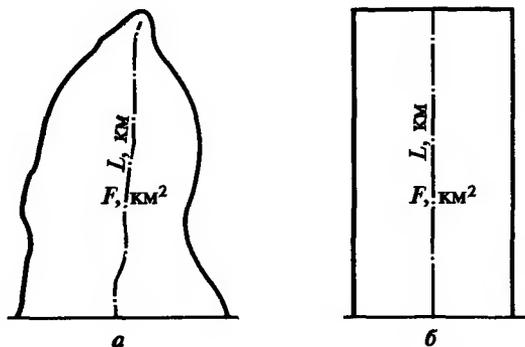


Рис. 14.11. Схематизация водосборного бассейна:
a — реальный водосбор; *b* — схематизированный водосбор

$$B_i = \frac{F_i}{L_i},$$

где F_i — площадь водосбора i -го бокового лога; L_i — длина бокового лога.

Угол примыкания каждого бокового лога к главному α_i принимают равным углу между направлением тальвега бокового лога и направлением потока в главном логу (см. рис. 14.11).

Полученный в каждый j -й момент времени паводка сосредоточенный расход в устье каждого бокового лога Q_{ij} представляют в виде равномерно распределенных погонных расходов на фактической ширине каждого бокового лога в устьевой его части:

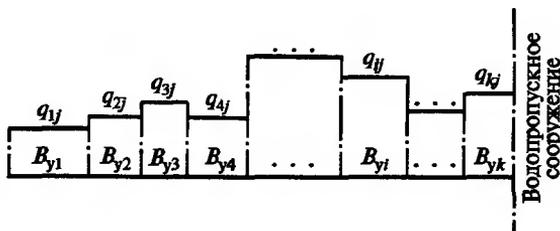
$$q_{ij} = \frac{Q_{ij}}{B_{yi}},$$

где B_{yi} — фактическая ширина i -го бокового лога в устьевой его части.

Таким образом, при описании неустановившегося движения ливневых вод по главному логу боковая приточность в каждый j -й момент времени представляется как кусочно-постоянная функция (рис. 14.12).

Шероховатости и уклоны склонов и тальвегов назначают дифференцированно для каждого бокового лога. Шероховатости и уклоны главного лога также могут быть заданы дифференцированно по его длине.

Форма живого сечения тальвегов боковых логов и главного лога аппроксимируется семиточечным профилем (рис. 14.13).



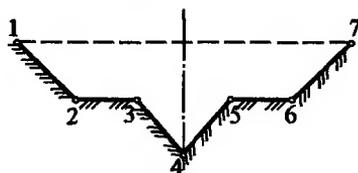
Р и с. 14.12. Эпюра боковой приточности по главному лугу

Такая аппроксимация позволяет с достаточной для практических расчетов точностью представлять живые сечения разнообразного очертания, в том числе треугольного, прямоугольного, трапецидального и т.д.

Для расчета склонового стока на малых водосборах можно использовать дифференциальное уравнение кинематической волны:

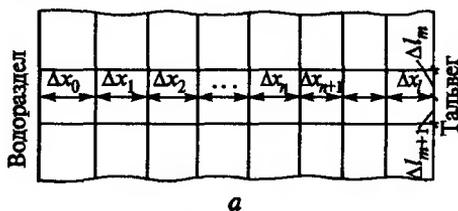
$$\begin{cases} \frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial q}{\partial x} = a - b, \\ q = m_c h_c^{5/3} I_c^{1/2}, \end{cases} \quad (14.11)$$

где h_c — глубина склонового потока; t — время; q — погонный расход; x — текущая координата, направленная от водораздела вниз по склону; a — интенсивность ливня; b — интенсивность впитывания; m_c — показатель ровности склонов; I_c — уклон склона.

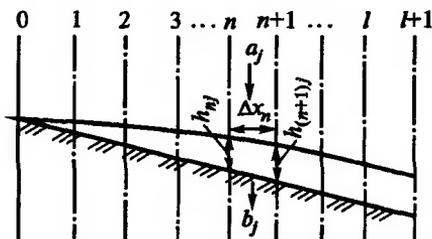


Р и с. 14.13. Аппроксимация формы живого сечения тальвегов:

1—7 — характерные точки живого сечения тальвега



а



б

Р и с. 14.14. Схема расчета склонового стока:

а — план; б — продольный разрез

Систему уравнений (14.11) решают в конечных разностях по схеме с впереднаправленными разностями:

$$\Delta h_{nj} = \frac{m_c I_c^{1/2}}{\Delta x_n} (h_{(n+1)j}^{5/3} - h_{nj}^{5/3}) \Delta t_j + (a_j - b_j) \Delta t_j, \quad (14.12)$$

где Δh_{nj} — приращение глубины на n -м участке склона за интервал времени Δt_j ; Δx_n — расчетный интервал длины по склону, м; a_j , b_j — интенсивность ливня и впитывания в j -й момент времени, м/с.

Уравнение (14.12) решают последовательно для каждой пары створов сверху вниз по склону, начиная с водораздела для каждого интервала времени (рис. 14.14). При этом в створе на водоразделе ($n = 0$) глубину h_n принимают $h_0 = 0$.

Движение ливневых вод по тальвегу главного лога и тальвегам боковых логов описывается системой дифференциальных уравнений неустановившегося течения жидкости переменной массы:

динамического

$$I_n \frac{\partial h}{\partial l} + \frac{\alpha_0 q}{g \omega} (\theta - v) = \frac{\alpha}{2g} \frac{\partial v^2}{\partial l} + \frac{\alpha_0}{g} \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{Q^2}{K^2};$$

неразрывности

$$\frac{\partial Q}{\partial l} + \frac{\partial \omega}{\partial t} = q, \quad (14.13)$$

где I_n — уклон дна лога (тальвега); h — глубина потока; l — длина по логу; $\alpha = 1,1$ — коэффициент Кориолиса (корректив кинетической энергии); $\alpha_0 \approx 1,03$ — коэффициент Буссинеска (корректив количества движения); q — боковая приточность в единицу времени на единицу длины лога; g — ускорение силы тяжести; ω — площадь живого сечения; θ — проекция скорости присоединенных частиц жидкости на направление скорости основного потока; v — скорость потока; t — время; Q , K — расход и расходная характеристика.

Систему уравнений (14.13) решают в конечных разностях: динамическое уравнение

$$h_{(m+1)j} = h_{mj} + \frac{1,1(v_{mj}^2 - v_{(m+1)j}^2)}{2g} + \frac{1,03(v_{m(j-1)cp} - v_{mjcp})}{g \Delta t_j} \Delta l_m + \left(I_n - \frac{Q_{mjcp}^2}{K_{mjcp}^2} \right) \Delta l_m + \frac{1,03 q_{mj}}{g \omega_{mjcp}} \left(\frac{q_{mjcp}}{h_{mjcp}} \cos \alpha_j - v_{mjcp} \right) \Delta l_m;$$

уравнение неразрывности

$$Q_{mj} = Q_{(m+1)j} + \frac{\Delta h_{mj} B_{mj} + \Delta h_{(m+1)j} B_{m+1} + 4\Delta h_{мкр} B_{мкр}}{6\Delta t_j} \Delta l_m + q_{mj} \Delta l_m, \quad (14.14)$$

где h_{mj} , $h_{(m+1)j}$ — глубины потока в m -м и $(m+1)$ -м створах в j -й момент времени, м; v_{mj} , $v_{(m+1)j}$ — соответственно скорости течения в m -м и $(m+1)$ -м створах в j -й момент времени, м/с; $v_{m(j-1)ср}$, $v_{mкр}$ — соответственно средние скорости течения на m -м расчетном участке лога в $(j-1)$ -й и j -й моменты времени, м/с; Δl_m — длина m -го участка русла, м; I_n — уклон лога; $Q_{mкр}$, $K_{mкр}$ — соответственно расход и расходная характеристика сечения, средние на m -м участке лога в j -й интервале времени, м³/с; q_{mj} — боковая приточность на m -м участке лога в j -й момент времени, м³/с · м; $\omega_{mкр}$ — средняя на m -м участке лога площадь живого сечения в j -й момент времени, м²; $q_{mкр}$, $h_{mкр}$ — средние на m -м участке лога боковая приточность и глубина в j -й момент времени; α_i — угол примыкания i -го тальвега бокового лога к главному логу; Q_{mj} , $Q_{(m+1)j}$ — соответственно расходы в m -м и $(m+1)$ -м створах в j -й момент времени, м³/с; Δh_{mj} , $\Delta h_{(m+1)j}$ — приращения глубины воды в соответствующих створах за время Δt_j , м; B_{mj} , $B_{(m+1)j}$ — ширины потока в соответствующих створах.

Шероховатости и уклоны тальвегов боковых логов назначают дифференцированно. Шероховатости и уклоны главного лога также можно задавать дифференцированно по его длине.

Последовательность детального расчета ливневого стока с малых водосборов, реализация которого возможна лишь при использовании компьютерной техники, следующая:

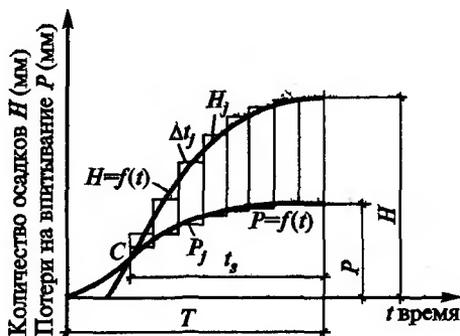
расчетный водосбор представляют в виде схематизированных прямоугольных водосборов и определяют исходные параметры (площади, ширины, длины, уклоны, шероховатости и характеристики поперечных сечений тальвегов);

кривые хода дождя $H = f(t)$ и впитывания $P = f(t)$ заменяют ступенчатым очертанием с шагом Δt_j (рис. 14.15);

каждый i -й боковой лог по тальвегу, начиная от водораздела до его устья, делят на необходимое количество расчетных интервалов длины Δl_{mi} ;

главный лог по тальвегу также делят на значительное число участков Δl_m , начиная от водораздела до замыкающего створа (рис. 14.16);

на первой ступеньке, начиная с момента начала стока (см. рис. 14.15), вычисляют интенсивность ливня $a_i = \Delta H_i / \Delta t_j$ и интенсивность впитывания $b_i = \Delta P_j / \Delta t_j$;



Р и с. 14.15. Замена кривых хода дождя и впитывания ступенчатым очертанием

отыскивают значения боковой приточности склонового стока, применяя уравнение (14.12) последовательно сверху вниз для каждой пары створов каждого i -го бокового лога, начиная от водораздела;

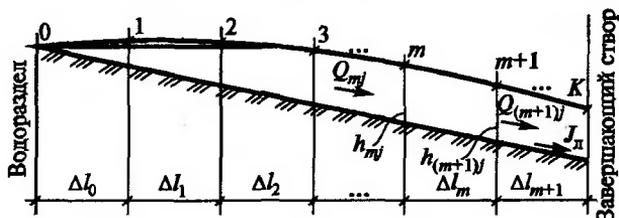
находят сосредоточенные расходы в устьевых створах каждого i -го бокового лога, решая систему уравнений (14.14) последовательно для каждой пары створов вниз по тальвегу, начиная с водораздела;

строят эпюру боковой приточности главного лога, представляемую в виде кусочно-постоянной функции (см. рис. 14.12);

отыскивают значение расхода Q_j в замыкающем створе главного лога для первого интервала времени, решая систему уравнений (14.14) последовательно для каждой пары створов сверху вниз по тальвегу;

затем те же операции выполняют для второго интервала времени с учетом уже вычисленных за предшествующий период времени объемов стока на склонах и в логах и т.д.

На основе изложенного алгоритма И.В. Чистяков в 1983 г. разработал программу «СТОК» для детального расчета ливневого стока с малых водосборов. Применение этой методики дает в ряде случаев возможность уменьшить инвестиции в строительство и эксплуатацию малых мостов и труб до 20%.



Р и с. 14.16. Схема расчета стока по тальвегу

Конечным итогом детального компьютерного расчета стока ливневых вод с малых водосборов является получение расчетного гидрографа ливневого стока в замыкающем створе водосбора $Q_{\text{л}} = f(t)$ (рис. 14.17), используемого в дальнейшем для расчетов отверстий малых водопропускных сооружений на автомобильных дорогах с учетом аккумуляции. Однако в случае необходимости может быть получена и другая информация, которая может интересовать инженера-дорожника: скорости течения, глубины и уровни воды, кривые свободной поверхности воды вдоль лога на любой момент паводка.

Для дальнейших расчетов отверстий малых водопропускных сооружений по полученным расчетным гидрографам стока $Q_{\text{л}} = f(t)$ в конечном итоге определяют следующие величины:

максимальный расход ливневых вод $Q_{\text{макс}}^{\text{л}}$, м³/с;

объем стока ливневых вод W , м³;

длительность паводка $t_{\text{пв}}$;

относительное время подъема паводка f ;

полноту гидрографа расчетного паводка P .

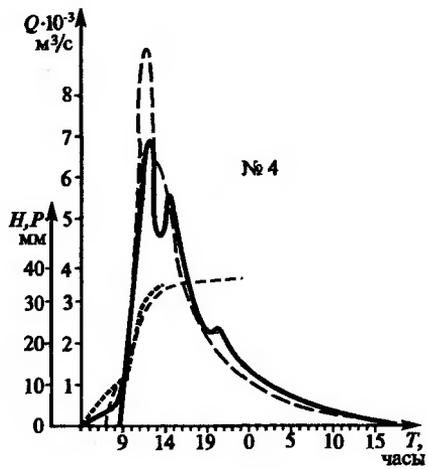
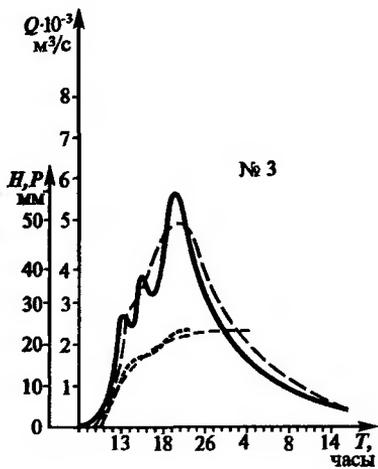
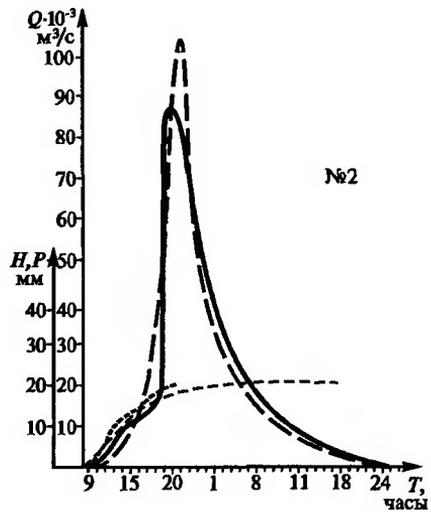
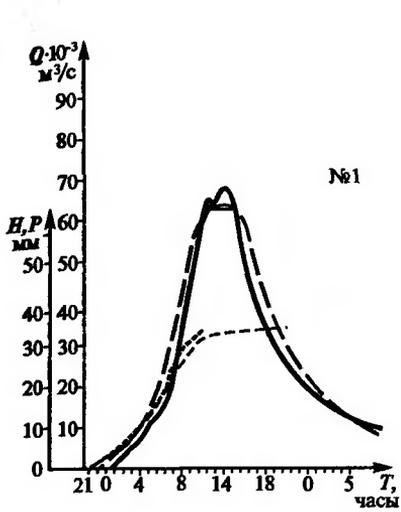
До недавнего времени при проектировании малых водопропускных сооружений аккумуляцию талых вод не учитывали (хотя это явление всегда имеет место), что в ряде случаев приводило к назначению завышенных размеров отверстий сооружений и отметок (геодезических высот) бровок земляного полотна над ними. Это было связано с отсутствием надежных методов расчета объемов стока талых вод и с ошибочным представлением о форме и продолжительности гидрографа стока в форме одномодальной трапеции, которая справедлива только для водосборов площадью более 200 км². Для малых же водосборов гидрограф стока талых вод имеет ярко выраженный внутрисуточный ход, что приводит к образованию кратковременного пруда аккумуляции талых вод во время дневного стока с последующим его опорожнением в ночной период.

Современные представления о механизме формирования стока талых вод состоят в следующем:

в результате таяния снега в верхнем его слое жидкость частично удерживается абсорбционными и капиллярными факторами, заполняя так называемую водоудерживающую емкость снега, и частично проникает в более глубокие слои, постепенно насыщая всю толщу снегового покрова, вплоть до постилающего грунта;

оставшаяся вода стекает по склонам водосборов и затем попадает в сеть тальвегов. Со временем сюда же попадает и часть воды, которая передвигалась по водоупорам склонов;

в ходе этого сложного процесса некоторая часть воды испаряется, а некоторая просачивается в более глубокие слои почв;



— натурные гидрографы
 - - - - - расчетные гидрографы

— ход дождя
 - - - - - ход потерь на впитывание

Р и с. 14.17. Гидрограф стока ливневых вод по результатам математического моделирования

процесс стекания талой воды по склонам при наличии на них снега качественно отличается от склонового стока ливневых вод. Только после попадания воды в сеть тальвегов водосбора сток талых вод аналогичен ливневому.

При формировании стока талых вод выделяют два основных случая:

сток по непромерзшей почве, когда впитывание в почву лишь немногим меньше интенсивности снеготаяния и водоотдачи из снега и сток талых вод незначителен;

сток по промерзшей почве, представляющей собой водоупор, по которому происходит склоновый сток талых вод в водонасыщенных слоях снега с последующим попаданием его в сеть тальвегов водосбора. Этот случай более опасен, поскольку здесь объемы и максимальные расходы стока могут достигать значительных величин.

В суточных изменениях гидротермического режима таящего снега выделяют четыре основные фазы:

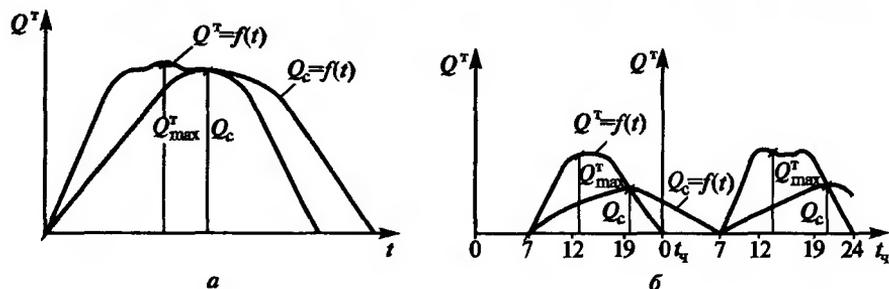
утреннее прогревание слоя снега до температуры таяния;

дневное снеготаяние (пик приходится примерно на 13—14 ч);

вечернее охлаждение поверхности снега;

ночное промерзание, когда температура снега опускается ниже 0°C и талая вода замерзает, а склоновый сток прекращается.

Аккумуляция возникает всегда, когда есть стеснение потока. Однако при принятии трапециевидной формы гидрографа притока с достаточной продолжительностью максимального расхода сбросной расход в сооружении может достичь величины максимального расхода притока только при больших бассейнах (рис. 14.18, а). Для малых же водосборов с выраженным внутрисуточным ходом стока время притока максимального расхода к сооружению недостаточно для уравнивания расходов, что обуславливает снижение сбросных расходов по сравнению с максимальными расходами притока (рис. 14.18, б).



Р и с. 14.18. Типы взаимодействия между гидрографами притока и сброса талых вод

На малых водосборах обычно формируются несколько примерно одинаковых суточных максимума стока, при этом время интенсивного стока составляет около 10—12 ч в сутки. Накопленный во время дневного снеготаяния пруд аккумуляции очевидно должен быть опорожнен до начала подъема паводка следующих суток.

По предложению проф. К.Н. Макарова при схематизации гидрографов притока и сброса талых вод треугольной формы в ходе 24-часового суточного цикла можно записать:

$$Q_c = \frac{12}{24} Q_{\max}^T = \frac{Q_{\max}^T}{2,0},$$

где Q_c — максимальный сбросный расход в сооружении; Q_{\max}^T — максимальный расход притока талой воды.

Таким образом, если по Д.И. Кочерину снижение расчетных сбросных расходов ливневого стока за счет аккумуляции можно производить не более чем в 3 раза по сравнению с максимальным расходом притока, то для стока талых вод по К.Н. Макарову — не более чем в 2 раза. Тогда система ограничений для назначения отверстий малых водопропускных сооружений сооружения примет вид:

$$Q_c \geq 0,33 Q_{\max}^L;$$

$$Q_c \geq 0,50 Q_{\max}^T;$$

где Q_{\max}^L — максимальный ливневый расход; Q_{\max}^T — максимальный расход талых вод.

14.5. Региональные нормы стока

Многообразие климатических, почвенно-грунтовых и гидрологических условий различных регионов не позволяет применять трафаретных решений для определения расчетных расходов при проектировании водопропускных сооружений на автомобильных дорогах. Поэтому наиболее целесообразным подходом для решения задач в этой области является создание региональных норм стока, которые учитывают особенности природно-климатических и гидрологических условий конкретного района. Как показывает практика, разработка и применение региональных норм стока может обеспечивать получение наиболее достоверных характеристик стока даже в самых малоизученных районах, позволяет решать задачи, выполнение которых по существующим традиционным методам затруднено или просто невозможно. Общая методика создания региональных норм стока была разработана проф. О.В. Андреевым.

Создание региональных норм стока начинают всегда с правильного выбора основной расчетной схемы (формулы), которая должна быть обоснована теоретически. Только после выбора основной расчетной схемы можно учесть входящие в формулы параметры, которые зависят от региональных условий. Затем выполняют тщательное изучение физико-географических, природно-климатических, гидрологических и метеорологических условий, а также проводят необходимые полевые обследования водосборов.

Факторы, определяющие величины расходов ливневого стока, можно разделить на две самостоятельные группы: региональные, зависящие от географических координат водосбора; геометрические, влияние которых одинаково для всех бассейнов, независимо от их местоположения.

Для правильного составления региональных норм стока необходимо, прежде всего, выделить по обоснованной схеме постоянно действующие для всех бассейнов факторы стока — геометрические характеристики бассейнов, а по натурным показателям искать только региональные факторы, действительно зависящие от местоположения бассейна и учитывающие особенности местного климата и впитывающую способность почв.

Для практических целей профессором О.В. Андреевым разработана методика выделения влияния геометрических элементов водосбора на параметры ливневого стока. Исключив влияние геометрических характеристик, можно с уверенностью устанавливать региональные нормы стока для любого района.

Связь между средней интенсивностью ливня a (мм/мин) и продолжительностью выпадения осадков t (мин) описывают обычно следующей зависимостью:

$$a = \frac{K}{t^{2/3}}, \quad (14.15)$$

где K — региональный климатический коэффициент.

Слой осадков за время хода ливня определяют по формуле:

$$h_n = at = Kt^{1/3}. \quad (14.16)$$

Расчетное время ливня заданной вероятности превышения (ВП), наиболее опасное для проектируемого водопропускного сооружения, принимают согласно принципа «предельных интенсивностей» (см. § 14.2), как время добегания воды от наиболее удаленной точки водосбора до замыкающего створа:

$$t = \frac{L}{v},$$

где L — длина водосбора; v — скорость стекания.

Величину максимального расхода ливневого стока принято определять по зависимости:

$$Q = 16,7aF = 16,7 \frac{KF}{t^{2/3}} = 16,7 \frac{KFv^{2/3}}{L^{2/3}}, \quad (14.17)$$

где a — интенсивность ливня расчетной ВП, мм/мин; F — площадь водосбора, км².

Используя уравнение равномерного течения жидкости Шези, величину скорости добегаания вычисляют по формуле:

$$V = mh^{2/3}I^{1/2}, \quad (14.18)$$

где m — показатель ровности склонов бассейна (см. § 14.2); I — уклон бассейна.

На основе формул (14.16)—(14.18) с учетом пропорциональности величин h и h_d после некоторых преобразований получим:

$$v^{2/3} \propto m^{6/11} K^{4/11} I^{3/11} L^{4/33}. \quad (14.19)$$

Объединяя формулы (14.17) и (14.19):

$$Q \propto K^{15/11} \left(m^{6/11} \frac{F I^{3/11}}{L^{6/11}} \right). \quad (14.20)$$

В выражении (14.20) величины в скобках объективно отображают влияние на расход Q геометрических характеристик бассейна, независимо от его географических координат. Множитель K , представляющий собой климатическую характеристику региона, объединен с постоянными коэффициентами пропорциональности, размерности и потерь, предполагаемыми в выражении (14.20), и заменен общим обозначением регионального коэффициента R .

Тогда, очевидно, региональный коэффициент учитывает и потери стока на впитывание, зависящие от характеристик почв региона:

$$Q = R \left(m^{6/11} \frac{F I^{3/11}}{L^{6/11}} \right).$$

Исходя из формулы (14.16), климатический коэффициент K выражается через слой осадков заданной продолжительности. Например, принимая $t = 60$ мин, получаем

$$K = a_{\text{ч}} t^{2/3} = (a_{\text{ч}} t) \frac{1}{t^{1/3}} = \frac{h_{60}}{(60)^{1/3}} = \frac{h_{60}}{3,91},$$

где $a_{\text{ч}}$ — интенсивность ливня часовой продолжительности.

Потери стока на впитывание в почву можно учитывать как уменьшающим коэффициентом, так и вычитанием слоя потерь из слоя стока. Тогда с учетом потерь и сохранением гиперболической связи в формуле (14.15) между интенсивностью водоотдачи и ее продолжительностью:

$$K = \frac{(h_{60})_{\text{в}}}{3,91}.$$

Следует обратить внимание на возможность уточнения региональных норм стока, выделяя в рассматриваемом регионе бассейны с резко различающимися условиями по впитыванию в почву. Целесообразно вводить в расчет «относительный коэффициент стока» — φ_0 , показывающий сравнительную впитывающую способность почв бассейна. С помощью этого коэффициента можно объединять данные о натуральных расходах воды, сформировавшихся на бассейнах с различными почвами, приводя их к одному виду почв. Величины этих относительных коэффициентов целесообразно определять по известным таблицам обычных коэффициентов стока (например, Д.Л. Соколовского), взяв один из видов почв за исходный и приняв для него $\varphi_0 = 1$. Несмотря на условность такого расчета, этот прием дает возможность уточнять региональные нормы стока для любого района, а в ряде случаев позволяет объяснить отклонения расчетных величин от натуральных данных.

В итоге предлагаются следующие, наиболее полные и ясно выводимые региональные зависимости:

$$Q = R\varphi_0 \left(m^{6/11} \frac{F I^{3/11}}{L^{6/11}} \right), \quad (14.21)$$

$$Q = R\varphi_0 \left(m^{1/2} \frac{F I^{1/4}}{L^{1/2}} \right), \quad (14.22)$$

или после некоторого упрощения:

$$Q = R\varphi_0 (m^{1/2} F^{3/4} I^{1/4}), \quad (14.23)$$

приняв $L = F^{1/2}$ и вводя среднюю ширину бассейна $B = F/L$:

$$Q = R\varphi_0(\sqrt{mFB} I^{1/4}), \quad (14.24)$$

где R — региональный коэффициент той же вероятности превышения, что и расход Q ; φ_0 — относительный коэффициент стока; m — показатель ровности склонов бассейна; F, L, B, I — площадь, длина, средняя ширина и уклон бассейна.

Таким образом, для отыскания региональных коэффициентов (постоянных для конкретного района или плавно меняющихся по его территории) необходимо натурные данные о расходах делить на функции геометрических характеристик соответствующих бассейнов, т.е.

$$R = \frac{Q}{\varphi_0 f(m, F, L, I)}. \quad (14.25)$$

Несмотря на теоретически обоснованную схему и соответствующий вывод для составления региональных норм стока, в связи с приближенностью входящих в формулы (14.21)—(14.25) компонентов и упрощенностью закономерностей формирования и стекания неустановившихся ливневых вод по склонам водосбора, необходима соответствующая корректировка по натурным данным о расходах, чтобы региональный параметр приобретал более устойчивый характер.

Для поиска и сбора необходимых натуральных сведений поступают следующим образом.

Предварительно на планах вдоль трассы проводят генеральный водораздел, от которого идет сток к проектируемым водопропускным сооружениям. Это снижает ошибки определения верхних границ отдельных площадей водосбора.

Зная положение главного водосбора, по картам уточняют границы всех водосборов, их площади и разветвленность. Для этой цели от каждого сооружения нужно проходить по дну лога с необходимыми геодезическими приборами до водораздела и составлять продольный профиль лога. Обычно за линию водораздела теодолитный ход продолжают на 10% его длины при неровном рельефе и не менее чем 20% — при плоском. Необходимо твердо убедиться в том, что принятый главный лог есть истинный. При разветвленных бассейнах необходимо пройти по главным разветвлениям, чтобы установить их боковые границы и убедиться, что второй лог не длиннее первого. За главный принимают наиболее длинный лог. По полученным точкам водоразделов всех логов уточняют на карте главный водораздел вдоль трассы и одновременно устанавливают границы между отдельными логами. Таким образом, получают план бассейнов и логов, привязанный к трассе, наглядно характеризующий общую топографическую

ситуацию района. В горных и труднопроходимых районах для этой цели применяют теодолитную, аэрофотосъемку и съемку с использованием систем спутниковой навигации «GPS».

Уклоны склонов и логов определяют по планам в горизонталях или непосредственными измерениями с помощью геодезических приборов. Поскольку уклоны на одном и том же склоне неодинаковы, для оценки скорости стекания слоя стока к ближайшему логу необходимо вычислить их средневзвешенные значения.

Одним из решающих факторов, влияющих на сток, является впитывание выпавших осадков в почву. Для выяснения состава и структуры почвы и отнесения ее к определенной категории необходимо на водосборе делать шурфы глубиной до 0,5 м, так как для оценки впитывания ливневых вод решающее значение имеют только верхние 20—30 см почвы. Количество шурфов назначают по табл. 14.7.

Т а б л и ц а 14.7. Количество шурфов, необходимое для определения категории почвы

Обследования	Число шурфов на 1 км ² водосбора	Всего не менее	Всего не более
	средняя норма		
Предварительные на каждом варианте	0,5	1	3
Окончательные на принятом к строительству варианте	1	2	10

По результатам разработки шурфов квалифицированно определяют категорию почв по впитыванию на водосборе. Водосборы площадью более 10 км² целесообразно делить на несколько частей, если разница в категории почв оказывается значительной.

Необходимо отметить, что на малых водосборах, расположенных в регионах с муссонными ливнями значительной продолжительности, почва может находиться в полностью влагонасыщенном состоянии перед расчетным ливнем и никакого впитывания может не происходить. В таких случаях в формировании стока участвуют все выпавшие осадки. Необходимо также иметь в виду, что в засушливых районах с абсолютно высохшей пылевой и песчаной поверхностью интенсивные капли расчетного сильного ливня «выштукатуривают» поверхность грунта и впитывание здесь практически отсутствует.

Наличие болот и озер на бассейне снижает скорость добегания потока. Если скорость протекания по болоту снижается в 2—3 раза по сравнению с логам при равном рельефе, то по озеру, в зависимости

от величины аккумуляции, — в 3—10 раз. Поэтому при изысканиях необходимо оценивать не только площадь болот и озер в процентах, но также определять и длину протекания потока по болоту и озеру. Если болота и озера расположены в верхней части бассейна, то возможно, что при отсечении этой части водосбора расчетный расход получится больше, чем при учете площади всего водосбора.

При изысканиях необходимо собирать все требующиеся гидрометеорологические и паводковые данные у близлежащих гидрометеостанций, использовать архивные данные старых проектов, материалы различных организаций, занимавшихся изысканиями в исследуемом районе, собирать сведения о выдающихся паводках, размывах на дорогах и ливнях как по официальным, так и по иным доступным источникам (в частности, по данным опроса старожилов).

Часто удается получать необходимые полевые данные путем опроса работников эксплуатационных служб дорог. Оценка достоверности получаемых данных осуществляют обязательно. При сборе натурных данных и визуальных осмотрах сооружений необходимо устанавливать:

следы и отметки (высоты) уровней прошедших паводков в логах, на опорах моста, у входов в существующие водопропускные сооружения и т.д.;

какие паводки более опасны для данного сооружения: ливневые или от снеготаяния;

факты перелива воды через насыпи, величины слоя перелившейся воды и размывов земляного полотна, характерные повреждения сооружений от прохода паводков;

повторяемость паводков разной величины в районе изысканий.

В случае прохода во время изысканий сильных ливней обязательно следует измерять количество выпавших осадков.

Зная количество выпавших осадков и время их выпадения, можно определить вероятность превышения (ВП) паводка.

Обследование следов прошедших паводков может косвенно помочь определению расчетных расходов и объемов стока с определенной вероятностью превышения. Однако обычно повторяемость натурных расходов, прошедших через сооружение, установить довольно сложно. Величины расходов и объемов, определенные приближенно, а не в результате прямых гидрометрических работ, могут иметь значительные отклонения от действительных. Применяемые гидравлические формулы определяют расход, проходящий лишь через сооружение, т.е. искаженный аккумуляцией. Если перед сооружением аккумуляровалась значительная часть объема стока, то фактический расход, притекавший с водосбора, может оказаться в зависи-

мости от пологости бассейна значительно больше. Необходимо также учитывать, что при одной и той же ВП может быть любое количество равновозможных сочетаний интенсивности и продолжительности водоотдачи. В расчетах находят их самое невыгодное сочетание для рассматриваемого водосбора. Тогда вероятности превышения слоев осадков будут идентичны ВП расходов.

Очевидно, что при учете аккумуляции ливневых вод перед сооружениями необходимо определять не только расход, но и объем стока. Для малых водосборов одна из наиболее удобных методик была разработана в МАДИ в 1977 г. (см. § 14.2). В этой связи целесообразной является разработка карт ливневого районирования (см. рис. 14.6) и составление таблиц интенсивности ливня часовой продолжительности, при различных вероятностях превышения (см. табл. 14.1). На основе обработки натуральных данных гидрометеостанций разрабатывают карты изолиний интенсивностей ливней часовой продолжительности, суточных и годовых максимальных слоев осадков для различных ВП.

Раздел четвертый

СИСТЕМА ДОРОЖНОГО ВОДООТВОДА

Глава 15¹

ДОРОЖНЫЙ ВОДООТВОД

15.1. Система поверхностного и подземного дорожного водоотвода

Система дорожного водоотвода состоит из ряда сооружений и отдельных конструктивных мероприятий, предназначенных для предотвращения переувлажнения земляного полотна автомобильных дорог. Она служит для перехвата и отвода воды, поступающей к земляному полотну, или для преграждения доступа ее в верхнюю часть земляного полотна. В результате действия сооружений системы дорожного водоотвода обеспечивают благоприятный водно-тепловой режим земляного полотна и, прежде всего, грунтовых оснований дорожных одежд.

Поверхностный водоотвод. Для быстрого отвода поверхностной воды поперечному профилю земляного полотна и дорожной одежде придают выпуклое очертание; планируют и укрепляют обочины; устраивают прикромочные и откосные лотки и боковые водоотводные каналы (кюветы); в некоторых случаях используют резервы и закладывают испарительные бассейны; устраивают нагорные каналы, перехватывающие воду, стекающую по склонам местности с верховой стороны к дороге; на дорогах низших категорий применяют переливные насыпи и лотковые сооружения; для пропуска водотоков и воды из боковых канав под земляным полотном строят водопропускные трубы и мосты; строят другие сооружения, позволяющие отвести воду в сторону от земляного полотна.

¹ Глава 15 подготовлена на основе материалов проф. О.В. Андреева. Проектирование автомобильных дорог. Справочник инженера-дорожника/Под ред. д-ра техн. наук Г.А. Федотова.

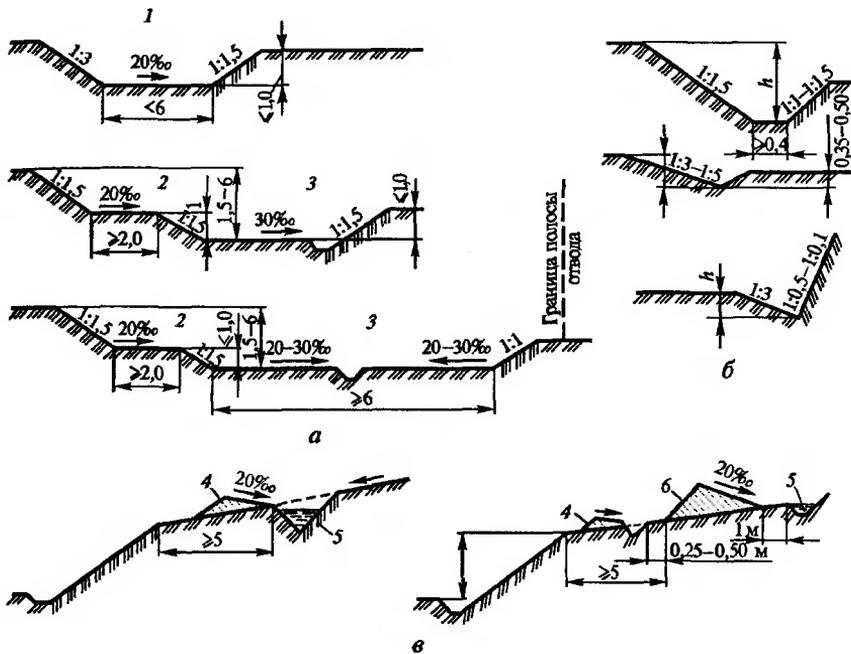
При необеспеченном отводе поверхностной воды и возможном застое ее вблизи дороги в течение длительного времени назначают такое возвышение поверхности покрытия над расчетным уровнем грунтовых и длительно стоящих поверхностных вод, а также над поверхностью земли на участках с необеспеченным стоком, чтобы капиллярное поднятие не достигало верхних слоев грунтового основания дорожных одежд. Необходимое возвышение поверхности покрытия — наиболее эффективный способ обеспечения прочности и долговечности дорожных одежд. Земляные работы по возведению насыпей автомобильных дорог надлежащей высоты при современных средствах механизации, как правило, не вызывают существенных затруднений и заметного удорожания стоимости строительства.

Поперечный уклон, придаваемый поверхности покрытия от середины к обочинам, зависит от типа покрытия (см. § 6.3). Чем меньше ровность поверхности покрытия, тем больший поперечный уклон ему придают, так как вода может застаиваться в местных понижениях и просачиваться в покрытие и под него. Однако требования удобства и безопасности движения автомобилей вынуждают ограничивать величину поперечного уклона некоторыми минимальными значениями, обеспечивающими сток воды.

Обочинам придают большие поперечные уклоны, чем покрытиям, так как обочины имеют меньшую ровность, и при эксплуатации на поверхности обочин нередко появляются также неровности, вызываемые заездами автомобилей в неблагоприятную погоду, а застои воды в неровностях приводят к переувлажнению земляного полотна.

На участках дорог I—III категорий с продольными уклонами более 30% для защиты обочин предусматривают продольные (прикромочные) лотки с периодическим сбросом воды по откосу при помощи специальных устройств — откосных лотков через каждые 50—100 м. Однако в ряде случаев имеет место переполнение откосных лотков и размыв по откосам насыпей.

В пределах населенных пунктов, где происходят частые заезды автомобилей на обочины, поверхность обочин укрепляют гравием, щебнем, шлаком, местными слабыми каменными материалами или материалами, обработанными вяжущими. Если обочины не укреплены или вдоль кромок покрытий нет краевых полос, условия работы кромок покрытий резко ухудшаются, что часто вызывает их обламывание. Кроме того, вдоль кромок покрытий возникают колееобразные углубления, в которые собирается стекающая с водонепроницаемых покрытий вода с последующим переувлажнением верхней части



Р и с. 15.1. Виды водоотводных канав:

а — канавы, совмещенные с боковыми резервами; *б* — трапецидальные и треугольные боковые канавы; *в* — нагорные канавы у выемок; 1 — кювет-резерв; 2 — берма; 3 — резерв; 4 — банкет; 5 — нагорная канава; 6 — отвал

земляного полотна. Случайный съезд правыми колесами автомобилей в колесобразные углубления приводит к дорожно-транспортным происшествиям с тяжелейшими последствиями.

Для отвода воды от земляного полотна служат боковые, водоотводные, нагорные и осушительные канавы (рис. 15.1).

Боковые канавы (кюветы) устраивают в выемках и у насыпей с небольшими рабочими отметками. Они служат для быстрого отвода воды, стекающей во время дождя и таяния снега с поверхности дороги и прилегающей к ней местности. Эти канавы способствуют осушению верхней части земляного полотна в связи с испарением влаги с их внутренних откосов. Однако положительное действие боковых канав сказывается лишь при быстром удалении из них воды. При необеспеченном отводе воды и длительном ее застое канавы, напротив, становятся источниками проникновения воды в земляное полотно и его переувлажнения.

При водопроницаемых грунтах и недостаточно удовлетворительных условиях поверхностного стока боковым канавам придают трапецеидальное сечение с шириной по дну 0,4—0,5 м и глубиной до 0,7—0,8 м, считая от бровки насыпи. Откосам канав в выемках придают заложение 1:1,5—1:3, а у низких насыпей внутренний откос устраивают с заложением 1:3—1:4.

Если земляное полотно возводят в сухих местах с быстрым стоком поверхностных вод, а грунтовые воды расположены глубоко, боковые канавы устраивают в виде треугольных лотков глубиной не менее 30 см. Крутизна откосов лотков 1:3—1:4 дает возможность автомобилям при потере управления съезжать с дороги без опрокидывания. При водопроницаемых песчаных, щебенистых и гравелистых грунтах, обеспечивающих быстрое впитывание воды в любое время года, водоотводные канавы не устраивают.

В прочном скальном грунте делают треугольные лотки глубиной не менее 0,3 м с внутренним откосом 1:3 и внешним откосом 1:1—1:0,5 в зависимости от вида грунта. Глубину канав в равнинной местности назначают по опыту эксплуатации дорог, проверяя ее в случае необходимости гидравлическими расчетами на приток воды с окружающей местности.

Вероятность превышения (ВП) паводков принимают в зависимости от категории дороги. При этом глубину канав назначают таким образом, чтобы низ дренажных устройств дорожных одежд возвышался над дном канавы не менее чем на 20 см.

При гидравлических расчетах канав исходят из следующих ВП расчетных паводков:

Категория дороги	I и II	III	IV и V
Вероятность превышения, %	1	2	3

Воду из боковых канав выводят в пониженные места не реже чем через 500 м. Если дорога проходит по склону для вывода воды из канавы, расположенной с нагорной стороны, под земляным полотном сооружают перепускные трубы. В местах перехода дороги из выемки в насыпь канавы отводят с нагорной стороны в резерв, а с низовой выводят в сторону от выемки с надлежащим укреплением.

Для стока воды по резерву дно его по окончании земляных работ тщательно планируют с уклоном 20‰ в сторону от насыпи. Резервам, ширина которых превышает 6 м, придают вогнутый профиль с уклонами к середине. При продольном уклоне резерва менее 5‰ для лучшего отвода воды в середине резерва делают канаву шириной по дну

0,4—0,5 м. Канавы, отводящие воду из резервов, должны быть обязательно укреплены от размыва.

Не следует пропускать воду через выемки из кюветов на вышележащем участке насыпи. Верховой кювет должен быть выведен в нагорную канаву у выемки, а низовой отведен в сторону от дороги.

Водоотводные канавы предназначены для выпуска воды из кюветов в расположенные поблизости пониженные места. Поперечные сечения водоотводных канав обычно принимают такими же, как и сечение тех канав, из которых отводят воду. Для лучшего пропуска воды и уменьшения объемов земляных работ откосы водоотводных канав устраивают наибольшей крутизны, допустимой по условиям устойчивости грунтов.

Во избежание размыва и заиления водоотводные канавы сопрягают с естественными водотоками по плавным кривым с радиусами, не менее десятикратной ширины канавы поверху.

Нагорные канавы служат для перехвата воды, стекающей по косогору с верховой стороны к дороге и для отвода ее в ближайшие водопропускные сооружения, в резервы и пониженные места рельефа.

Нагорным канавам придают трапециoidalное сечение, размеры которого обосновывают гидравлическими расчетами. При расчетах учитывают увеличение водосборного бассейна канавы по мере удаления от водораздела. Поперечные сечения нагорных канав подбирают по отдельным участкам по мере возрастания площади водосборных бассейнов и расходов воды. Иногда по технико-экономическим соображениям вместо одной нагорной канавы устраивают на некотором расстоянии друг от друга две параллельные, но меньшего сечения.

Нагорные канавы трассируют на местности с такими продольными уклонами, при которых вода не размывает естественный грунт и не требуется укрепления канавы.

Во избежание оплывов или оползания откосов выемок в местах переувлажнения грунтов, которое может возникнуть в результате случайного засорения нагорных канав, расстояние их от края выемки принимают не менее 5 м. На косогорах с крутизной менее 1:5 грунт из нагорных канав используют для устройства невысокого валика (банкета) между выемкой и нагорной канавой. Банкет предохраняет дорогу от затопления при переполнении нагорной канавы.

По боковым, водоотводным и нагорным канавам вода стекает со скоростями, зависящими от их продольных уклонов, поперечного профиля, величины шероховатости стенок и дна, а также от глубины потока. При скорости течения, меньшей 0,4—0,5 м/с, взвешенные в

воде пылеватые частицы выпадают из потока и образуют отложения наносов, что приводит к заилению канав и застою воды.

Для предотвращения этого канавам придают продольные уклоны не менее 5‰ в I—III и не менее 3‰ в IV—V дорожно-климатических зонах. Если это условие выполнено быть не может, рабочую отметку насыпи увеличивают для обеспечения необходимого возвышения поверхности покрытия над уровнем грунтовых и длительно стоящих поверхностных вод.

На участках дорог с большими продольными уклонами боковые канавы укрепляют по гидравлическому расчету, исходя из количества воды, притекающего к отдельным участкам канавы с дороги и прилегающей местности. Расчет ведут по отдельным участкам, учитывая постепенное увеличение расхода по длине канав.

В тех случаях, когда поперечное сечение канав назначают по типовым проектам, тип укреплений принимают в зависимости от продольного уклона на основе многолетней практики (табл. 15.1).

Таблица 15.1. Продольные уклоны канав

Типы укрепления	Уклоны в грунтах, ‰	
	песчаных	суглинистых
Без укрепления	До 10	До 20
Одерновка	10—30	20—30
Мошание	30—50	30—50
Перепады и лотки	> 50	> 50

При больших продольных уклонах продольному профилю дна канав придают ступенчатое очертание, устраивая перепады из сборных железобетонных элементов, монолитного бетона, каменной кладки, а на сельских дорогах — плетней и гравийной засыпки. Прилегающие к перепаду участки дна канав укрепляют мощением. Между перепадами дну канав придают уклоны, не требующие укрепления или соответствующие принятому типу укреплений.

В равнинной местности степных районов IV—V дорожно-климатических зон, когда нельзя отвести воду от дороги по боковым и водоотводным канавам в естественные понижения рельефа, устраивают в стороне от дороги *испарительные бассейны*. Эти бассейны представляют собой котлованы, вокруг которых делают земляные валики для того, чтобы преградить доступ воды с окружающей местности. Ино-

гда вместо специальных испарительных бассейнов можно использовать резервы глубиной до 0,4 м, которые располагают на большем расстоянии от дороги, чем обычно.

Вместимость одного испарительного бассейна не должна превышать 200—300 м³, глубина — 1,5 м, а уровень воды должен быть на 0,6 м ниже бровки земляного полотна. Расчет испарительных бассейнов состоит в подборе такой их вместимости, при которой количество воды, стекающей с земляного полотна во время дождя, успевало бы испариться за период между дождями. Испарительные бассейны устраивают лишь в местностях, где климатические условия (небольшое количество осадков, высокая средняя годовая температура воздуха и сильные ветры) способствуют высокой испаряемости. В северных и центральных районах европейской части РФ, характеризующихся слабой испаряемостью или водонепроницаемыми грунтами, они лишь способствуют заболачиванию местности.

Для испарительных бассейнов необходим дополнительный отвод земли. Они требуют постоянного ухода, в противном случае, испарительные бассейны зарастают сорняками и становятся источниками засорения прилегающих полей. В связи с этим на участках с затрудненным водоотводом всегда целесообразно проектировать земляное полотно в насыпях с такими рабочими отметками, при которых отпадает необходимость в устройстве боковых канав и испарительных бассейнов.

Прикромочные, дождеприемные и откосные водосбросные лотки с водобойными устройствами на выходе из них применяют для отвода воды с поверхности проезжей части и разделительной полосы внегородских автомобильных дорог I—III категорий. Как правило, эти сооружения устраивают из типовых сборных железобетонных блоков, а в отдельных случаях и из монолитного бетона.

Прикромочные лотки располагают вдоль кромки проезжей части или остановочной полосы дороги. Они имеют треугольное поперечное сечение шириной 75(50) см и глубиной 7—9 см.

Из прикромочных лотков воду отводят в откосные водосбросные лотки дождеприемными (переходными, сопрягающими) лотками, также состоящими из типовых элементов. Эти лотки имеют очертания, соответствующие направлению продольных уклонов. На участках спусков дороги применяют дождеприемные лотки несимметричного, а в пониженных местах — симметричного очертания в плане.

Из дождеприемных лотков воду сбрасывают по откосам телескопическими водосбросными лотками (быстротоками), состоящими из железобетонных элементов заводского изготовления. Для предохра-

нения подошвы насыпи от размыва в конце этих лотков устраивают укрепленные бетонными плитами (размером $49 \times 49 \times 8$ см) площадки шириной по 2 м, за которыми устанавливают бетонную стенку в качестве гасителя энергии потока.

Все места сопряжения и швы между сборными железобетонными элементами заполняют монолитным бетоном.

Водопропускные сооружения устраивают в местах пересечения автомобильными дорогами ручьев, суходолов, оврагов и балок, по которым стекает вода от дождей и таяния снега. Количество водопропускных сооружений зависит от климатических условий и рельефа местности; стоимость водопропускных сооружений составляет 8—15% общей стоимости автомобильных дорог с усовершенствованными покрытиями. Поэтому правильный выбор типа и рациональное проектирование водопропускных сооружений, позволяющие индустриализировать их строительство, имеют большое значение для снижения стоимости дороги.

В различных климатических и топографических условиях количество водопропускных сооружений на 1 км дороги в среднем составляет от 0,3 до 3,0.

К основным видам водопропускных сооружений относят *мосты и трубы*. Меньшее распространение имеют другие типы сооружений, пропускающие воду переливом через земляное полотно, — *переливаемые насыпи и сооружения лоткового типа*, применяемые на автомобильных дорогах низших категорий.

Водопропускные сооружения должны быть удобными для движения автомобилей и обеспечивать безопасный пропуск воды. Выполнение этих требований при обязательном соблюдении принципа экономичности сооружений является сложной инженерной задачей, решаемой методами вариантного проектирования или математической оптимизации.

С точки зрения требований автомобильного транспорта в каждом конкретном случае наилучшим считают такое водопропускное сооружение, которое не меняет условий движения автомобилей, не требует изломов в плане и продольном профиле дороги, не стесняет проезжую часть и обочины, а также не нуждается в изменении типа дорожного покрытия. В этом отношении наилучшим типом малых водопропускных сооружений считают трубы, которые свободно можно располагать при любых сочетаниях элементов плана и продольного профиля трассы, различных углах пересечения водотоков и любых высотах насыпи с сохранением постоянного типа покрытия на всем протяжении дороги. Поэтому общее число труб составляет почти 95%

общего количества водопропускных сооружений на автомобильных дорогах.

Устройство мостов предъявляет более высокие требования к продольному профилю дорог. Расположение мостов на вертикальных и горизонтальных кривых или на больших продольных уклонах вызывает усложнение их конструкций. Значительная высота насыпи, например при пересечении глубоких оврагов, вынуждает строить, даже при малых расходах воды, высокие мосты с большой длиной по настилу, что приводит к значительному удорожанию стоимости строительства.

Указанные обстоятельства позволяют рассматривать трубы как основной тип малых водопропускных сооружений на постоянных и периодически действующих водотоках при отсутствии ледохода, карчехода и наледей. В современном дорожном строительстве чаще используют железобетонные мосты и трубы из сборных железобетонных элементов стандартных размеров заводского изготовления или из гофрированного металла. В горной местности иногда устраивают трубы из каменной бутовой кладки.

Для повышения пропускной способности труб без увеличения высоты насыпи устраивают многоочковые, уложенные рядом небольшого диаметра трубы. Наблюдения показали, что в этих случаях расход равномерно распределяется между трубами. По действующим нормам проектирования допускается устраивать трубы, состоящие не более чем из трех отверстий круглого и из двух отверстий прямоугольного поперечного сечения.

Переливаемые насыпи, допускающие перелив паводочных вод через полотно дороги, применяют на автомобильных дорогах III—V категорий. Целесообразность применения таких насыпей обосновывают технико-экономическими расчетами с учетом не только стоимостных показателей, но и убытков от перерывов движения транспорта. При допущении движения транспортных средств во время перелива предусматривают ограждения-ориентиры.

Лотковые сооружения, предназначенные для перелива воды через дорогу, представляют собой либо укрепленные бетонными элементами или монолитным бетоном пониженные участки насыпей автомобильных дорог низших категорий (IV и V), либо участки с отверстиями в виде круглых или прямоугольных труб, пропускающих лишь часть общего расхода.

Лотки без отверстий применяют при пересечении периодически действующих водотоков с глубиной не более 0,15—0,20 м, когда отсутствуют или имеют неопределенный характер водоразделы между

смежными водосборными бассейнами или когда ожидают увеличение расчетных расходов в результате их перераспределения между отдельными водотоками.

Лотки с отверстиями, как правило, применяют в местах, где имеются небольшие постоянные или распластанные водотоки и периодически возможны внезапные высокие ливневые расходы.

Подземный водоотвод. Для предотвращения воздействия грунтовых вод на земляное полотно и дорожную одежду предусматривают достаточное возвышение поверхности покрытия над их уровнем, устраивая в теле земляного полотна прослойки для прерывания перемещения капиллярной, пленочной и парообразной влаги, а также дренажи для понижения уровня этих вод.

К системе дорожного водоотвода относят также *подстилающий дренирующий слой дорожных одежд (дополнительный слой основания)* из песка, гравия и других крупнозернистых материалов с высокими коэффициентами фильтрации, который собирает воду, проникающую через обочины, трещины и швы в покрытиях (рис.15.2, а).

Воду из дренирующего слоя в особо благоприятных условиях отводят на откосы насыпи или в боковые каналы *дренажными воронками* (рис. 15.2, б, в). В весенний период дренирующий слой собирает воду, которая попадает из верхних слоев земляного полотна при таянии ледяных прослоек, образовавшихся на пучинистых участках в процессе зимнего влагонакопления. Дренирующие песчаные слои особенно важно устраивать в II и III дорожно-климатических зонах, при пылеватых грунтах земляного полотна.

В зависимости от ширины проезжей части и климатического района строительства материалы из песка и гравийно-песчаных смесей для дренирующего слоя должны в уплотненном состоянии иметь коэффициент фильтрации от 3 до 10 м /сут. Толщину подстилающего дренирующего слоя назначают не менее указанной в табл. 15.2.

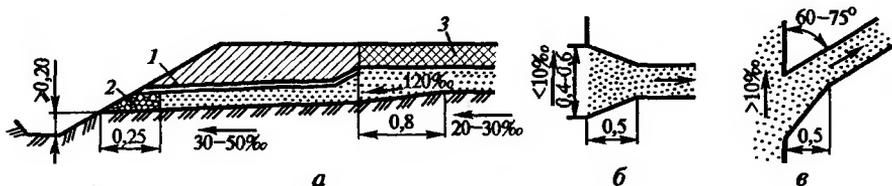


Рис. 15.2. Дренажные воронки:

а — поперечный разрез полотна дороги; б — примыкание воронки к песчаному слою при малых уклонах; в — то же при уклонах более 10%; 1 — прослойка дерна или мха; 2 — щебень или гравий; 3 — дорожная одежда

Таблица 15.2. Толщина песчаного подстилающего слоя

Покрытия	Грунты земляного полотна	Толщина подстилающего слоя, м, при увлажнении, см		
		избыточном	нормальном	недостаточном
Цементобетонные	Мелкие пески	15	10	10
	Супеси	20—25	15—20	10
	Суглинки тяжелые и глины	25—35	20—25	15
	Пылеватые грунты	35—50	25—40	15—20
Нежесткие на дорогах I—III категорий	Мелкие пески	10	—	—
	Супеси	20	15	10
	Суглинки тяжелые и глины	30	20	15
	Пылеватые грунты	35	25	20
Нежесткие на дорогах IV и V категорий	Мелкие пески	10	10	—
	Супеси	15	15	10
	Суглинки тяжелые и глины	25	20	15
	Пылеватые грунты	30	20	15

Дренажные воронки заполняют хорошо дренирующим материалом (одноразмерным щебнем, галькой размером 40—60 мм и т.д.), по которому вода просачивается из земляного полотна. Дренажные воронки сечением $0,4 \times 0,2$ м располагают через 4—6 м в шахматном порядке (см. рис. 15.2, б).

Пропускная способность дренажных воронок невелика, поэтому для отвода воды, заполнившей поры дополнительного слоя основания, необходимо значительное время. Обочины, часто покрытые зимой слоем снега, начинают оттаивать примерно на неделю позже, чем грунт под проезжей частью. В наиболее ответственный для службы дороги период весеннего оттаивания воронки находятся в промерзшем состоянии и не могут отводить воду, поступающую под проезжую часть и скапливающуюся в дополнительном слое основания.

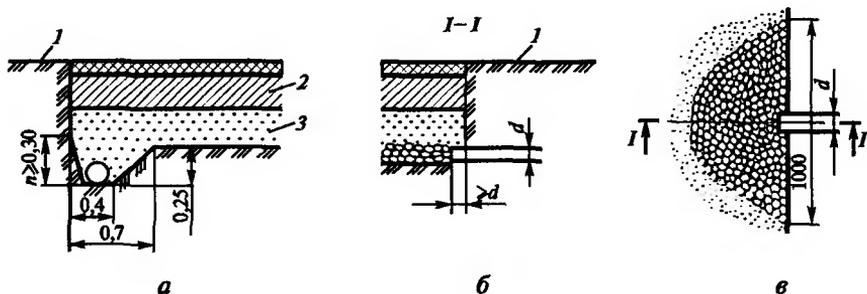


Рис. 15.3. Дренажные трубы, укладываемые в песчаный слой:

a — продольная дренажная труба; *б* — приемная часть поперечной трубы; *в* — то же в плане; *1* — обочина; *2* — слои дорожной одежды; *3* — песчаный слой

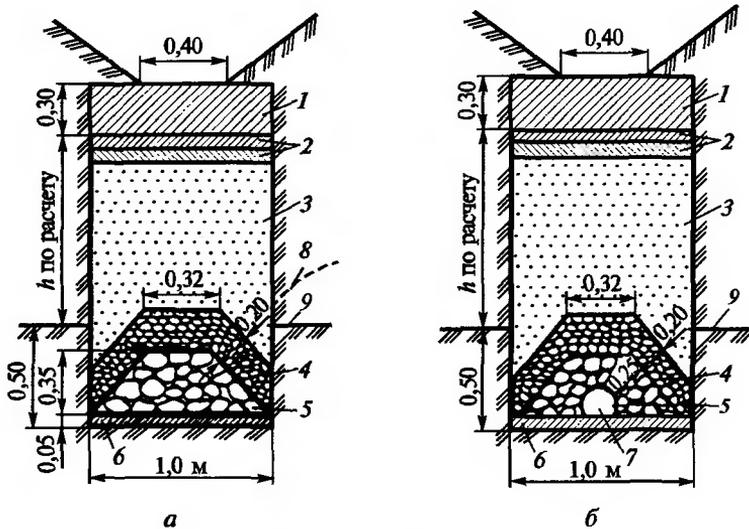
Значительное увеличение пропускной способности воронок возможно путем их уширения, поэтому часто соседние дренажные воронки объединяют в сплошной дренирующий слой (см. рис. 15.2, *a*). Такое устройство песчаного слоя имеет также некоторые технологические преимущества.

В местах с неудовлетворительными грунтово-гидрологическими условиями воду из дренирующего слоя отводят поперечными и продольными *дренажными трубами* из асбоцементных или керамических (гончарных) труб (рис. 15.3).

Вместо дренажных труб могут быть устроены прорезы, заполненные крупным дренирующим материалом.

При использовании дренажных труб необходимо принимать меры, предотвращающие проникание потока холодного воздуха в земляное полотно.

Закрытый дренаж (рис. 15.4) состоит из уложенной в грунте дрены — трубы (гончарной, керамической, бетонной или деревянной), в стенах которой устраивают отверстия для приема воды. Нередко вода поступает в эти трубы в стыках между звеньями, которые укладываются концами на специальные подкладки, исключающие смещение одного звена относительно другого. Чтобы труба не засорялась грунтом, ее окружают пористой засыпкой, крупность которой уменьшается по направлению к стенкам траншеи (обратный фильтр). Пористая засыпка собирает притекающую из грунта воду, которая стекает по трубе. В некоторых случаях вместо трубы укладывают каменную наброску.



Р и с. 15.4. Поперечное сечение закрытого дренажа:

а — с каменной (фильтрующей) засыпкой; *б* — с дренажной трубой; 1 — утрамбованная глина; 2 — два слоя дерна корнями вверх или 3 см грунта, обработанного битумом; 3 — крупнозернистый или среднезернистый песок; 4 — щебень или гравий крупностью 5—10 мм; 5 — то же крупностью 40—70 мм; 6 — щебень, втрамбованный в грунт; 7 — керамическая или асбоцементная труба диаметром 15—20 мм; 8 — кривая депрессии; 9 — водоупор

Дренажи можно использовать как для понижения уровня грунтовых вод, так и для перехвата грунтовой воды, притекающей к дороге со стороны. Осушающее действие дренажей заключается в том, что при заглублении в грунт ниже уровня грунтовых вод труба или канава отводит воду, просачивающуюся из прилегающей части грунта, в результате чего вблизи от дренажа образуется осушенная зона.

15.2. Нормы допускаемых скоростей течения

Допускаемые скорости течения воды для грунтов используют при расчетах размывов в канавах, за малыми водопропускными сооружениями, при проверке возможного ограничения размыва по геологическим условиям под большими и средними мостами. Нормы допускаемых скоростей течения для укреплений необходимы для назначения конструкций укреплений канав, подмостовых русел малых мос-

тов и укреплений других сооружений, подверженных опасному воздействию водного потока.

В табл. 15.3 приведены допускаемые донные и средние скорости течения для несвязанных грунтов при плоском равномерном движении воды. Для грунтов с размером частиц $d \geq 0,001$ м донные неразрывающиеся скорости составляют:

$$v_{0д} = 1,6\sqrt{gd}, \quad (15.1)$$

где g — ускорение свободного падения, м/с^2 ; d — диаметр частиц, м.

Для более мелких грунтов эта скорость пропорциональна крупности частиц в степени $1/4$, а для совсем мелких грунтов она не зависит от крупности вообще. Наименьшая неразрывающаяся донная скорость не может быть меньше 0,2 м/с.

Переход от донной неразрывающейся скорости $v_{0д}$ к средней v_0 осуществляют делением на переходный коэффициент δ . Для русел $\delta = 0,7$ и $\delta = 0,9$ (соответственно в меженной и побочной его частях). Для искусственных русел и канав переходный коэффициент вычисляют по формуле:

$$\delta = (d/h)^{1/6},$$

где h — глубина потока, м.

При расчетах удобно использовать значения допускаемых элементарных расходов, а не скоростей, т.е.

$$q_0 = v_0 h,$$

где v_0 — неразрывающаяся средняя скорость, м/с.

Данные о значениях допускаемых элементарных расходов q_0 для разных глубин при плоском равномерном движении воды приведены в табл. 15.4.

Для связанных грунтов неразрывающаяся скорость течения зависит не от крупности частиц грунта, а от его плотности и внутреннего сцепления, меньшего в супесях и большего в глинах. Значения величин допускаемых донных и средних скоростей при различных коэффициентах перехода и плоском равномерном движении воды приведены в табл. 15.5.

Допускаемые скорости течения воды для некоторых типов укреплений представлены в табл. 15.6.

Т а б л и ц а 15.3. Донные и средние допускаемые (неразмывающие) скорости для несвязанных грунтов

Грунт	Размер частиц, мм	Донная неразмывающая скорость, м/с	v_0 , м/с, при значениях δ для естественных русел		Средние неразмывающие скорости v_0 , м/с, воды при глубине искусственных русел, м								
			0,7	0,9	0,2	0,5	1	2	3	4	5	6	
Песок: мелкий средний крупный	0,05	0,20	0,30	0,20	0,40	0,50	0,55	0,60	0,65	0,70	0,70	0,70	0,75
	0,25	0,20	0,30	0,20	0,45	0,55	0,60	0,65	0,70	0,75	0,75	0,80	0,80
	1,0	0,20	0,35	0,20	0,50	0,60	0,65	0,75	0,80	0,85	0,85	0,85	0,90
Гравий: мелкий средний крупный	2,5	0,25	0,35	0,30	0,50	0,60	0,70	0,75	0,80	0,85	0,90	0,90	0,90
	5	0,35	0,50	0,40	0,65	0,75	0,85	0,95	1,05	1,10	1,10	1,10	1,15
	10	0,50	0,70	0,55	0,85	0,95	1,05	1,20	1,35	1,35	1,40	1,40	1,45
Галька: мелкая средняя крупная	15	0,60	0,90	0,70	0,95	1,10	1,25	1,40	1,50	1,55	1,60	1,60	1,65
	25	0,80	1,15	0,90	1,10	1,30	1,45	1,65	1,80	1,85	1,90	1,90	2,00
	40	1,00	1,45	1,10	1,30	1,50	1,70	1,90	2,10	2,15	2,25	2,25	2,40
Булыжник: мелкий средний крупный	75	1,40	1,95	1,50	1,60	1,90	2,10	2,40	2,60	2,65	2,75	2,75	2,85
	100	1,60	2,25	1,75	1,75	2,05	2,30	2,60	2,85	2,90	3,05	3,05	3,10
	150	1,95	2,80	2,15	2,05	2,40	2,65	3,00	3,30	3,35	3,50	3,50	3,60
Валуны: мелкие средние крупные	200	2,25	3,20	2,50	2,20	2,60	2,95	3,30	3,60	3,70	3,85	3,85	3,95
	300	2,75	3,95	3,05	2,55	3,00	3,35	3,80	4,15	4,25	4,40	4,40	4,55
	400	3,15	4,50	3,50	2,80	3,30	3,70	4,10	4,55	4,65	4,80	4,80	4,95
		и >	и >	и >	и >	и >	и >	и >	и >	и >	и >	и >	и >

Грунт	Средние неразмывающие скорости v_b , м/с, воды при глубине искусственных русел, м									
	7	8	9	10	12	14	16	18	20	
Песок: мелкий средний крупный	0,75	0,80	0,80	0,80	0,80	0,85	0,85	0,90	0,90	0,90
	0,85	0,85	0,85	0,90	0,90	0,95	0,95	0,95	0,95	1,00
	0,90	0,95	0,95	0,95	1,00	1,00	1,00	1,00	1,05	1,05
Гравий: мелкий средний крупный	0,95	0,95	1,00	1,00	1,05	1,05	1,10	1,10	1,10	1,10
	1,20	1,20	1,25	1,25	1,30	1,35	1,35	1,40	1,40	1,40
	1,50	1,50	1,55	1,60	1,65	1,65	1,70	1,75	1,75	1,75
Галька: мелкая средняя крупная	1,70	1,75	1,80	1,85	1,90	1,90	1,95	2,00	2,00	2,00
	2,05	2,10	2,10	2,15	2,20	2,25	2,30	2,40	2,40	2,40
	2,35	2,40	2,45	2,50	2,60	2,65	2,70	2,80	2,80	2,80
Булыжник: мелкий средний крупный	2,90	3,00	3,05	3,10	3,20	3,30	3,40	3,45	3,45	3,45
	3,20	3,30	3,35	3,40	3,50	3,60	3,70	3,75	3,80	3,80
	3,65	3,75	3,85	3,90	4,05	4,15	4,25	4,30	4,40	4,40
Валуны: мелкие средние крупные	4,05	4,15	4,20	4,30	4,45	4,55	4,65	4,75	4,80	4,80
	4,65	4,75	4,85	4,95	5,10	5,20	5,35	5,45	5,50	5,50
	5,10	5,20	5,30	5,40	5,60	5,70	5,85	5,95	6,05	6,05
	и >	и >	и >	и >	и >	и >	и >	и >	и >	и >

Т а б л и ц а 15.4. Допускаемые (неразмывающие) элементарные расходы для несвязанных грунтов

Грунт	Средний диаметр частиц, мм	Неразмывающие элементарные расходы, м ³ /с, при глубине русел, м						
		0,2	0,5	1	2	3	4	5
Песок: мелкий средний крупный	0,05	0,25	0,55	1,25	1,95	2,80	3,60	4,45
	0,25	0,25	0,60	1,35	2,15	3,00	3,90	4,83
	1,00	0,30	0,65	1,45	2,30	3,30	4,25	5,25
Гравий: мелкий средний крупный	2,50	0,30	0,70	1,55	2,50	3,45	4,50	5,55
	5	0,40	0,85	1,90	3,15	4,30	5,60	6,95
	10	0,50	1,05	2,40	4,00	5,45	7,05	8,75
Галька: мелкая средняя крупная	15	0,55	1,25	2,75	4,55	6,20	8,10	10,00
	25	0,65	1,45	3,30	5,40	7,35	9,60	11,95
	40	0,75	1,70	3,85	6,30	8,60	11,20	13,80
Булыжник: мелкий средний крупный	75	0,95	2,10	4,75	7,80	10,65	13,90	17,15
	100	1,05	2,30	5,20	8,55	11,65	15,20	18,65
	150	1,20	2,65	5,95	9,80	13,40	17,45	21,60
Валуны: мелкие средние крупные	200	1,30	2,95	6,55	10,80	14,75	19,20	24,70
	300	1,50	3,35	7,55	12,40	16,95	22,05	27,30
	400	1,65	3,70	8,25	13,55	18,50	24,10	29,80
	и >	и >	и >	и >	и >	и >	и >	и >

Грунт	Неразмывающие элементарные расходы, м ³ /с, при глубине русел, м									
	7	8	9	10	12	14	16	18	20	
Песок: мелкий средний крупный	5,30	6,20	7,10	8,10	10,00	12,00	14,00	16,00	18,00	
	5,85	6,75	7,70	8,80	10,80	13,00	15,70	17,45	18,80	
	6,25	7,35	8,35	9,35	11,70	14,15	16,50	18,90	21,50	
Гравий: мелкий средний крупный	6,60	7,70	8,85	10,00	12,60	14,80	17,35	19,90	22,40	
	8,25	9,65	11,10	12,60	14,70	18,60	21,80	25,00	28,10	
	10,40	12,15	13,95	15,85	18,35	20,40	27,45	31,50	35,40	
Галька: мелкая средняя крупная	11,95	13,90	16,00	18,15	21,00	26,80	31,50	36,10	40,50	
	14,15	16,50	19,00	21,55	25,00	31,80	37,30	42,85	48,10	
	16,50	19,25	22,15	25,20	29,10	37,10	43,50	50,00	56,05	
Бульжник: мелкий средний крупный	20,50	23,85	27,50	31,20	36,10	46,00	54,00	62,00	69,50	
	22,40	26,10	30,05	34,10	39,50	50,40	59,00	66,80	76,10	
	25,80	30,00	34,50	39,15	45,30	57,85	67,90	77,80	87,45	
Валуны: мелкие средние крупные	28,30	33,00	38,00	43,05	49,85	63,50	74,50	85,50	96,05	
	32,50	37,80	43,60	49,50	57,40	73,00	85,50	98,45	110,50	
	35,60	41,45	47,60	54,05	62,55	80,00	90,50	107,50	120,00	
	и >	и >	и >	и >	и >	и >	и >	и >	и >	

Т а б л и ц а 15.5. Допускаемые (неразмывающие) скорости для связанных грунтов

Грунт	Донная неразмывающая скорость, м/с	Средние неразмывающие скорости, м/с, при значениях δ для естественных русел		Средние неразмывающие скорости, м/с, при глубине русел, м			
		0,7	0,9	0,2—0,5	1	2	3 и >
Супесь:							
малоplotная	0,20	0,30	0,20	0,20	0,25	0,30	0,35
среднеplotная	0,30	0,45	0,35	0,30	0,40	0,45	0,50
plotная	0,40	0,55	0,45	0,40	0,50	0,55	0,60
очень plotная	0,50	0,70	0,55	0,50	0,60	0,70	0,80
Глина и суглинок:							
малоplotные	0,35	0,50	0,40	0,35	0,40	0,45	0,50
среднеplotные	0,70	1,00	0,80	0,70	0,85	0,95	1,10
plotные	1,00	1,40	1,10	1,00	1,20	1,40	1,50
очень plotные	1,40	2,00	1,55	1,55	1,40	1,90	2,10
Лёсс:							
малоplotный	0,30	0,45	0,35	0,30	0,40	0,45	0,50
среднеplotный	0,60	0,85	0,65	0,60	0,70	0,80	0,85
plotный	0,80	1,15	0,90	0,80	1,00	1,20	1,30
очень plotный	1,10	1,55	1,20	1,10	1,30	1,50	1,70

Т а б л и ц а 15.6. Допускаемые скорости воды для укреплений

Тип укрепления	Размер камня, см	Допускаемые скорости течения, м/с, при средней глубине потока, м			
		0,4	1,0	2,0	3,0
Одерновка плашмя	—	0,9	1,1	1,3	1,4
То же в стенку	—	1,5	1,8	2,0	2,2
Одиночное мощение на щебне	15	2,5	3,0	3,5	4,0
То же	20	3,0	3,5	4,0	4,5
То же	25	3,5	4,0	4,5	5,0
Одиночное мощение с подбором лица и грубым приколом на щебне	20	3,5	4,5	5,0	5,5
То же	25	4,0	4,5	5,5	5,5
То же	30	4,0	5,0	6,0	6,0
Двойное мощение из рваного камня на щебне	15—20	3,5	4,5	5,0	5,5
Бутовая кладка из известняка	—	3,0	3,5	4,0	4,5
Бетон класса В30	—	6,0	7,0	8,0	9,0
Бутовая кладка из камня крепких пород	—	6,5	8,0	10,0	12,0

Примеры использования таблиц 15.3—15.5.

1. Элементарный расход воды в отверстии малого моста без укрепления $q = 2,8 \text{ м}^3/(\text{с} \cdot \text{м})$. Грунт — мелкий песок. Глубина до размыва 2 м.

Необходимо определить глубину после размыва.

По табл. 15.4 устанавливаем интерполяцией, что $q = 2,8 \text{ м}^3/(\text{с} \cdot \text{м})$ соответствует глубине после размыва $h = 4 \text{ м}$.

2. Средняя скорость течения в русле под большим мостом после размыва 1,45 м/с. Ожидаемая глубина после размыва $h = 14 \text{ м}$. На глубине 10 м размывом вскрыт пласт мелкой гальки. Необходимо установить, будет ли галька ограничивать размыв.

По табл. 15.3 устанавливаем, что средняя неразмывающая скорость для мелкой гальки в русле (при $\delta = 0,7$) равна всего $v_0 = 0,90 \text{ м/с}$.

Следовательно, мелкая галька размыва не ограничит.

3. Определить по условиям примера 1, при какой скорости течения прекращается размыв.

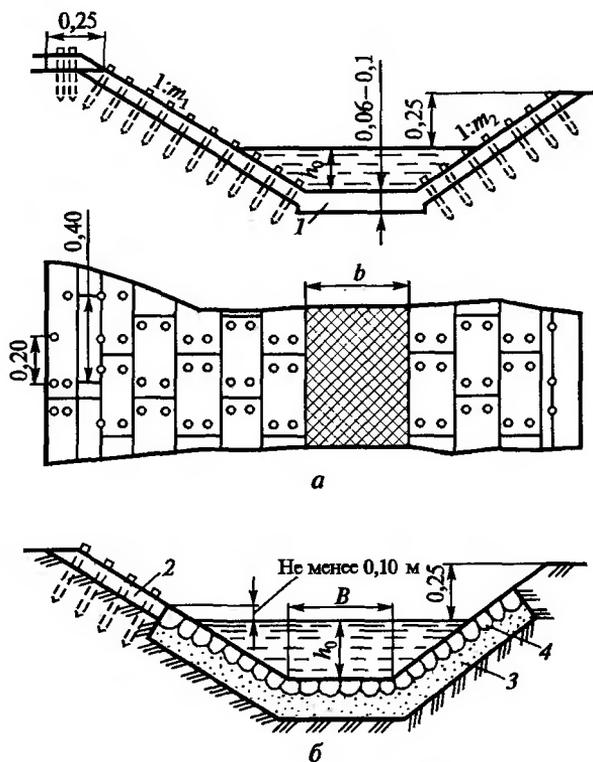
По табл. 15.3 находим, что мелким пескам при $h = 4 \text{ м}$ соответствует средняя неразмывающая скорость $v_0 = 0,7 \text{ м/с}$.

15.3. Гидравлический расчет дорожных канав

Дорожные канавы рассчитывают по уравнению равномерного течения жидкости. Если длина канавы (кювета) невелика, то расчет ведут по одному максимальному значению расхода, собирающемуся к замыкающему створу расчетного участка. При большой длине канавы (например, нагорной) или при большой площади водосбора, с которой вода стекает к канаве, целесообразно делить ее на ряд конструктивных участков по длине и рассчитывать каждый участок на свое значение расхода.

Площадь, с которой стекает вода в низовой кювет длиной l , определяют как половину ширины дороги. К верховому кювету вода стекает не только с половины ширины дороги, но и с пространства до нагорной канавы, а при ее отсутствии — с некоторой площади, водораздельные линии которой могут быть найдены по плану в горизонталях или по топографической карте. Для расчета более опасного ливневого стока к канавам используют формулу (14.5) полного стока (в связи с малостью площадей бассейнов).

Типы укреплений канав выбирают на основании результатов гидравлических расчетов. Обычно при уклоне дна 5—10‰ канаву устраивают без укрепления. При больших уклонах применяют следующие



Р и с. 15.5. Укрепление канав:

a — дерном (дно щебнем); *б* — мошением; 1 — щебень; 2 — дерн; 3 — подготовка под мошение; 4 — камень

щие типы укреплений: при уклонах дна от 10 до 30‰ — засев трав, одерновка или щебневание; от 30 до 50‰ — монолитный бетон, бетонные плиты или мошение; при уклонах более 50‰ — энергию потока гасят устройством специальных сооружений — перепадов и быстотоков (см. § 15.4). Кроме указанных типов укреплений используют также глинобетон, обработанный вяжущими материалами грунт, а в последнее время стали использовать асфальтобетон.

Одерновку плашмя и в стенку применяют для укрепления откосов. Дно укрепляют одерновкой только при ширине канавы более 1 м (рис. 15.5, *a*).

При ширине менее 1 м дно укрепляют щебнем, крупным гравием, доменным шлаком с утрамбованием. Толщина слоя щебня — 8—10 см. Дерн (для укрепления одерновкой плашмя) должен быть свежий, луговой, плотный. Торфяной и болотный дерн непригодны.

Запрещается применять дернины ломаные, с нарушенной корневой структурой. Размер штучных дернин должен быть не менее 20×25 см, толщина дерна 6—8 см. Дернины укладывают с перевязкой швов. При укреплении одерновкой в стенку (с обязательным перекрытием всех швов) дернина должна перекрывать соседнюю дернину с каждой стороны не менее чем на 6—8 см. В засушливых районах и в особо сухих местах одерновка плашмя и в стенку не рекомендуется. Следует иметь в виду, что укрепление одерновкой требует больших затрат ручного труда.

Мощение (рис. 15.5. б) выполняют камнем высотой 12—14, 14—16 и 16—18 см.

При песчаных и супесчаных грунтах обязательна укладка между грунтом и каменным мощением слоя глины толщиной 10—15 см. Мощение выполняют на слое сена, мха, соломы или щебня. Камни при устройстве укрепления должны быть уложены плотно, тычком, с тщательным заполнением промежутков щебнем и утрамбовкой. Укладка отдельных камней плашмя не допускается. Укрепление каменным мощением также плохо поддается механизации и механизации строительных работ.

Для устройства глинобетонных укреплений применяют глинобетон из мягкой жирной глины с щебнем из природного камня или кирпича. Толщина глинобетонного укрепления должна составлять не менее 25 см в районах с умеренным климатом и не менее 15 см в южных районах. Допускаемые скорости течения воды для глинобетонных укреплений принимают как для плотной твердой глины. Слой глинобетона можно успешно применять в качестве основания для одиночной мостовой при супесчаных грунтах укрепляемого русла.

Укрепление грунтов путем обработки их вяжущими (парафинистой нефтью, мазутом, нефтяными остатками, жидким битумом, дегтем и т.д.) целесообразно применять при строительстве дорог на песчаных и супесчаных грунтах. Толщину обработанного слоя грунта следует принимать в пределах от 5 до 10 см. Обработку ведут методом смешения. При толщине грунта 5 см, обработанного органическими вяжущими, допускаются скорости течения до 1 м/с, а при толщине 10 см — до 5 м/с.

Укрепление одерновкой и мощением очень трудоемко. В связи с этим все более широкое распространение получают индустриальные типы укреплений или приемы, поддающиеся механизации, например засев трав по подготовленному грунту вместо одерновки. При больших скоростях течения можно применять заливку тощим бетоном (на низких марках цемента) по подготовленному щебеночному слою. Особенно широко применяют облицовку в виде бетонных плит

размером 50 × 50 × 8 см. В последние годы все более широкое применение при производстве укрепительных работ стал находить асфальтобетон.

Выбор того или иного типа укрепления канав зависит от скорости протекания воды, назначения канавы и наличия местных материалов. Тип укрепления выбирается по табл. 15.3, 15.5 и 15.6.

Скорость течения воды определяют по формуле Шези—Маннинга:

$$v = \frac{R^{2/3} I^{1/2}}{n} = C\sqrt{RI}, \quad (15.2)$$

где R — гидравлический радиус; I — уклон дна канавы; C — коэффициент Шези; n — коэффициент шероховатости (табл. 15.7).

Т а б л и ц а 15.7. Коэффициенты шероховатости n

Укрепление	Значение n	Укрепление	Значение n
Засев травой или одерновка	0,025	Бетонные плиты	0,017
Мошание	0,020	Неукрепленные канавы	0,030

Для вычисления $C = R^{1/6}n^{-1}$ можно использовать график (рис. 15.6).

Гидравлические элементы трапецеидальных канав могут быть найдены по следующим зависимостям:

а) площадь сечения потока

$$\omega = bh + \frac{m_1 + m_2}{2} h^2, \quad (15.3)$$

где b — ширина канавы по дну; h — глубина воды, несколько меньшая, чем полная глубина канавы (приблизительно на 0,2 м); m_1 и m_2 — в общем случае не равные показатели крутизны откосов канав;

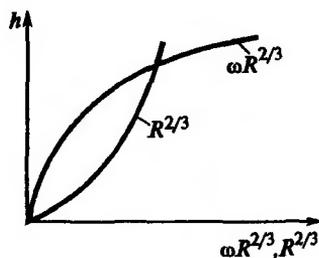
б) смоченный периметр

$$\chi = b + h(\sqrt{1+m_1^2} + \sqrt{1+m_2^2}). \quad (15.4)$$

При $b = 0$ приведенные выше формулы будут справедливы для треугольного поперечного сечения канав;

в) гидравлический радиус

$$R = \omega / \chi. \quad (15.5)$$



Р и с. 15.6. Графики к расчету канав

Наиболее часто встречаются две задачи расчета.

1-я з а д а ч а. Определить пропускную способность канавы при заданной ее глубине $h_{\text{кан}}$, известных материале укрепления стенок и уклоне. В этом случае расчет сводится к определению допустимой глубины воды в канаве ($h_{\text{кан}} - z$), где z — запас по какому-либо заданному условию или 0,2 м; затем по формулам (15.3), (15.4), (15.5) определяют гидравлические элементы потока, по формуле (15.2) находят скорость и вычисляют пропускную способность канавы $Q = \omega v$.

2-я з а д а ч а. Определить глубину наполнения канавы, зная ее уклон, расход; подобрать тип укрепления. Задача решается последовательными приближениями, так как скорость течения зависит от шероховатости, а шероховатость соответствует типу укрепления, назначаемому по скорости течения.

Рекомендуется графоаналитическое решение, которое сводится к построению графика

$$\omega R^{2/3} = \frac{n Q}{\sqrt{I}} f(h_{\text{кан}} - z).$$

Задавая несколько значений глубины, вычисляют R по формулам (15.3), (15.4), (15.5), а затем функции $R^{2/3}$ и $\omega R^{2/3}$ и строят график (см. рис. 15.6).

Откладывая на оси абсцисс значения Al при различных n (соответствующих разным типам укреплений), где $A = Q\sqrt{I}$, получают глубину и соответствующие им функции $R^{2/3}$. Затем вычисляют скорости по полученным глубинам наполнения по формуле (15.2) и проверяют соответствие их принятым типам укреплений.

15.4. Косогорные сооружения поверхностного водоотвода

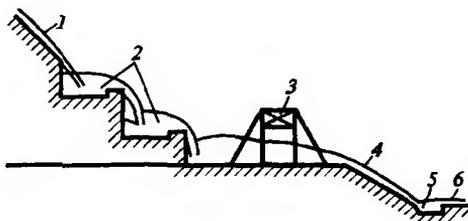
Для предупреждения размыва мостов и труб на косогорах, а также и склонов косогоров текущей водой устраивают подводящие и отводящие русла (рис. 15.7) в виде быстротоков, перепадов с водобойными колодцами, консольных водосбросов и т.д.

Искусственные русла проектируют в соответствии с местными условиями, имея в виду следующие характеристики отдельных типов косогорных сооружений:

быстротоки (рис. 15.8, а) применяют на любых уклонах, больше критических. В связи с большими скоростями протекания воды в местах сопряжения быстротока с другими сооружениями предусматривают устройства гасителей энергии, а сам быстроток укрепляют в соответствии со скоростью потока;

Р и с. 15.7. Косогорные соору-
жения у малого моста:

1 — естественное русло; 2 — перепады с
водобойными колодцами; 3 — мост;
4 — быстроток; 5 — водобойный колодец;
6 — уступ



перепады с водобойными колодцами (рис. 15.8, б) применяют глав-
ным образом на значительных уклонах (перепады без водобойных ко-
лодцев практически не устраивают, так как они могут быть размеще-
ны только на небольших уклонах);

консольные водосбросы (рис. 15.8, в), лотки большого уклона, при-
поднятые на опорах над поверхностью, применяют для пропуска
воды над дорогой в том случае, когда устройство водопропускного со-
оружения под дорожной насыпью оказывается менее целесооб-
разным.

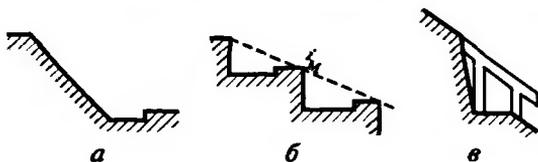
Расчет быстротока (рис. 15.9). *Быстротоком* называют искусст-
венное открытое русло с уклоном дна больше критического, направ-
ляющее быстротекущий поток воды из верхнего участка водовода в
нижний. Ширина дна лотка быстротока может быть равной или
меньше ширины дна подводящего русла. В последнем случае перед
переломом рельефа местности устраивают переходный участок с уче-
том особенностей расчета сужающихся бурных потоков. Последова-
тельность гидравлического расчета быстротока следующая:

определяют ширину быстротока по заданным значениям скоро-
сти течения воды v_0 , уклона I и коэффициента шероховатости n :

$$b = \frac{nQ}{h_0^{5/2} I^{1/2}} = \frac{Q I^{3/4}}{n^{3/2} v_0^{5/2}},$$

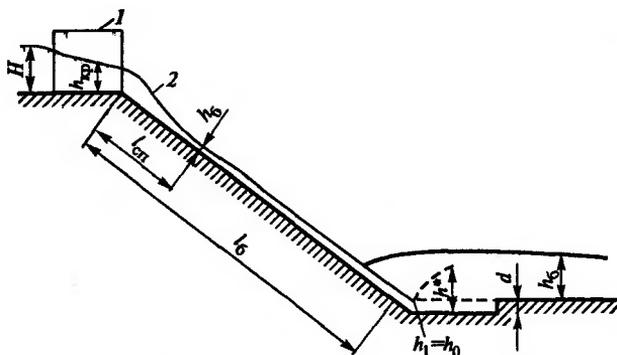
где n — коэффициент шероховатости быстротока, назначаемый с
учетом аэрации, зависящей от уклона и материала стенок быстрото-
ка; h_0 — глубина воды в быстротоке; v_0 — допускаемая скорость тече-
ния на быстротоке.

Данная формула выведена при допущении, что гидравлический
радиус мало отличается от глубины потока.



Р и с. 15.8. Основные типы
косогорных сооружений:

а — быстроток; б — перепады с водо-
бойными колодцами; в — консоль-
ный водосброс; I_m — уклон местности



Р и с. 15.9. Расчетная схемы быстротока:

1 — входной оголовок; 2 — кривая спада

Определяют глубину воды в конце быстротока:

$$h_0 = \frac{Q}{b v_0};$$

определяют глубину воды на входе в быстроток из канала с уклоном $I < I_{кр}$, которая равна критической:

$$h_{кр} = \sqrt[3]{\frac{Q^2}{g b^2}}; \quad (15.6)$$

выясняют условия затопления струи на выходе из быстротока в русло с уклоном меньше критического. Для этого вычисляют вторую сопряженную глубину прыжка:

$$h'' \approx 0,45 v_0 \sqrt{h_0}.$$

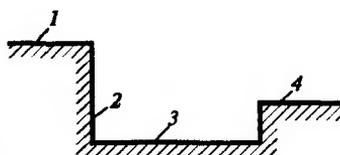
Если глубина h_6 в русле за быстротоком больше, чем глубина за прыжком h'' , то прыжок затоплен, и скорость за быстротоком определяется глубиной потока h_6 . Если же эта глубина меньше, чем глубина h'' (т.е. $h_6 < h''$), то в целях сокращения участка высоких скоростей в русле за быстротоком устраивают водобойный уступ (колодец), глубина которого:

$$d = 1,1 h'' - h_6.$$

Необходимую длину водобойного колодца (от конца быстротока до конца водобойного уступа) рассчитывают по формуле подпертого прыжка:

$$l_{\text{кол}} = 3(h'' - h_0).$$

Расчет перепада с водобойным колодцем. Перепадом называют сооружение, сопрягающее два участка водовода, расположенных в разных уровнях. Он может быть одноступенчатым или многоступенчатым. В практике дорожного строительства, как правило, применяют перепады только колодезного типа.



Р и с. 15.10. Схема перепада с водобойным колодцем

Перепад с водобойным колодцем состоит из следующих элементов (рис. 15.10): входа 1, стенки падения 2, водобоя 3 и выхода-уступа 4, если перепад одиночный, или водобойной стенки, если перепад один из цепи перепадов с колодцами.

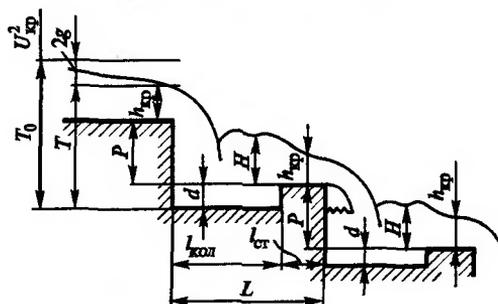
Схема гидравлического расчета перепада с водобойным колодцем следующая (рис. 15.11):

назначают ширину водобойного колодца b , исходя из нормы расхода $0,5-1,0 \text{ м}^3/\text{с}$ на 1 м ширины колодца. Чаще всего ширину колодца делают одинаковой с отверстием водопропускного сооружения. Высоту перепада p назначают путем деления общего падения уровня на участке расположения перепадов на число перепадов, назначаемое сначала ориентировочно;

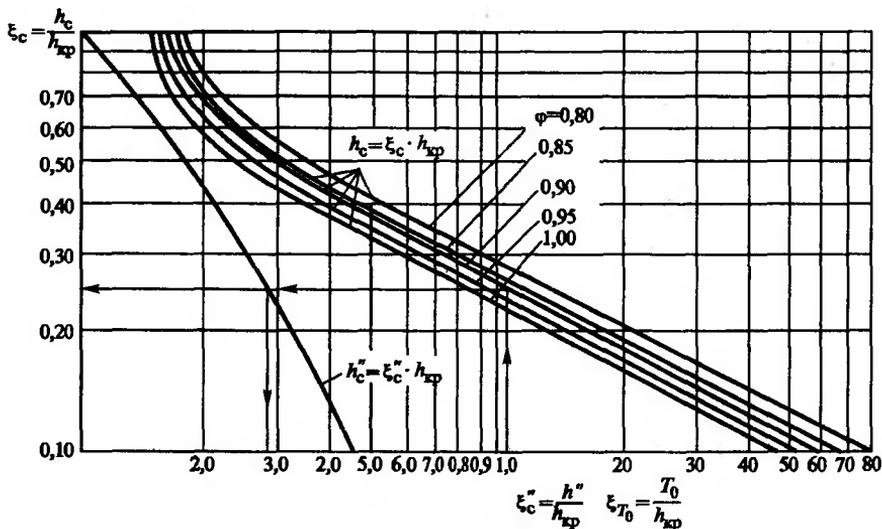
определяют глубину воды на входе, равную критической, по формуле (15.6);

определяют глубину в сжатом сечении падающей струи. Для этого подсчитывают энергию сечения на входе, задаваясь ориентировочно глубиной колодца d :

$$T_0 = 1,5h_{\text{кр}} + p + d;$$



Р и с. 15.11. Расчетная схема многоступенчатого перепада



Р и с. 15.12. График для расчета перепадов

определяют относительную энергию:

$$\xi_{T_0} = \frac{T_0}{h_{кр}} = 1,5 + \frac{p+d}{h_{кр}};$$

по графику (рис. 15.12) определяют относительную глубину после прыжка в сжатом сечении, задавая коэффициент скорости φ :

$$\xi_c'' = \frac{h_c''}{h_{кр}},$$

вычисляют глубину после прыжка:

$$h_c'' = \xi_c'' h_{кр}.$$

Порядок пользования графиком показан стрелками на рис. 15.12; определяют глубину воды перед водобойной стенкой:

$$H = H + d = 1,7h_{кр} + d;$$

проверяют достаточность заданной глубины колодца. Необходимо, чтобы:

$$h \geq 1,1h_c''. \quad (15.7)$$

Если это неравенство не удовлетворяется, то глубину колодца, заданную ориентировочно, изменяют и расчет повторяют снова, пока условие (15.7) не будет выполнено;

после расчета глубины колодца определяют минимально допустимую длину колодца:

$$l_{\text{кол}} = l_{\text{пол}} + l_{\text{пр}},$$

где $l_{\text{пол}} = v_{\text{кр}} \sqrt{2y/g}$; $l_{\text{пр}} = 3(h_c'' - h_c')$; $v_{\text{кр}}$ — скорость в сечении на входе, равная критической:

$$v_{\text{кр}} = \frac{Q}{bh_{\text{кр}}};$$

y — высота падения струи:

$$y = p + d + 0,5h_{\text{кр}};$$

h_c'' — глубина после прыжка в сжатом сечении;

h_c' — глубина в сжатом сечении в колодце, определяемая по графику на рис. 15.7, по которому аналогично величине ξ_c'' определяют величина ξ_c' и глубину воды в сжатом сечении: $h_c' = \xi_c' h_{\text{кр}}$;

длина водобойной стенки (толщина водосливного порога):

$$l_{\text{ст}} = 3h_{\text{кр}};$$

проверяют вписывание перепада в профиль местности, для чего определяют уклон перепада:

$$I_{\text{п}} = \frac{p}{l_{\text{ст}} + l_{\text{кон}}}.$$

Этот уклон должен быть не меньше того, которым характеризуется косогор. Если же уклон косогора $I_{\text{м}}$ меньше уклона перепада, то длину каждого колодца увеличивают, что только улучшает условия затопления струи. Длина колодца, соответствующая заданному уклону местности:

$$l_{\text{кол м}} = \frac{p}{I_{\text{м}}} - l_{\text{кол}} > l_{\text{кол}}.$$

15.5. Расчет дренажа

Дренаж устраивают для перехвата или понижения уровня грунтовых вод. Целесообразно располагать дрены под кюветами (*подкюветный дренаж*), где они доступны для ремонта в случае заиливания.

Перехватывающий, или экранирующий, дренаж устраивают обычно в откосах выемок, если выемка пересекает водоносный слой и заходит

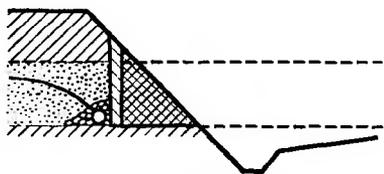


Рис. 15.13. Перехватывающий дренаж

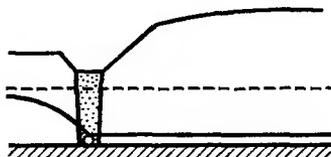


Рис. 15.14. Совершенный дренаж

в водоупор (рис. 15.13). В этом случае приток воды на 1 м дрены вычисляют по данным обследования водоносного слоя:

$$q_{\phi} = K_{\phi}ih,$$

где K_{ϕ} — коэффициент фильтрации; i — уклон водоносного слоя; h — глубина воды в слое.

На длине дренажной трубы l_d собирается расход воды, подлежащий отводу:

$$Q_{\phi} = q_{\phi}l_d.$$

Для пропуска такого количества воды необходима труба, размер которой может быть найден из равенства:

$$Q = K\sqrt{I_d},$$

где I_d — уклон дренажной трубы; K — расходная характеристика дренажной трубы, м³/с, вычисляемая (для асбоцементных и гончарных труб) по формуле:

$$K = 24d^{8/3},$$

где d — диаметр трубы, м.

Скорость течения воды в трубе должна быть не очень большой, но и не слишком малой (во избежание заиливания). Скорость течения в круглой дренажной трубе равна:

$$v_d = W\sqrt{I_d},$$

где W — скоростная характеристика трубы, равная $30,4d^{2/3}$, м/с.

При прохождении дорог на местности с высокими уровнями грунтовых вод бровку насыпи и проезжую часть поднимают на высоту, при которой понижения уровней грунтовых вод не требуется. Однако в ряде случаев более целесообразно (или необходимо по каким-либо причинам) понижать грунтовые воды под земляным полотном. Если дрены располагаются на водоупоре, то можно ограничиться устройством одной верховой дрены, расчет которой полностью

совпадает с изложенным выше. За дренай пространство будет осушено. Такие дренаи называют *совершенными* (рис. 15.14).

При глубоком залегании водоупора устраивают две дренаи симметрично по обе стороны дороги. Такой дренаж называют *висячим, несовершенным* (рис. 15.15).

Для определения необходимой глубины заложения дренаи строят кривую депрессии (понижения) уровня грунтовых вод, рассчитывают приток воды к дренам и диаметр их сечения (последнее — аналогично приведенному выше).

Каждая из дренаи осушает некоторое пространство, предельную ширину которого, отсчитываемую в одну сторону от дренаи, называют *радиусом действия дренажа*:

$$R = H / \operatorname{tg} \alpha, \quad (15.8)$$

где α — угол депрессии, зависящий от свойств грунта водоносного пласта (табл. 15.8).

Таблица 15.8. Уклоны кривой депрессии

Род грунта	Средний уклон кривой депрессии α
Очень крупный песок и галька	0,003—0,005
Пески	0,006—0,015
Супеси	0,02—0,05
Суглинки	0,05—0,15
Глины	0,15—0,20

Кривая депрессии (рис. 15.16) представляет собой параболу 2-й степени с уравнением:

$$y = H \sqrt{1 - x / R}.$$

При $x = 0$, т.е. в точке наибольшего удалении от дренаи, $y = H$ и понижения нет. При $x = R$, $y = 0$ кривая депрессии снижается на ве-

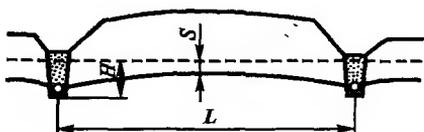


Рис. 15.15. Несовершенный дренаж (висячие дренаи)

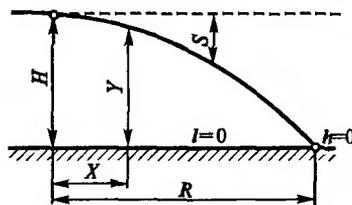


Рис. 15.16. Кривая депрессии

личину H . Зная расстояние между двумя дренами L , получаем расчетное уравнение понижения уровня воды в середине дороги:

$$S = H(1 - \sqrt{L/2R}). \quad (15.9)$$

Порядок расчета висячих дрен следующий:

по условию неподтопляемости дополнительного слоя основания дорожной одежды капиллярными водами назначают норму понижения уровня воды на середине дороги S ;

по известному значению $\text{tg } \alpha$ и расстоянию между двумя соседними висячими дренами L назначают глубину заложения дрены ниже уровня воды, решая для этого квадратное уравнение, следующее из выражений (15.8) и (15.9):

$$\left(\frac{S}{H}\right)^2 - \left(2 + \frac{\text{tg} \alpha L}{2S}\right) \frac{S}{H} + 1 = 0.$$

Приток отводимой воды на единицу длины дрены (двусторонний приток к каждой дрене) вычисляют по формуле:

$$2q_{\phi} = K_{\phi} H \text{tg } \alpha,$$

а на всю длину дрены l_d :

$$Q_{\phi} = 2q_{\phi} l_d.$$

Необходимый размер дрены (трубы) и скорость течения воды в ней рассчитывают как обычно.

Возможное конструктивное оформление дрен представлено на рис. 15.4.

Глава 16

МАЛЫЕ ВОДОПРОПУСКНЫЕ СООРУЖЕНИЯ

16.1. Виды малых водопропускных сооружений и требования к ним

Малые водопропускные сооружения устраивают в местах пересечения дорог с ручьями, оврагами или балками, по которым стекает вода от таяния снега и дождей. Малые водопропускные сооружения являются одним из наиболее распространенных видов инженерных сооружений на автомобильных дорогах. Их стоимость составляет в среднем 10—15% от общей стоимости автомобильных дорог с усовер-

шенствованными покрытиями. Среди водопропускных сооружений наибольшее количество повреждений и разрушений в паводки приходится на малые водопропускные сооружения. Причинами нередких случаев повреждений и даже разрушений малых водопропускных сооружений в паводки являются: все еще недостаточная надежность прогнозов ожидаемых величин максимальных расходов и объемов стока; ошибки в расчетах размеров отверстий сооружений и, особенно, укреплений нижних бьефов; нарушения технологии строительства (недостаточное уплотнение грунта над трубами, производство земляных работ у труб в зимний период времени и т.д.) и, наконец, большое количество малых водопропускных сооружений по сравнению со средними и большими.

Учитывая это, правильный выбор типа водопропускных сооружений, правильное обоснование их генеральных размеров, а также их рациональное проектирование, позволяющее максимально индустриализировать и механизировать процесс строительства, имеет большое значение для снижения сметной стоимости строительства и повышения надежности автомобильных дорог.

Количество водопропускных сооружений на 1 км длины дороги зависит главным образом от рельефа местности и дорожно-климатической зоны проектирования автомобильной дороги и в среднем может быть определено по табл. 16.1.

Таблица 16.1. Среднее количество водопропускных сооружений на 1 км дороги

Районы строительства дороги	Среднее количество сооружений на 1 км дороги
Пустыни и полупустыни	0,3
Болотистые районы	1
Равнины	0,5—1
Холмистый рельеф	0,7—1,2
Сильно пересеченный рельеф	1,0—1,5
Горные районы	1,5—2
Районы искусственного орошения	3

К основным видам водопропускных сооружений относят малые мосты и трубы. Меньшее распространение получили другие типы водопропускных сооружений: укрепленные переливаемые насыпи, фильтрующие водопропускные сооружения. Переливаемые насыпи находят применение в пустынных и полупустынных районах на доро-

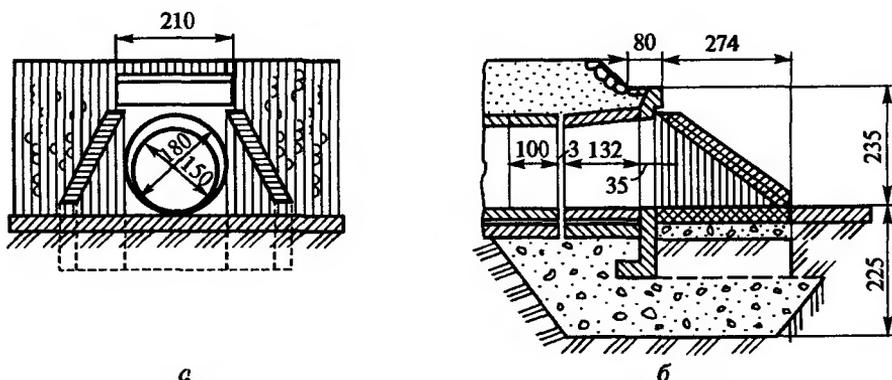


Рис. 16.1. Круглая одноочковая железобетонная труба:

а — входной оголовок; *б* — продольный разрез

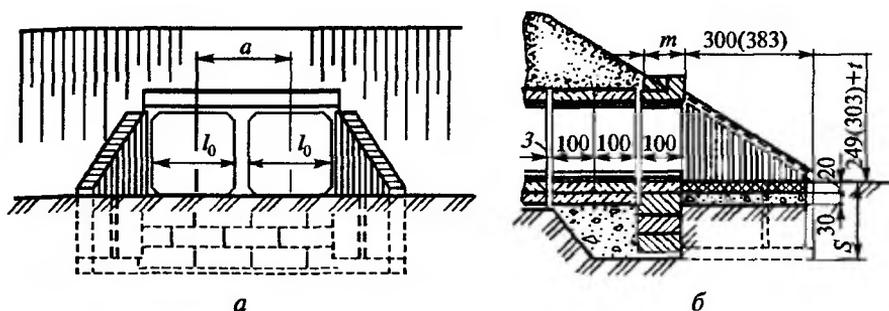
гах низких категорий (IV—V) при пересечении периодически действующих водотоков. Применявшиеся ранее фильтрующие насыпи в виде набросок из крупных камней, через которые просачивается вода, не оправдали себя в эксплуатации и могут использоваться лишь как временные сооружения на второстепенных дорогах, в местах, где пропускаемая вода не содержит большого количества наносов.

Большую часть водопропускных сооружений (примерно 95%) на автомобильных дорогах составляют круглые и прямоугольные трубы, которые проектируют при любых сочетаниях плана и продольного профиля без изменения ширины земляного полотна и проезжей части и без изменения типа дорожной одежды. Водопропускные трубы различных отверстий сооружают обычно из сборных унифицированных железобетонных элементов заводского изготовления. *Круглые трубы* на автомобильных дорогах применяют со следующими диаметрами отверстий: $d = 0,75; 1,0; 1,25; 1,50$ и $2,0$ м (рис. 16.1).

Прямоугольные трубы обычно применяют со следующими отверстиями: $2,0 \times 2,0$ м; $2,5 \times 2,0$ м; $3,0 \times 2,5$ м и $4,0 \times 2,5$ м (рис. 16.2).

Для увеличения пропускной способности труб без повышения высоты насыпи устраивают многоочковые трубы из уложенных рядом нескольких труб одинаковых отверстий, при этом, как показывают наблюдения, расход распределяется равномерно между трубами. Однако из экономических соображений круглые трубы устраивают одно-, двух- и трехочковыми, а прямоугольные — одно- и двухочковыми.

В последние годы на дорогах используют *металлические трубы* из гофрированного металла — сталегрунтовые сооружения тоннельно-



Р и с. 16.2. Прямоугольная двухчочковая железобетонная труба:

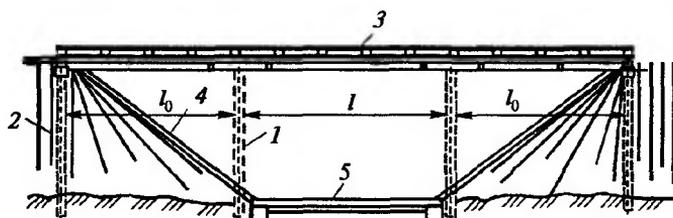
a — входной оголовок; *б* — продольный разрез

го типа, работающие совместно с хорошо уплотненной грунтовой обоймой.

Малые мосты (длиной до 25 м) из типовых сборных железобетонных элементов заводского изготовления предусматривают в тех случаях, когда трубы не могут обеспечить пропуск всей воды, притекающей к дороге (рис. 16.3).

Устройство мостов предъявляет более жесткие требования к плану и продольному профилю автомобильных дорог. Кроме того, габариты мостов (по ширине) с целью обеспечения безопасности движения обычно принимают больше, чем ширина проезжей части и земляного полотна на основной дороге (за счет полос безопасности и тротуаров). На мостах нередко меняют тип покрытия. Принципиальное отличие малых мостов от средних и больших состоит также в том, что подмостовые русла малых мостов, как правило, укрепляют, т.е. фундаменты опор малых мостов устраивают, исходя из условия недопущения общего и местного размывов.

Отверстия труб и малых мостов обосновывают гидрологическими и гидравлическими расчетами, связанными с определениями расчет-



Р и с. 16.3. Малый мост:

1 — промежуточные опоры; *2* — береговые опоры; *3* — пролетные строения; *4* — укрепленные конуса; *5* — укрепленное подмостовое русло

ных расходов и объемов стока, гидравлическими расчетами отверстий с учетом аккумуляции части объема стока перед малыми водопропускными сооружениями, определением скоростей течения в верхних и особенно нижних бьефах и соответствующих им величин местных размывов и т.д.

При пропуске расчетных паводков трубы должны работать, как правило, в безнапорном режиме, когда поток на всем протяжении трубы имеет свободную поверхность. Как исключение, на автомобильных дорогах допускают полунапорный (когда труба на входе работает полным сечением, а на остальном протяжении имеет свободную поверхность) и напорный (когда труба на большем своем протяжении работает полным сечением) режимы при условии принятия конструктивных мер, обеспечивающих устойчивость труб и земляного полотна против фильтрации воды.

При безнапорном режиме протекания воды возвышение высшей точки внутренней поверхности трубы над уровнем воды должно быть в круглых и сводчатых трубах высотой до 3 м — не менее 1/4 высоты трубы в свету, а высотой более 3 м — не менее 0,75 м; в прямоугольных трубах высотой до 3 м — не менее 1/6 высоты трубы, а высотой более 3 м — не менее 0,5 м.

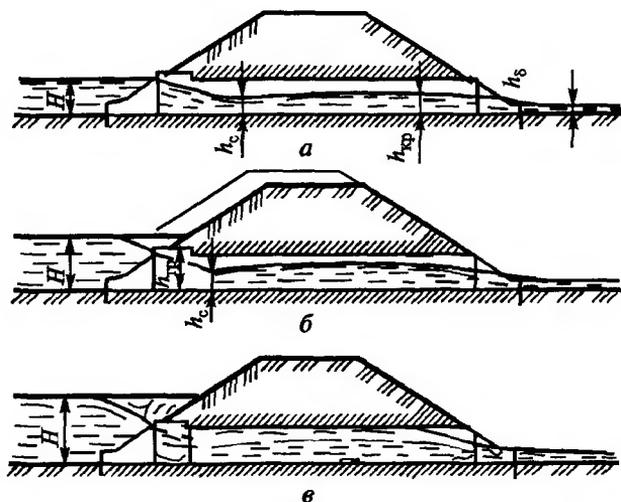
На автомобильных и городских дорогах применяют трубы отверстием не менее 0,75 м (на съездах — не менее 0,5 м). Для удобства эксплуатации целесообразно применять при длине менее 20 м трубы с отверстием не менее 1 м, а при большей длине — отверстием не менее 1,25 м. Трубы нельзя устраивать там, где возможны наледи и ледоход. Нельзя применять трубы и при наличии карчехода.

При проектировании водопропускных дорожных труб и малых мостов особое внимание уделяют капитальным укреплениям подводящих и отводящих русел со стороны верхних и нижних бьефов, исходя из тех размывов, которые там следует ожидать. Верхние и особенно нижние бьефы — это «ахиллесова пята» всех малых водопропускных сооружений.

16.2. Расчет пропускной способности дорожных труб

Пропускная способность дорожных труб зависит главным образом от напора перед сооружением, размера отверстий и конструкции входных оголовков. Расчет пропускной способности труб выполняют по уравнениям гидравлики, соответствующим режиму протекания потока через сооружение.

Гидравлический расчет труб сводится к назначению по расчетному гидрографу стока такого отверстия, при котором: расход воды в со-



Р и с. 16.4. Режимы работы дорожных труб:

а — безнапорный; *б* — полунанпорный; *в* — напорный

оружении в результате аккумуляции ливневых вод не будет отличаться более чем в 3 раза от максимального расчетного, а в результате аккумуляции стока талых вод — не более чем в 2 раза; напор воды перед трубой будет не выше тех значений, при которых возможны перелив через насыпь, подтопление населенных пунктов, промышленных предприятий и т.д.; скорости течения на выходе из трубы и особенно на сходе с укреплений не будут превышать допустимые для конструкции укреплений нижних бьефов.

В зависимости от глубины подтопления и типа входного оголовка в трубах устанавливаются следующие режимы протекания:

безнапорный, если напор H (глубина воды на входе) не превышает $H \leq 1,2h_{\text{вх}}$ (где $h_{\text{вх}}$ — высота входного сечения трубы). На всем протяжении трубы поток имеет свободную поверхность (рис. 16.4, *а*). Труба работает по гидравлической схеме «водослива с широким порогом»;

полунанпорный, возникающий при оголовках обычных типов в тех случаях, когда подпор перед трубой превышает высоту трубы на входе $H > 1,2h_{\text{вх}}$. На входе труба работает полным сечением, а на всем остальном протяжении поток имеет свободную поверхность (рис. 16.4, *б*). Труба работает по гидравлической схеме «истечения из-под щита»;

напорный, который устанавливается при специальных входных оголовках обтекаемой формы, при подтоплении верха трубы на входе более $H > 1,4h_{\text{вх}}$ и при уклоне трубы не больше уклона трения $I_T \leq I_w$.

На большей части длины труба работает полным сечением, и лишь у выхода поток может иметь свободную поверхность (рис. 16.4, в). Труба работает по гидравлической схеме «внешнего насадка».

При значительном подтоплении входа в трубу напорный режим может возникать периодически и при оголовках обычных типов. Однако из-за прорыва воздуха вследствие подсоса через образующуюся у входного отверстия водную воронку протекание потока в этом случае часто переходит на полунапорный режим.

Расчетные формулы пропускной способности труб, соответствующие трем режимам протекания воды в трубах, следующие:

а) безнапорный режим

$$Q_c = \omega_c V_c = \varphi_6 \omega_c \sqrt{2g(H - h_c)},$$

где $h_c = 0,9h_{кр}$ (см. рис. 16.4, а) — глубина в сжатом сечении; $h_{кр}$ — критическая глубина; φ_6 — коэффициент скорости, зависящий от формы входного оголовка.

Зная, что критическая скорость $v_{кр} \approx 0,9v_c$ (где v_c — скорость в сжатом сечении), можно записать: $h_c = 0,73v_c^2/g$, и далее, зная связь между глубиной H и h_c , выражаемую формулой

$$H = h_c + \frac{v_c^2}{2g\varphi_6^2} = \left(0,73 + \frac{0,5}{\varphi_6^2}\right) \frac{v_c^2}{g},$$

получаем при обычных значениях коэффициента скорости $\varphi_6 = 0,85$ (для всех оголовков, кроме обтекаемых, обеспечивающих протекание по напорному режиму):

$$H = 1,42 \frac{v_c^2}{g} \approx 2h_c. \quad (16.1)$$

Тогда расход воды в сооружении:

$$Q_c = 0,85\omega_c \sqrt{gH}.$$

Здесь ω_c — площадь сжатого сечения потока, вычисляемая при глубине $h_c = 0,5H$.

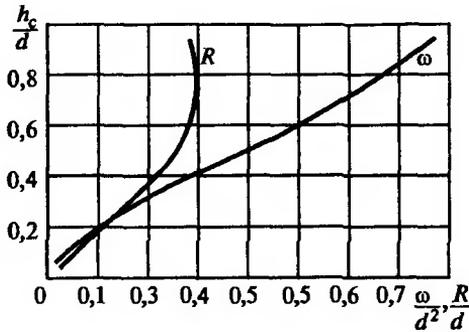
Для прямоугольных сечений ($\omega_c = 0,5bH$):

$$Q_c = 0,425b\sqrt{g} H^{3/2},$$

или

$$Q_c = 1,33bH^{3/2}, \quad (16.2)$$

что соответствует коэффициенту расхода водослива $m = 0,30$.



Р и с. 16.5. Графики для расчета круглых труб

Для круглых поперечных сечений площадь ω_c может быть вычислена с помощью графика (рис. 16.5), на котором даны величины

$$\omega_c/d^2 = f(h_c/d),$$

где d — диаметр трубы, м.

Минимальную рабочую отметку земляного полотна при этом определяют:

при $H > h_{тр}$

$$H_{\min} = H + \Delta, \quad (16.3)$$

где $h_{тр}$ — высота трубы; Δ — запас, принимаемый равным толщине дорожной одежды, но не менее 0,5 м;

при $H < h_{тр}$

$$H_{\min} = h_{тр} + \delta + h_{до},$$

где δ — толщина стенки трубы; $h_{до}$ — толщина дорожной одежды;

б) *полунапорный режим*

$$Q_c = V_c \omega_c = \varphi_{п} \omega_c \sqrt{2g(H - h_c)},$$

где $h_c = 0,6h_{вх}$ ($h_{вх}$ — высота входа в трубу).

При обычных значениях $\varphi_{п} = 0,85$ и $\omega_c = 0,6\omega_{вх}$:

$$Q_c = 0,5\omega_{вх} \sqrt{2g(H - 0,6h_c)}.$$

Площадь полного сечения легко вычислить как для прямоугольного, так и для круглого сечения.

Минимальную рабочую отметку земляного полотна определяют по формуле (16.3) при запасе не менее $\Delta \geq 1,0$ м;

в) *напорный режим*

при уклоне трубы $I_{тр} = I_w$:

$$Q_c = \varphi_n \omega_\tau \sqrt{2g(H - h_\tau)},$$

где ω_τ и h_τ — площадь сечения и высота на основном протяжении трубы; $\varphi_n = 0,95$ — коэффициент скорости (для обтекаемых оголовков, обеспечивающих автоматическое установление напорного режима);

при уклоне трубы $I_{тр} < I_w$:

$$Q_c = \varphi_n \omega_\tau \sqrt{2g[(H - h_\tau) - l_\tau (I_w - I_\tau)]}, \quad (16.4)$$

где l_τ — длина трубы; $I_w = \frac{Q_c^2}{K_\tau^2}$ — уклон трения трубы; $K_\tau = \frac{R_\tau^{2/3} \omega_\tau}{n}$ —

расходная характеристика трубы; $R_\tau = \frac{\omega_\tau}{\chi}$ — гидравлический радиус;

χ — смоченный периметр; n — коэффициент шероховатости (для бетона $n = 0,017$).

При фактическом уклоне трубы $I_\tau > I_w$ труба разряжается и работает как полунапорная с соответствующим уменьшением пропускной способности. При фактическом уклоне $I_\tau \leq I_w$ труба работает полным сечением (как напорная), но уровень перед трубой (напор), как видно из уравнений (16.4), возрастает на величину ΔH :

$$\Delta H = (I_w - I_\tau) l_\tau.$$

Минимальную рабочую отметку земляного полотна определяют по формуле (16.3) при запасе не менее $\Delta \geq 1,0$ м.

Для разных режимов протекания воды обычно составляют расчетные таблицы или графики пропускной способности типовых труб (табл. 16.2 — 16.5, рис. 16.6).

Учитывая, что при прогнозах расчетных расходов и объемов стока возможны значительные ошибки, целесообразно все же предусматривать обтекаемые входные оголовки даже для тех сооружений, которые проектируют на безнапорный и полунапорный режимы работы.

При назначении отверстий труб необходимо учитывать аккумуляцию паводковых вод в пруду перед сооружением. При этом заранее нельзя назвать степень снижения расчетного расхода, так как глубина воды перед сооружением (глубина пруда) еще не известна. Это осложняет расчет и заставляет выполнять его аналитическим методом, либо путем последовательных приближений, либо упрощенно графоаналитическим методом.

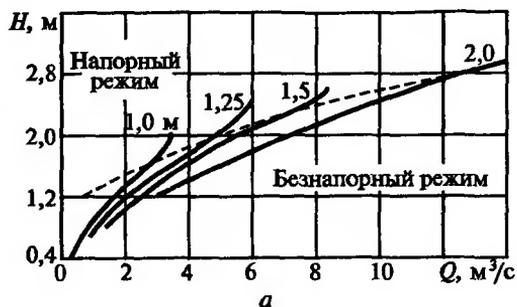


Рис. 16.6. Графики для определения пропускной способности типовых труб:
a — круглых; *б* — прямоугольных (цифры на кривых — отверстия труб, м)

Малые водопропускные сооружения почти всегда сильно стесняют поток и изменяют его бытовой режим. В результате временного накопления перед сооружением части объема стока гидрограф притока трансформируется в более растянутый во времени гидрограф сброса, что приводит к снижению расчетного сбросного расхода воды в сооружении Q_c по сравнению с наибольшим секундным притоком с бассейна Q (рис. 16.7). Объем накопившейся воды $W_{пр}$ при общем

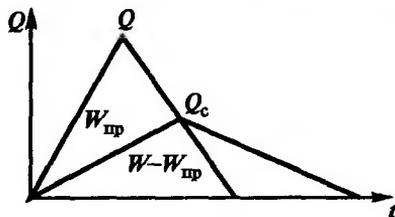


Рис. 16.7. Трансформация графика притока воды к сооружению вследствие аккумуляции

объеме стока W зависит от гидрографа притока, отверстия сооружения и рельефа участка местности, в пределах которого образуется временный водоем (пруд перед сооружением).

Таблица 16.2. Гидравлические характеристики типовых круглых труб при безнапорном режиме

Диаметр отверстия, м	Расход, м ³ /с	Глубина воды перед трубой, м	Скорость на выходе из трубы, м/с	Диаметр отверстия, м	Расход, м ³ /с	Глубина воды перед трубой, м	Скорость на выходе из трубы, м/с
<i>Портальный оголовок</i>				1,50	3,90	1,74	3,80
0,75	0,20	0,41	1,40		4,50	2,19	3,90
	0,40	0,62	1,70		4,80	2,27	4,00
	0,60	0,79	2,00				
<i>Раструбный оголовок с нормальным входным звеном</i>				1,75	4,50	1,47	3,20
1,00	0,60	0,68	2,10		4,70	1,75	3,70
	0,80	0,81	2,30		5,00	1,81	3,70
	1,00	0,93	2,40	6,00	2,08	4,10	
1,00	1,20	1,05	2,60	2,00	4,50	1,47	3,20
	1,40	1,16	2,80		5,00	1,55	3,30
					5,50	1,65	3,40
<i>Раструбный оголовок с коническим входным звеном</i>				2,00	6,00	1,73	3,50
1,00	0,80	0,57	1,40		6,50	1,81	3,60
	1,00	0,84	2,40		7,00	1,90	3,70
	1,40	1,03	2,70	7,50	1,98	3,80	
1,00	1,65	1,14	2,90	2,00	8,00	2,06	3,90
	2,00	1,31	3,30		8,50	2,14	4,00
	2,20	1,39	3,40		9,00	2,22	4,10
1,25	1,00	0,77	2,20	9,50	2,31	4,20	
	1,50	0,95	2,50	10,00	2,38	4,30	
	2,00	1,13	2,70	2,00	10,50	2,46	4,40
2,50	1,29	3,00	11,00		2,54	4,50	
1,50	2,70	1,37	3,20		12,50	2,78	4,80
	3,00	1,46	3,30				
	3,50	1,61	3,50				

Таблица 16.3. Гидравлические характеристики типовых круглых труб при полунапорном и напорном режимах

Тип оголовка	Диаметр отверстия трубы, м	Расход, м ³ /с	Глубина воды перед трубой, м	Скорость на выходе из трубы, м/с
<i>Полунапорный режим</i>				
Раструбный с нормальным входным звеном	1,00	1,60	1,30	3,30
		2,00	1,80	4,10
		2,40	2,34	4,90
		2,80	2,95	5,70
		3,00	3,16	6,00
<i>Напорный режим</i>				
Раструбный с нормальным входным звеном	1,00	3,00	1,66	4,20
		3,50	2,02	5,00
	1,25	5,00	1,96	4,50
		6,00	2,45	5,40
Раструбный с коническим входным звеном	1,50	7,00	2,24	4,40
		8,00	2,40	5,00
		8,50	2,58	5,30
	2,00	13,30	2,86	4,90
		14,50	3,01	5,10
		16,00	3,11	5,70
	16,50	3,22	6,10	

Таблица 16.4. Гидравлические характеристики типовых прямоугольных труб

Расход, м ³ /с, при отверстии трубы, м				Глубина воды перед трубой, м	Скорость на выходе из трубы, м/с
2,0 × 2,0	2,0 × 2,5	3,0 × 2,5	4,0 × 2,5		
1,00	1,25	1,50	2,00	0,45	1,80
2,00	2,50	3,00	4,00	0,71	2,30
3,00	3,75	4,50	6,00	0,94	2,70
4,00	5,00	6,00	8,00	1,13	2,90
5,00	6,25	7,50	10,00	1,32	3,20
6,00	7,50	9,00	12,00	1,48	3,40
7,00	8,75	10,50	14,00	1,66	3,50
8,00	10,00	12,00	16,00	1,82	3,90
9,00	11,25	13,50	18,00	1,97	4,10
10,00	12,50	15,00	20,00	2,11	4,20
11,00	13,75	16,50	22,00	2,27	4,40

Расход, м ³ /с, при отверстии трубы, м				Глубина воды перед трубой, м	Скорость на выходе из трубы, м/с
2,0 × 2,0	2,0 × 2,5	3,0 × 2,5	4,0 × 2,5		
12,00	15,75	18,90	25,20	2,49	4,60
14,00	17,50	21,00	28,00	2,65	4,70
15,00	18,75	22,50	30,00	2,77	4,80

Т а б л и ц а 16.5. Гидравлические характеристики типовых прямоугольных труб при значительных значениях расходов в сооружении

Расход, м ³ /с	Глубина воды перед трубой, м	Скорость на выходе из трубы, м/с	Расход, м ³ /с	Глубина воды перед трубой, м	Скорость на выходе из трубы, м/с
<i>Отверстие трубы</i> 2,0 × 2,0 м			<i>Отверстие трубы</i> 3,0 × 2,5 м		
15,40	2,88	6,10	23,00	2,86	4,80
16,00	2,99	6,30	23,50	2,92	4,90
16,50	3,07	6,50	24,00	2,98	5,00
17,00	3,16	6,70	24,50	3,04	5,10
17,50	3,25	6,90	25,00	3,10	5,20
18,00	3,35	7,10	25,50	3,16	5,50
19,00	3,56	7,50	26,00	3,22	5,50
20,00	3,75	7,90	27,00	3,34	5,70
21,00	3,97	8,30	28,00	3,47	5,90
			29,00	3,61	6,10
			30,00	3,75	6,30
			31,00	3,89	6,40
			31,50	3,97	6,60
<i>Отверстие трубы</i> 2,5 × 2,0 м			<i>Отверстие трубы</i> 4,0 × 2,5 м		
19,30	2,88	6,10	31,00	2,89	4,90
20,00	2,97	6,30	32,00	2,98	5,00
20,50	3,04	6,50	33,00	3,07	5,20
21,00	3,11	6,60	34,00	3,16	5,40
21,50	3,19	6,80	35,00	3,25	5,50
22,00	3,25	6,90	36,00	3,35	5,70
23,00	3,40	7,20	37,00	3,44	5,80
24,00	3,57	7,50	38,00	3,54	6,00
25,00	3,74	7,90	39,00	3,64	6,10
26,00	3,91	8,20	40,00	3,75	6,30
26,50	4,00	8,30	41,00	3,86	6,40
			42,00	3,97	6,60

Расход воды в отверстии сооружения определяется высотой подпора воды над входным лотком. При крутых, ярко выраженных логах этот подпор в течение ливневого паводка обычно достигает размеров, обеспечивающих практическое равенство расхода воды в отверстии наибольшему секундному притоку. Объем воды, накопившейся перед сооружением, по сравнению с объемом всего паводка оказывается незначительным и практически не влияет на работу сооружения. При определении отверстия сооружения в таких случаях в качестве расчетного расхода может приниматься наибольший расход водотока заданной вероятности превышения.

При относительно пологих, развалистых или слабо выраженных логах образование подпора перед сооружением сопряжено с затоплением значительных площадей и накоплением перед полотном дороги больших объемов воды, которые составляют уже существенную часть общего объема стока. Подпор воды перед сооружением возрастает медленно и обычно не успевает достичь размера, обеспечивающего равенство сброса наибольшему притоку ливневого паводка. Расход воды в отверстии сооружения оказывается часто во много раз меньшим расчетного расхода притока. В таких случаях аккумуляция воды должна учитываться при определении отверстия сооружения для пропуска стока.

Часть площади гидрографа притока, расположенная выше кривой сбросных расходов (см. рис. 16.7), представляет собой объем накопленной воды перед сооружением (объем пруда). Отношение между объемом пруда и суммарным притоком с бассейна W определяет степень трансформации паводка и может служить показателем регулирующей способности вместимости лога перед сооружением.

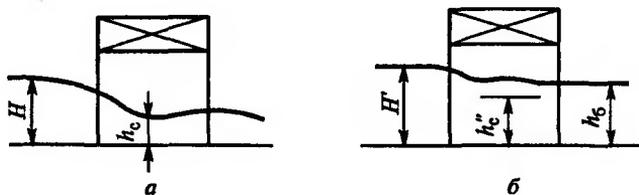
16.3. Пропускная способность малых мостов

Малые мосты (длина менее 25 м) работают по гидравлической схеме «водослива с широким порогом». Сообразно этому различают малые мосты, работающие по схеме свободного и несвободного истечения (рис. 16.8).

Пропускную способность малых мостов, работающих по схеме свободного истечения, легко определить по формуле (16.2) свободного водослива с широким порогом (см. рис. 16.8, а):

$$Q_c = 1,33(b_0 + H m_k)H^{3/2},$$

где b_0 — ширина отверстия малого моста по дну подмостового сечения; m_k — коэффициент заложения откосов конусов.



Р и с. 16.8. Схемы протекания воды под малыми мостами:

a — свободное истечение; *b* — несвободное истечение

Несвободное истечение под малыми мостами устанавливается при глубине потока в нижнем бьефе $h_б \geq 0,75 H$. Пропускную способность малых мостов, работающих по схеме несвободного истечения, определяют по формуле подтопленного водослива с широким порогом (см. рис. 16.8, б):

$$Q_c = 0,85h_б(b_0 + h_б m_k) \sqrt{2g(H - h_б)},$$

где $h_б$ — бытовая глубина в нижнем бьефе малого моста.

Минимальная геодезическая высота (отметка) проезда по мосту (см. рис. 16.8) определяется:

$$H_m = 0,88H + \Delta + h_{\text{кон}}, \quad (16.5)$$

где Δ — возвышение низа конструкции над уровнем воды, принимаемое равным не менее 0,5 м при отсутствии карчехода и 1,0 м при его наличии; $h_{\text{кон}}$ — высота конструкции пролетного строения.

16.4. Расчет размывов и укреплений русел за трубами и малыми мостами

Скорости течения на выходе из труб можно определять с использованием формул Г.С. Пичугова, полученных на основе обработки данных многочисленных экспериментов.

Трубы круглые с обычными входными звеньями:
безнапорные

$$v_{\text{вых}} = (1,28 + 15l_T)^3 \sqrt{\frac{gQ_c}{d}};$$

полунапорные

$$v_{\text{вых}} = \frac{1,65 + 8l_T}{d} \sqrt[6]{\frac{gQ_c^4}{d}};$$

напорные

$$v_{\text{вых}} = \frac{Q_c}{0,8\omega_T},$$

где d — диаметр трубы, м.

Трубы с обтекаемыми входными оголовками:
безнапорные

$$v_{\text{вых}} = (1,28 + 15l_T)^3 \sqrt{\frac{gQ_c a \sqrt{a}}{d}};$$

напорные

$$v_{\text{вых}} = \frac{1,41 + 4l_T}{d} \sqrt[4]{\frac{gQ_c^3 a^2}{d \sqrt{gd}}};$$

где $a = h_{\text{вх}}/d$ ($h_{\text{вх}}$ — высота входа в трубу).

Трубы прямоугольные:
безнапорные

$$v_{\text{вых}} = (1,13 + 5l_T)^4 \sqrt{\frac{gQ_c a \sqrt{gh_T}}{b}};$$

полунапорные

$$v_{\text{вых}} = (1,48 + 8l_T)^4 \sqrt{\frac{Q_c^3 \sqrt{gh_T}}{h_n^3 b^3}};$$

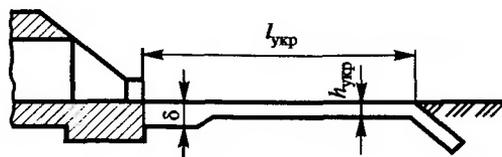
где h_T , b — высота трубы и ее отверстие соответственно.

Водный поток вытекает из трубы или из-под малого моста с высокими скоростями, достигающими обычно 5—6 м/с, что существенно превышает неразмывающие скорости для грунтов, из которых сложено дно отводящего русла. На сходе с укрепления нижнего бьефа малого водопропускного сооружения скорость течения возрастает, по данным проф. О.В. Андреева, примерно еще в 1,5 раза и составляет:

$$v_{\text{укр}} = 1,5v_{\text{вых}},$$

где $v_{\text{вых}}$, $v_{\text{укр}}$ — скорости на выходе из трубы и на сходе с укрепления соответственно.

Последнее обстоятельство связано с растеканием бурного потока. В связи со сказанным поток в нижнем бьефе обладает большой кинетической энергией и способен вызывать значительные размывы. Не



Р и с. 16.9. Схема укрепления нижнего бьефа малого водопропускного сооружения

случайно поэтому наиболее частой причиной повреждений и даже полного разрушения малых водопропускных сооружений являются недопустимые размывы в нижних бьефах, сопровождающиеся выносом выходного оголовка, затем звена за звеном трубы и, наконец, после появления прорана быстрым размывом прилегающих участков насыпей. Для малых мостов размывы в нижнем бьефе, не предусмотренные расчетом, перемещаются под мост с разрушением укрепления подмостового русла, подмывом промежуточных опор и конусов.

С целью предотвращения аварий малых водопропускных сооружений на дорогах в нижних их бьефах предусматривают капитальные укрепления, обычно заканчивающиеся погребенным предохранительным откосом (рис. 16.9).

Способ такой защиты нижних бьефов малых водопропускных дорожных сооружений впервые был предложен проф. О.В. Андреевым.

Длину плоской части капитального плоского укрепления нижнего бьефа за трубами обычно назначают равным $3d$ (где d — отверстие трубы), считая от выходного портала (см. рис. 16.9). Для малых мостов длину плоской части укрепления назначают не менее двух радиусов низового основания конуса, считая от низовой грани пролетного строения.

В общем случае относительные глубины h_p/H размыва в нижних бьефах при свободном растекании бурного потока в зависимости от длины плоского капитального укрепления можно получить по данным проф. О.В. Андреева (табл. 16.6).

Т а б л и ц а 16.6. Относительные глубины размыва в нижних бьефах малых водопропускных сооружений

$\frac{l_{\text{укр}} \operatorname{tg} \beta}{b}$	$\frac{h_p}{H}$	$\frac{l_{\text{укр}} \operatorname{tg} \beta}{b}$	$\frac{h_p}{H}$
0	1,55	4	0,59
1	0,98	5	0,54
2	0,78	8	0,45
3	0,65	10	0,40

Глубина заложения предохранительного откоса:

$$h_{\text{отк}} = h_p + \Delta,$$

где h_p — глубина местного размыва за плоским укреплением, определяемая расчетом, м; $\Delta = 0,5$ м — гарантийный запас.

Задача расчета укрепления нижнего бьефа малых водопропускных сооружений сводится к определению глубины заложения предохранительного откоса при заданной длине плоского укрепления. Расчет глубины местного размыва, определяющий необходимое заглубление погребенного откоса, связан с учетом сопротивляемости грунта размыву и учетом гидравлической структуры бурного растекающегося потока с размещением гидравлического прыжка непосредственно в конце укрепления, т.е. над ямой размыва.

В типовых проектах унифицированных дорожных труб уже предусмотрены укрепления нижнего бьефа, рассчитанные исходя из максимальной пропускной способности труб. Однако в практике проектирования нередки случаи, когда приходится прибегать к разработке индивидуальных проектов укреплений. Расчет размывов в нижних бьефах в этих случаях необходим.

Характер пространственного движения потока в нижнем бьефе малых водопропускных сооружений зависит от глубины и параметров потока на выходе из сооружения. Возможны три случая сопряжения растекающегося потока с бытовым потоком в нижнем бьефе:

сопряжения по типу «затопленной струи» имеют место тогда, когда поток, вытекающий из трубы, полностью затоплен (рис. 16.10).

При этом типе сопряжения происходит расширение потока в массе воды с соответствующим уменьшением скоростей;

сопряжения по типу «сбойного течения», которому присущи некоторые опасные свойства, наблюдаются при глубинах нижнего бье-

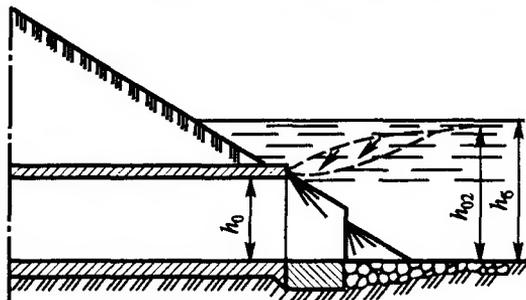
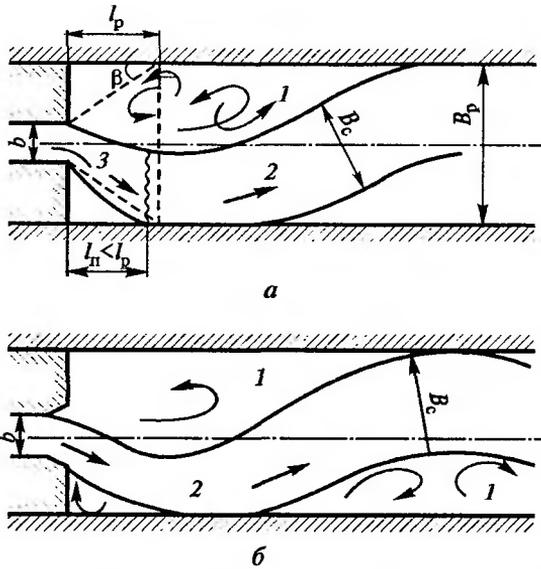


Рис. 16.10. Схема затопления струи, выходящей из сооружения



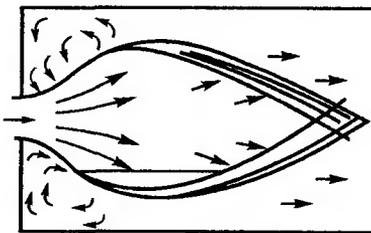
Р и с. 16.11. Схема сбойного течения в нижнем бьефе малого водопропускного сооружения:

a — с гидравлическим прыжком; *б* — без гидравлического прыжка; 1 — водоворотная зона; 2 — транзитный поток; 3 — прямой гидравлический прыжок

фа несколько меньших сопряженной глубины на выходе из сооружения (рис. 16.11).

Поток, выходящий из сооружения, движется практически без растекания, сваливается то в одну, то в другую сторону и набегае на стенки отводящего русла. Требуется укрепление не только дна, но и стенок отводящего русла на значительном протяжении;

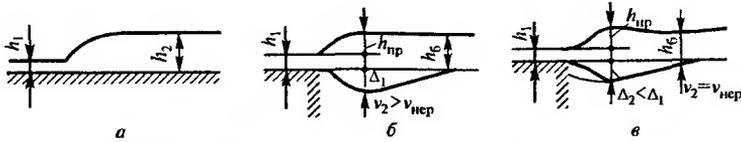
сопряжения по типу «свободного растекания» бурного потока наблюдаются в очень широких нижних бьефах с глубинами, существенно меньшими, чем глубина на выходе из сооружения (рис. 16.12).



Р и с. 16.12. Схема свободного растекания в широком русле

Растекание потока происходит в обе стороны к берегам, сопровождается уменьшением глубины и завершается косыми гидравлическими прыжками, имеющими в плане форму «лепестка».

Расчет размывов при свободном растекании бурного потока можно вести по формулам проф. М.В. Немчинова.



Р и с. 16.13. Расчетные схемы к определению глубины размыва при свободном растекании

Глубина потока после резкого его расширения в вертикальной плоскости (рис. 16.13):

$$h_2 = \frac{h_{кр}^3 (h_2 - h_1)}{h_1 h_2 h_{пр}} + \frac{h_{пр}}{2},$$

где $h_{кр}$ — критическая глубина в отводящем русле; h_1 — глубина потока на сходе с укрепления, определяемая по табл. 16.7; $h_{пр} = h_6 - h_1$ — высота гидравлического прыжка.

Т а б л и ц а 16.7. Относительные гидравлические характеристики на сходе с укрепления

$\frac{l_{укр}}{b}$	$\frac{q}{q_{вых}}$	$\frac{v_1}{v_{max}}$	$\frac{h_1}{h_{max}}$	$\frac{l_{укр}}{b}$	$\frac{q}{q_{вых}}$	$\frac{v_1}{v_{max}}$	$\frac{h_1}{h_{max}}$
0	1	1	1	5,5	0,16	0,58	0,28
1,5	0,43	0,83	0,52	7,5	0,11	0,46	0,24
3,5	0,22	0,71	0,31	11,0	0,10	0,43	0,23

Критическая глубина в отводящем русле:

$$h_{кр} = \sqrt[3]{\frac{\alpha Q_c^2}{g b_p^2}},$$

где $\alpha = 1,1$ — коэффициент Кориолиса (корректив кинетической энергии); Q_c — расход воды в сооружении; b_p — ширина отводящего русла.

При глубине $h_2 > h_6$ глубина размыва за укреплением составляет (см. рис. 16.13, б):

$$h_p = \frac{h_{кр}^3}{h_1 h_{пр}} - h_1 - h_{пр}. \quad (16.6)$$

Такой глубины размыв в нижнем бьефе достигает лишь при весьма слабых грунтах дна отводящего русла. При более прочных грунтах глубина размыва составляет (см. рис. 16.13, в):

$$h_p = \frac{q}{k v_{\text{нер}}} - \frac{q}{v_1} - \frac{k v_{\text{нер}} (v_1 - k v_{\text{нер}})}{n}, \quad (16.7)$$

где $v_{\text{нер}}$ — неразмывающая скорость для грунтов дна отводящего русла, в которых развивается размыв; $k \approx 0,6$ — коэффициент, учитывающий повышенную турбулентность в яме размыва; q и v_1 — соответственно погонный расход центральной струи и скорость схода с укрепления (см. табл. 16.7).

Меньший из двух размывов, определяемых по формулам (16.6), (16.7), принимают к расчету.

При сбойном течении, возникающем при значительных глубинах в отводящем русле, размыв определяют:

$$h_p = \frac{k_1 q_{\text{сб}}}{k_0 v_{\text{нер}}} - h_6,$$

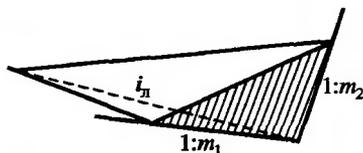
где $k_1 = 2,65$ — коэффициент сбойности; $k_0 = 0,75$ — коэффициент, учитывающий повышенную турбулентность в яме размыва; h_6 — бытовая глубина потока в отводящем русле; $q_{\text{сб}}$ — погонный расход воды при сбойном течении на сходе с укрепления:

$\frac{l_{\text{укр}}}{b}$	0	1	2	3	4	5	7	9
$\frac{q_{\text{сб}}}{q_{\text{вых}}}$	1,0	0,99	0,98	0,90	0,83	0,73	0,59	0,52

16.5. Математическое моделирование работы водопропускных труб и малых мостов

В результате моделирования процесса стока ливневых вод с малых водосборов получают расчетный гидрограф паводка своеобразной формы для каждого водосбора. Данные о расчетном гидрографе стока являются исходной информацией для последующего гидравлического расчета отверстия малого водопропускного сооружения. Наличие исходного гидрографа стока, имеющего форму, отличную от треугольной, позволяют отказаться от использования традиционного расчета отверстий малых водопропускных сооружений с учетом аккумуляции и перейти на реализацию математических моделей, описывающих процесс прохождения паводков через водопропускные сооружения, а также использовать новые упрощенные методы расчета

Р и с. 16.14. Схематизация пруда при традиционном учете аккумуляции перед водопропускными трубами и малыми мостами



отверстий труб и малых мостов, полученные на основе научного обобщения результатов математического моделирования.

Традиционный способ расчета отверстий труб и малых мостов с учетом аккумуляции основан на следующем комплексе допущений:

расчетный гидрограф паводка своеобразной для каждого бассейна формы схематизируют в треугольный (рис. 16.14);

гидрограф сбросных расходов также представляют треугольным очертанием;

живое сечение лога представляют треугольным очертанием (см. рис. 16.14);

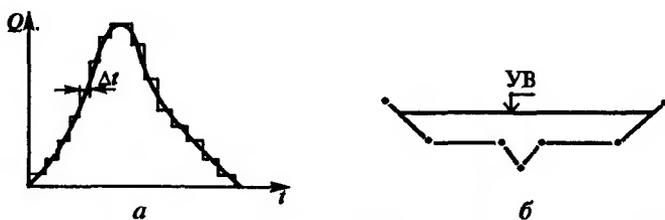
пруд перед сооружением представляют в виде треугольной пирамиды с горизонтальной свободной поверхностью.

Применение компьютерной техники снимает вопрос о многодельности расчетов и позволяет исключить при расчетах отверстий труб и малых мостов перечисленные выше основные допущения, свойственные традиционным приемам расчета и существенно влияющие на точность конечных результатов с соответствующим снижением надежности функционирования малых водопропускных сооружений на дорогах. Сущность детального метода расчета отверстий малых водопропускных сооружений с учетом аккумуляции состоит в следующем.

Для исключения первого допущения традиционного расчета, заключающегося в схематизации расчетного гидрографа по треугольнику, детальный расчет ведут по гидрографу, полученному в результате математического моделирования стока с малого водосбора, фактическое очертание которого заменяют ступенчатым с шагом Δt , который принимают достаточно малым (рис. 16.15, а).

Второе допущение о треугольном очертании живого сечения лога исключают путем его аппроксимации семиточечным профилем (рис. 16.15, б), что позволяет с достаточной для практических целей точностью представить любое очертание поперечного сечения лога (в том числе треугольное, прямоугольное, трапецидальное и т.д.).

Последнее совместно с описанием фактически неустановившегося течения паводковых вод в логу перед водопропускным сооружением исключает и третье допущение традиционного расчета.



Р и с. 16.15. Аппроксимация при детальном расчете отверстий малых мостов и труб:

a — гидрографа паводка; *б* — живого сечения лога

Резко неустановившееся течение паводковых вод в логу перед малым водопропускным сооружением описывается системой дифференциальных уравнений неустановившегося течения Сен-Венана: динамического уравнения

$$I_{\text{лс}} \frac{\partial z}{\partial l} = \frac{1,1}{2g} \frac{\partial v^2}{\partial l} + \frac{1,03}{g} \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{Q^2}{K^2}; \quad (16.8)$$

уравнения неразрывности

$$\frac{\partial Q}{\partial l} + \frac{\partial \omega}{\partial t} = 0, \quad (16.9)$$

где $I_{\text{лс}}$ — уклон лога у сооружения; z — отметка свободной поверхности потока; l — длина по логу; g — ускорение свободного падения; v — средняя скорость течения; Q и K — расход и расходная характеристика сечения соответственно; ω — площадь живого сечения.

Уравнения (16.8), (16.9), не интегрируемые в общем виде, решают в конечных разностях:

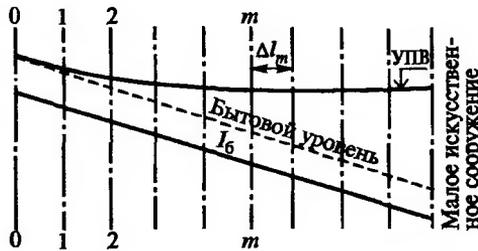
динамическое уравнение

$$\Delta z_{mj} = \Delta z_{(m+1)j} + \frac{1,1(v_{(m+1)j}^2 - v_{mj}^2)}{2g} + \frac{1,03(v_{mj\text{cp}} - v_{m(j-1)\text{cp}})}{g\Delta t} \Delta l_m + \left(\frac{Q_{mj\text{cp}}^2}{K_{mj\text{cp}}^2} - I_{\text{лс}} \right) \Delta l_m; \quad (16.10)$$

уравнение неразрывности

$$Q_{mj} = Q_{(m+1)j} + \frac{\Delta h_{mj} B_m + \Delta h_{(m+1)j} B_{m+1} + 4\Delta h_{mj\text{cp}}}{6\Delta t_j} \Delta l_m, \quad (16.11)$$

где j — индекс расчетного интервала времени; m — индекс расчетного створа.



Р и с. 16.16. Деление исследуемого участка лога на расчетные интервалы длины

Для решения уравнений неустановившегося течения (16.10), (16.11) весь исследуемый участок лога делят на большое число расчетных участков с шагом Δl_m (рис. 16.16).

Последовательность детального расчета отверстий малых водопропускных сооружений с учетом аккумуляции части стока следующая:

задают отверстие малого водопропускного сооружения (иногда на основе упрощенных расчетов);

гидрограф расчетного паводка заменяют ступенчатым очертанием с шагом Δt_j ;

исследуемый участок лога (в пределах возможного распространения пруда) делят на большое число расчетных интервалов длины Δl_m ;

задаются шагом поиска напора перед сооружением (обычно $\Delta h = 0,01$ м);

на первой ступеньке паводка определяют бытовой расход Q_6 и бытовую глубину h_6 ;

задаются в первом приближении напором перед сооружением $H = h_6 + \Delta h$ и по известным формулам пропускной способности (см. § 16.2, 16.3) вычисляют расход воды в сооружении Q_c ;

применяя систему уравнений (16.10), (16.11), последовательно к каждому интервалу длины снизу вверх по течению находят расход в 0-м створе Q_0 ;

сравнивают значения расходов Q_0 и Q_6 . Если $Q_0 < Q_6$, то принимают напор перед сооружением равным $H = h_6 + 2\Delta h$ и вновь вычисляют расход воды в сооружении, последовательно решают уравнения неустановившегося течения жидкости снизу вверх и определяют расход в 0-м створе и т.д. до тех пор, пока не будет выполнено равенство $Q_0 = Q_6$. Таким образом, на первой ступеньке паводка определяют напор перед сооружением H и расход в сооружении Q_c ;

после этого переходят на расчет второй ступеньки паводка и т.д.

Изложенный алгоритм расчета¹ исключает основные допущения, свойственные упрощенным расчетам отверстий малых водопропускных сооружений с учетом аккумуляции, однако является весьма многодельным и массовое его применение даже при использовании современных компьютеров затруднительно. В связи с этим представляет интерес другой более простой алгоритм решения той же задачи, основанный на использовании уравнения баланса стока:

$$W_j = W_{cj} + W_{npj},$$

где W_j — объем притока воды к сооружению на j -й момент времени; W_{cj} — объем стока, уже прошедший через сооружение к j -му моменту времени; W_{npj} — объем пруда в j -й момент времени паводка.

Объем притока воды к сооружению в любой момент времени определяют путем численного интегрирования расчетного гидрографа стока (см. рис. 16.15, а):

$$W_j = \sum_{j=1}^k Q_j \Delta t_j, \quad (16.12)$$

где Q_j — бытовой расход ливневых вод в j -й момент времени; Δt_j — расчетный интервал времени.

Объем воды, уже прошедший через сооружение:

$$W_{cj} = \sum_{j=1}^k Q_{cj} \Delta t_j,$$

где Q_{cj} — расход воды в сооружении j -й момент времени, определяемый по формулам пропускной способности труб (см. § 16.2) и малых мостов (см. § 16.3).

Объем пруда определяют по формуле Симпсона на основе семиточечного профиля (см. рис. 16.15, б) в предположении о горизонтальной поверхности пруда:

$$W_{npj} = \sum_{m=1}^n \frac{\omega_{mj} + \omega_{(m+1)j} + 4\omega_{mjcp}}{6} \Delta l_m,$$

где ω_{mj} , $\omega_{(m+1)j}$ — площади живого сечения пруда в начальном и конечном створах расчетного участка длиной Δl_m при j -м уровне; ω_{mjcp} — площадь живого сечения в середине m -го участка, т.е. в створе $\Delta l_m/2$.

¹ Программа для компьютерного детального расчета отверстий малых водопропускных сооружений с учетом аккумуляции разработана канд. техн. наук М.А. Леевой.

Таким образом, основное расчетное уравнение в окончательном виде:

$$\sum_{j=1}^k Q_j \Delta t_j = \sum_{j=1}^k Q_{cj} \Delta t_j + \sum_{m=1}^n \frac{\omega_{mj} + \omega_{(m+1)j} + 4\omega_{mj\text{ср}}}{6} \Delta l_m. \quad (16.13)$$

Последовательность детального расчета отверстий малых водопропускных сооружений, основанного на решении уравнения баланса стока (16.13), следующая:

задают отверстие малого водопропускного сооружения;

гидрограф паводка заменяют ступенчатым с шагом Δt_j (см. рис. 16.15, а);

исследуемый участок лога перед сооружением в пределах возможного распространения пруда делят на большое число интервалов длины Δl_m (см. рис. 16.16);

задают шаг поиска напора перед сооружением (обычно принимают $\Delta h = 0,01$ м);

на первой ступеньке паводка определяют расход Q и бытовую глубину h_6 и по формуле (16.12) вычисляют объем притока воды W_j ;

задавшись в первом приближении величиной напора $H = h_6 + \Delta h$, вычисляют значение правой части уравнения (16.13), т.е. некоторый объем W'_j ;

если $W_j > W'_j$, то, полагая $H = h_6 + 2\Delta h$, вновь вычисляют правую часть уравнения (16.13) и т.д. до тех пор, пока не будет выполнено практическое равенство $W_j = W'_j$ (при точности определения напора $\pm 0,01$ м);

затем переходят на вторую ступеньку паводка и т.д.

Основное допущение второго способа детального расчета отверстий малых водопропускных сооружений с учетом аккумуляции заключается в том, что свободная поверхность пруда принимается горизонтальной. Это допущение в ряде случаев едва ли существенно отразится на точности определения объема пруда, однако сам расчет при этом сильно упрощается, что делает возможным выполнение массовых расчетов водопропускных сооружений.

Изложенные выше методы детального расчета отверстий малых водопропускных сооружений с учетом аккумуляции являются универсальными, поскольку позволяют рассчитывать как трубы, круглые, овоидальные и прямоугольные, так и малые мосты при любой

форме расчетного гидрографа притока при свободном и несвободном истечениях и при любых формах лога в пределах распространения пруда перед сооружением.

16.6. Учет аккумуляции части стока перед трубами и малыми мостами

Основываясь на фундаментальных натурных исследованиях Н.Е. Долгова, в 1928 г. Д.И. Кочерин предложил первый метод расчета отверстий малых водопропускных сооружений с учетом аккумуляции. Этот метод, который в практике проектирования автомобильных дорог использовали в течение многих десятилетий, был основан на следующем комплексе допущений:

расчетный гидрограф паводка (притока) в общем случае своеобразной формы для каждого водосбора и хода расчетного ливня схематизируют в треугольный (см. рис. 16.7);

гидрограф сбросных расходов (в сооружении) также представляют в виде треугольной формы (см. рис. 16.14);

живое сечение лога представляют треугольным очертанием;

пруд перед водопропускным сооружением представляют в виде треугольной пирамиды с горизонтальной свободной поверхностью (см. рис. 16.14).

Зависимость $W_{\text{пр}} = f(H)$ может быть выражена кривой, построенной по плану в горизонталях участка местности перед сооружением. В частном случае, когда склоны бассейна имеют однообразные уклоны и могут быть представлены в виде двух плоскостей, пересекающихся по линии лога, эту зависимость можно записать так:

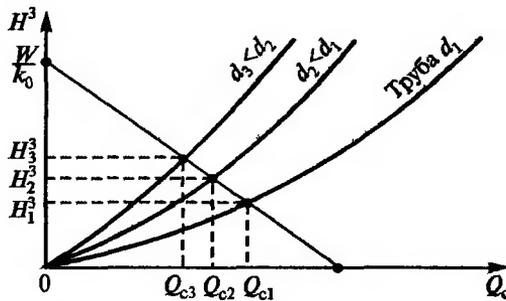
$$W_{\text{пр}} = \frac{m_1 + m_2}{6 I_{\text{лс}}} H^3 = k_0 H^3, \quad (16.14)$$

где m_1 , m_2 и $I_{\text{лс}}$ — средние коэффициенты заложения склонов и уклон лога.

Принимая, по Д.И. Кочерину, треугольную форму гидрографов притока и сбросных расходов, получим (см. рис. 16.14):

$$Q_c = Q \left(1 - \frac{W_{\text{пр}}}{W} \right) = Q \left(1 - \frac{k_0 H^3}{W} \right) = \lambda Q. \quad (16.15)$$

Величина λ , учитывающая рельеф местности и размеры отверстия сооружения, может быть названа *коэффициентом аккумуляции* и легко вычислена при известных k_0 , H и W .



Р и с. 16.17. Графоаналитический прием учета аккумуляции

При использовании расчетных таблиц пропускной способности труб учет аккумуляции может быть выполнен только подбором. При использовании графиков пропускной способности (см. рис. 16.6) можно выполнить расчет графоаналитическим приемом О.А. Рассказова, заключающимся в том, что графики перестраивают в новую систему координат (Q_c и H^3), на котором уравнение (16.15) выражается уже прямой линией (рис. 16.17).

Для построения прямой аккумуляции достаточно соединить по линейке точки с координатами Q (на оси Q_c) и W/k_0 (на оси H^3). Точка пересечения прямой аккумуляции с кривой пропускной способности трубы определяет расход воды в сооружении Q_c и напор H .

Выполняя компьютерное построение гидрографов по балансу объемов стока и интервалам времени и численное интегрирование дифференциального уравнения аккумуляции, А.А. Курганович (КАДИ) получил более точное решение, чем по уравнению (16.15). Результаты его расчетов приведены в табл. 16.8. Расчет выполняют непосредственно по уравнению:

$$Q_c = \lambda Q, \quad (16.16)$$

где λ — коэффициент трансформации, но выражаемый более сложной функцией

$$\lambda = f(W_{\text{пр}}/W),$$

чем по формуле (16.15).

Использование табл. 16.8 и формулы (16.16) в расчетах отверстий труб возможно следующим образом: задают предельный подпор перед сооружением H ; вычисляют объем пруда $W_{\text{пр}}$; зная объем стока W , находят по таблице значение λ ; вычисляют Q_c .

Т а б л и ц а 16.8. Коэффициенты аккумуляции

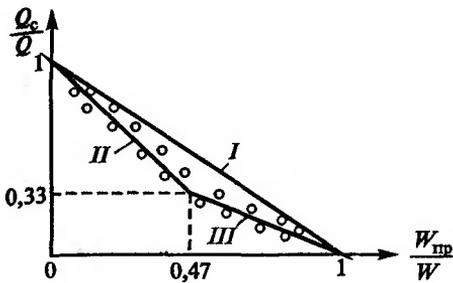
$W_{пр}/W$	Значения λ				$W_{пр}/W$	Значения λ			
	По расчету		Рекомендуемые для расчета			По расчету		Рекомендуемые для расчета	
	при $F < 10$ км ²	при $F > 10$ км ²	при $F < 10$ км ²	при $F > 10$ км ²		при $F < 10$ км ²	при $F > 10$ км ²	при $F < 10$ км ²	при $F > 10$ км ²
0,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,55	—	—	0,26	0,31
0,05	—	—	0,97	0,97	0,60	0,23	0,27	0,23	0,27
0,10	0,88	0,84	0,90	0,90	0,65	—	—	0,20	0,24
0,15	—	—	0,82	0,82	0,70	0,16	0,22	0,17	0,21
0,20	0,72	0,74	0,73	0,73	0,75	—	—	0,14	0,18
0,25	—	—	0,62	0,62	0,80	0,12	0,15	0,12	0,15
0,30	0,53	0,55	0,53	0,55	0,85	—	—	0,10	0,12
0,35	—	—	0,45	0,50	0,90	0,07	0,09	0,08	0,09
0,40	0,40	0,45	0,45	0,45	0,95	—	—	0,04	0,05
0,45	—	—	0,35	0,40	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,50	0,28	0,35	0,30	0,35					

Основываясь на результатах массовых расчетов А.А. Кургановича (см. табл. 16.8), можно уточнить учет аккумуляции и при назначении отверстий труб. Эти расчеты показали, что фактическое очертание кривой сбросных расходов по сравнению с прямой Д.И. Кочерина приводит к большему снижению расчетного расхода. При этом прямая Д.И. Кочерина заменена проф. О.В. Андреевым двумя отрезками II и III прямых (рис. 16.18), один из которых охватывает всю зону снижения сбросных расходов, разрешаемую действующими нормами, по которым уменьшение расхода в сооружении не допускается более чем в 3 раза для ливневого стока и не более чем в 2 раза для стока талых вод.

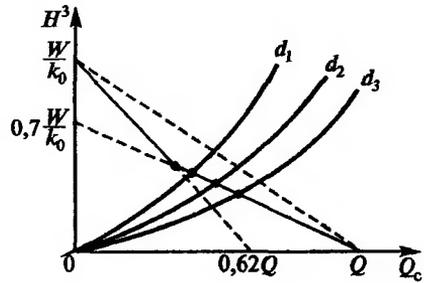
Уравнения двух отрезков прямых оказываются такими:

для зоны Q_c/Q от 1 до 0,33 для ливневых вод и от 1 до 0,5 для талых вод

$$Q_c = Q \left(1 - \frac{W_{пр}}{0,7W} \right); \quad (16.17)$$



Р и с. 16.18. График функции $\lambda = f(W_{\text{пр}}/W)$



Р и с. 16.19. Уточненный графоаналитический прием учета аккумуляции по О.В. Андрееву

для неиспользуемой зоны $Q_c/Q < 0,33$ ($Q_c/Q < 0,50$)

$$Q_c = 0,62Q \left[1 - \frac{W_{\text{пр}}}{W} \right].$$

При использовании этих уравнений построения на графике 16.17 заменяются построениями, приведенными на рис. 16.19. При этом аккумуляция учитывается более полно, чем в случае использования формулы (16.15).

Расчет отверстий малых мостов следует выполнять по схеме свободного истечения (рис. 16.8, а), пользуясь формулой (16.2), которую легко преобразовать к виду:

$$b = \frac{Q_c}{1,33 H^{3/2}}. \quad (16.18)$$

Зная, что $H \approx 2h_c$, следует принять такую последовательность расчета:

задают скорость v_c по желательному типу укрепления русла под мостом, пользуясь табл. 15.6;

вычисляют напор H ;

вычисляют объем пруда $W_{\text{пр}}$ и находят коэффициент аккумуляции, пользуясь формулой (16.17). Тогда $Q_c = \lambda Q$, и каких-либо последовательных приближений для учета аккумуляции производить не надо.

Задавая скорость v_c , надо учитывать, что она будет наблюдаться в потоке лишь на коротком протяжении, в связи с чем табличные допускаемые скорости для укреплений можно повышать приблизительно на 10%.

Принимая какое-либо типовое отверстие моста b , необходимо пересчитывать напор:

$$H = 0,83 \left(\frac{Q_c}{b} \right)^{2/3}.$$

При очень глубоком потоке воды в отводящем русле отверстие моста рассчитывают по схеме несвободного истечения (рис. 16.8, б), которая наступает после того, как прыжок, возникновение которого возможно в сжатом сечении, где $h_c < h_{кр}$, будет надежно затоплен бытовым уровнем, т.е. при условии, что бытовая глубина

$$h_6 > 1,1h_c'' = 1,1 \cdot 0,61H = 0,7H,$$

так как $h' = h_c = 0,5H = 0,9h_{кр}$, чему соответствует $h'' = 0,61H$. Здесь H рассчитывают по формуле (16.1).

При несвободном истечении необходимое отверстие моста определяют:

$$b = \frac{Q_c}{h_6 v_c}.$$

Сбросный расход рассчитывают по формуле (16.17) с вычислением объема пруда по ожидаемой глубине воды перед сооружением:

$$H = h_6 + \frac{v_c^2}{2g\varphi_c^2}.$$

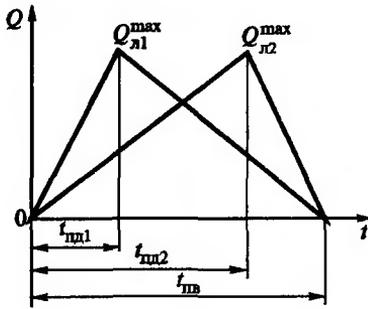
Высоту насыпи у труб назначают не менее чем на 1 м выше подпертого уровня воды при полунапорном и напорном режимах протекания, а также не меньше чем на толщину дорожной одежды, что определяет необходимую засыпку над трубой.

Высоту моста определяют по формуле (16.5).

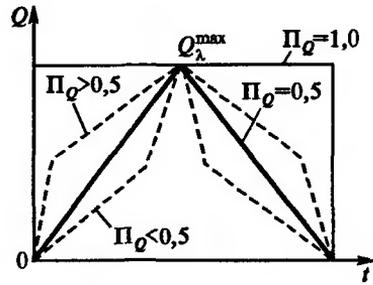
Бровка насыпи у моста должна быть поднята над подпертым уровнем воды не менее чем на толщину дорожной одежды.

Длину моста поверху устанавливают исходя из крутизны откосов конусов и высоты верха моста над дном лотка. При этом следует учитывать, что необходимое отверстие моста, рассчитанное по формуле (16.18), отсчитывают по свободной поверхности потока, а при несвободном протекании — по средней линии (т.е. на глубине $0,5 h_6$).

На основе огромного по объему материала компьютерного моделирования работы малых водопропускных сооружений с использованием, изложенных в § 16.5 математических моделей, М.А. Леевой удалось изучить влияние на конечные результаты упрощенных расче-



Р и с. 16.20. Схема к определению коэффициента относительного времени подъема паводка $f = \frac{t_{пд1}}{t_{пв}}$



Р и с. 16.21. Схема к определению коэффициента полноты гидрографа расчетного паводка $\Pi_Q = \frac{Q_{ср}}{Q_{max}}$

тов основных допущений, положенных в их основу. В частности, исследовалось влияние на конечные результаты следующих факторов:

продолжительности паводка $t_{пв}$;

величины коэффициента относительного времени подъема паводка $f = \frac{t_{пд}}{t_{пв}}$ (рис. 16.20);

величины максимального расчетного расхода паводка $Q_{л}^{max}$;

величины продольного уклона лога у сооружения $I_{лс}$;

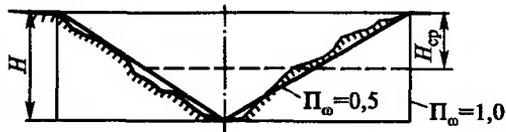
типа, размера и количества отверстий малого водопропускного сооружения;

коэффициента полноты расчетного гидрографа паводка Π_Q (рис. 16.21);

коэффициента полноты живого сечения лога Π_{ω} (рис. 16.22).

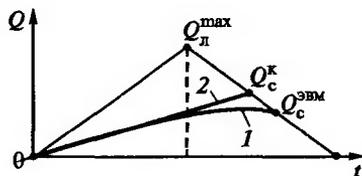
Проведенные сопоставительные расчеты с использованием математических моделей работы малых водопропускных сооружений (см. § 16.5) и по уравнению Д.И. Кочерина (16.15) сразу же показали, что имеют место расхождения в конечных результатах математического моделирования и упрощенных расчетов (рис. 16.23).

Установлено, что расходы воды в сооружении с учетом аккумуляции Q_c^K , полученные по уравнению Д.И. Кочерина (16.15), получают- ся завышенными по сравнению с результатами математического моделирования $Q_c^{ЭВМ}$. Фактическая кривая сбросных расходов при одно-модальном расчетном гидрографе является выпуклой, а в момент достижения максимума Q_{max} резко меняет свою кривизну и даже теряет монотонность.



Р и с. 16.22. Схема к определению коэффициента полноты живого сечения лога

$$\Pi_{\omega} = \frac{H_{\text{ср}}}{H_{\text{max}}}$$



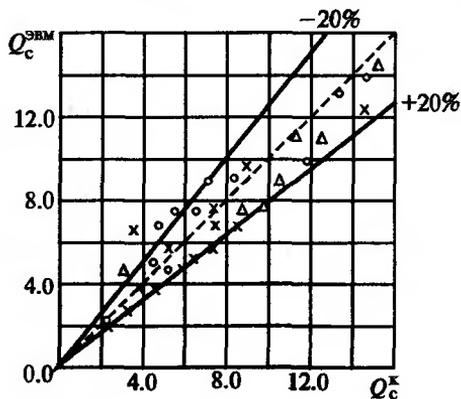
Р и с. 16.23. Фактическая кривая сбросных расходов (1) и прямая Д.И. Кочерина (2)

В результате исключения при математическом моделировании всего комплекса допущений, свойственных упрощенному расчету, установлено, что результаты упрощенного расчета Q_c^K , по Д.И. Кочерину, и результаты математического моделирования $Q_c^{\text{ЭВМ}}$ могут различаться как в ту, так и в другую сторону (рис. 16.24), но в большинстве случаев при упрощенных расчетах конечные результаты оказываются завышенными.

Весьма удобная для практических расчетов теоретическая схема Д.И. Кочерина при упрощенных расчетах, очевидно, требует введения обоснованных коррективов. Тогда общая расчетная формула для упрощенного расчета малых водопропускных сооружений с учетом аккумуляции будет иметь вид:

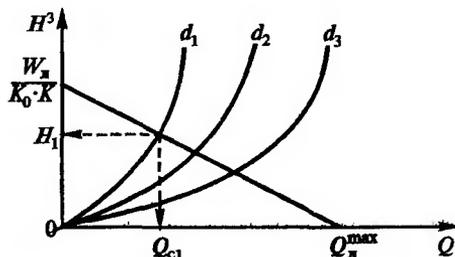
$$Q_c = Q_{\text{max}} \left(1 - K \frac{W_{\text{пр}}}{W} \right), \quad (16.19)$$

где $W_{\text{пр}} = k_0 H^3 K_{\omega}$ — объем пруда, определяемый по формуле (16.14) с учетом поправочного коэффициента формы живого сечения лога;



Р и с. 16.24. Сопоставление результатов математического моделирования работы малых водопропускных сооружений с результатами упрощенных расчетов по Д.И. Кочерину

Рис. 16.25. Схема к графоаналитическому упрощенному расчету отверстий малых водопропускных сооружений с учетом аккумуляции



$K_\omega = 1,5 \Pi_\omega^{2/3}$ — поправочный коэффициент формы живого сечения лога; $\Pi_\omega = h_{\text{ср}}/h_{\text{макс}}$ — полнота живого сечения лога; $h_{\text{ср}}, h_{\text{макс}}$ — средняя и максимальная глубина пруда в створе сооружения соответственно.

Эмпирический поправочный коэффициент, полученный на основе сравнительных данных математического моделирования и упрощенных расчетов по уравнению Д.И. Кочерина (16.15):

$$K = 0,05 \left[\left(\frac{t_{\text{гв}}}{60} \right)^{2/3} + \left(\frac{I_{\text{лс}}}{0,01} \right)^m + \frac{1}{\Pi_Q^2} - 2\sqrt{f} + 0,4 \right], \quad (16.20)$$

где $m = 1/3$ при $I_{\text{лс}} \leq 0,01$; $m = 4/9$ при $I_{\text{лс}} > 0,01$.

Так как многие все еще используемые в настоящее время методы расчета стока с малых водосборов дают лишь расчетные значения $Q_{\text{макс}}$ и W , а форма расчетного гидрографа остается неизвестной, то, принимая усредненные значения $\Pi_Q = 0,40-0,45$ и $f = 0,30-0,35$, формулу (16.20) можно использовать в более упрощенном виде:

$$K = 0,05 \left[\left(\frac{t_{\text{гв}}}{60} \right)^{2/3} + \left(\frac{I_{\text{лс}}}{0,01} \right)^m + 4,2 \right]. \quad (16.21)$$

При упрощенных расчетах использование формул (16.19)—(16.21) сохраняется упрощенный прием расчета отверстий малых водопропускных сооружений с учетом аккумуляции О.А. Рассказова (рис. 16.25).

16.7. Проектирование оптимальных водопропускных труб

Проектирование водопропускных труб на автомобильных дорогах при традиционной ручной технологии производят обычно в два этапа. На первом этапе осуществляют выбор типа и размера малого водопропускного сооружения и определяют минимальную геодезическую высоту (отметку) бровки земляного полотна. На втором этапе, когда уже установлено положение проектной линии продольного

профиля, корректируют проект малого водопропускного сооружения.

При проектировании водопропускных труб на автомобильных дорогах, как правило, рассматривают несколько вариантов отверстий, принимая к строительству вариант с меньшей строительной стоимостью, а также учитывают унификацию сооружений по длине трассы, принимая большие, но преимущественно одинаковые размеры отверстий.

Таким образом, традиционная технология проектирования водопропускных труб предусматривает проработку ограниченного числа вариантов с выбором лучшего из рассмотренных, который, однако, не может претендовать на оптимальность.

Задача автоматизированного проектирования оптимальных водопропускных труб на автомобильных дорогах, решенная Б.М. Наумовым, сводится к проектированию каждого водопропускного сооружения на трассе или участке трассы таким образом, чтобы сумма приведенных затрат на строительство и эксплуатацию всех труб была минимальной.

Каждое водопропускное сооружение представляет собой комплекс, состоящий из тела трубы, фундамента, входного и выходного оголовков, укреплений и земляного полотна, Поэтому приведенные затраты для одного сооружения представляют в следующем виде:

$$K_{\text{тр}} = K_{\text{т}} + K_{\text{у}} + K_{\text{зп}} + K_{\text{оз}} + K_{\text{тр}} + \frac{1}{E_{\text{н}}} (\mathcal{E}_{\text{н}} + \mathcal{E}_{\text{р}}), \quad (16.22)$$

где $K_{\text{т}}$ — стоимость строительства трубы, включая стоимость фундамента и оголовков; $K_{\text{у}}$ — стоимость строительства укреплений у трубы; $K_{\text{зп}}$ — стоимость земляного полотна на подходах; $K_{\text{оз}}$ — стоимость отвода земель под земляное полотно; $K_{\text{тр}}$ — стоимость транспортирования строительных материалов и конструкций; $\mathcal{E}_{\text{н}}$ — ежегодные потери от подтопления сельскохозяйственных угодий; $\mathcal{E}_{\text{р}}$ — ежегодные затраты на текущий ремонт и содержание; $E_{\text{н}}$ — нормативный коэффициент сравнительной эффективности.

Функцию цели при решении задачи проектирования оптимальных водопропускных труб на автомобильных дорогах представляют следующим образом:

$$F(X, Y, Z) = \sum_{s=1}^K \left\{ \sum_{j=1}^v f_{sj}(X_s) C_{sj} + \sum_{j=v+1}^m (X_s, Z_s) C_{sj} + \sum_{p=1}^r \varphi_{sp}(X_s) Y_{sp} C_{sp}^{(m)} \right\}, \quad (16.23)$$

где $X = \{X_1, X_2, X_3, \dots, X_K\}$, $X_s \in M_x$, $M_x = M'_x \cup M''_x$; $Y = \|Y\|_{P=1, 2, \dots, r}^{S=1, 2, \dots, k}$ ($Y_{sp} = 1$, если поставщик p обеспечивает поставки на сооружение;

$Y_{sp} = 0$, если поставщик p поставок на сооружение не обеспечивает); X — типоразмер труб с учетом типа оголовков и количества отверстий, охватываемых одним сооружением; Y — матрица поставок, где элемент Y_{sp} может принимать одно из двух значений 0 или 1; $s = 1, 2, \dots$, k — номер проектируемого сооружения; $p = 1, 2, \dots, k$ — номер поставщика, обеспечивающего поставки на сооружение s ; Z — типоразмеры укреплений, соответствующих X ; $f_{sj}(X_s)$, $f_{sj}(X_s, Z_s)$ — объемы работ, определяющие строительные и эксплуатационные затраты проектируемого сооружения; $j = 1, 2, \dots, n$ — виды работ и затрат; C_{sj} — стоимость производства единицы работ; $\varphi_{sp}(X_s)$ — объемы перевозимых материалов и конструкций; $C_{sp}^{(m)}$ — стоимость единицы объема перевозимых материалов.

Необходимо найти такие X, Y, Z , при которых обеспечивается минимум целевой функции (16.23):

$$F(X, Y, Z) \Rightarrow \min \quad (16.24)$$

при выполнении системы ограничений, обусловленных номенклатурой изделий, конструктивными, техническими, технологическими условиями и возможностями поставщиков.

Номенклатурные ограничения

$$X_s \in M'_x \cup X_s \in M''_x, \quad (16.25)$$

где M'_x , M''_x — соответственно множество типоразмеров круглых и прямоугольных труб; \cup — математический символ «или».

1. Круглые трубы

$$X_s \in M'_x \Rightarrow X_s = \{d^x, n^x, N^x\}, \quad (16.26)$$

где $d^x \in \{0,75; 1,0; 1,25; 1,5; 2,0\}$ — диаметр круглой трубы; $n^x \in \{1, 2, 3\}$ — возможное количество отверстий, охватываемых одним сооружением; $N^s \in \{N_1, N_2\}$ — тип входного оголовка (необтекаемый, обтекаемый).

2. Прямоугольные трубы

$$X_s \in M''_x \Rightarrow X_s = \{d^x, n^s\}, \quad (16.27)$$

где $d^s \in \{(2 \times 2), (2,5 \times 2), (3,0 \times 2,5), (4,0 \times 2,5)\}$ — отверстие прямоугольной трубы; $n^s \in \{1, 2\}$ — возможное количество отверстий, охватываемых одним сооружением.

3. Укрепления круглых труб

$$Z_s \in M'_z \Rightarrow Z_s = \{r^s, T^s\}, \quad (16.28)$$

где $r^s \in \{r_1, r_2, \dots, r_{n1}\}$ — размеры типового укрепления; $T^s \in \{T_0, T_1, \dots, T_5\}$ — типы укреплений.

Нетиповое укрепление

$$Z_s \in M'_z \Rightarrow Z_s = \varphi_1(X_s, H_s), \quad (16.29)$$

где $\varphi_1(X_s, H_s)$ — размеры нетипового укрепления; H_s — напор перед s -м сооружением.

4. Укрепления прямоугольных труб

$$Z_s \in M'_z \Rightarrow Z_s = \varphi_1(X_s, H_s), \quad (16.30)$$

где $r^s \in \{r_1, r_2, \dots, r_{n2}\}$ — размеры типового укрепления; $T^s \in \{T_0, T_1, \dots, T_6\}$ — типы укреплений.

Нетиповое укрепление

$$Z_s \in M'_z \Rightarrow Z_s = \varphi_1(X_s, H_s), \quad (16.31)$$

где $\varphi_1(X_s, H_s)$ — размеры нетипового укрепления; H_s — напор перед s -м сооружением.

Конструктивные ограничения:

$$n(X) \in M'_x \Rightarrow n = \begin{cases} 1,2,3 \} N = N_2 \cup (d > 1,0) \\ \} N = N_1 \cap (d \geq 1,0), \end{cases} \quad (16.32)$$

где « $\}$ », « \cup », « \cap » — математические символы соответственно «если», «или», «и».

Условие (16.32) соответствует возможности строительства многоотверстных ($n \leq 3$) при любых диаметрах труб для случая обтекаемого входного оголовка и при диаметре $d < 1,0$ м для случая необтекаемого оголовка.

Технические ограничения:

по допустимой степени снижения расхода воды в сооружении за счет аккумуляции (не более чем в 3 раза для стока ливневых вод и не более чем в 2 раза для стока талых вод):

$$\begin{aligned} 0,33 Q_{лs} &\leq Q_c(X_s) \leq Q_{лs}, \\ 0,5 Q_{тs} &\leq Q_c(X_s) \leq Q_{тs}; \end{aligned} \quad (16.33)$$

где $Q_{тs}$ — расход расчетной вероятности превышения стока талых вод для s -го сооружения; $Q_{лs}$ — расход расчетной вероятности превышения стока ливневых вод для s -го сооружения;

по допустимому напору

$$H(X_s) \leq H_{\max s}, \quad (16.34)$$

где $H_{\max s}$ — максимальный напор перед s -м сооружением, назначаемый по соображениям ограничения высоты насыпи из условия неподтопления населенных пунктов, предприятий, ценных угодий и т.д.;

по допустимой скорости для укрепления нижнего бьефа или для грунта в случае отказа от строительства укрепления

$$v_{\text{укр} s} < v_{\text{доп}}(X_s), \quad (16.35)$$

где $v_{\text{укр} s}$ — скорость на сходе с укрепления s -го сооружения (см. § 16.4);

по максимальной допустимой длине трубы данного диаметра

$$L_{\text{тр} s} \leq L_{\text{доп}}(X_s), \quad (16.36)$$

где $L_{\text{доп}}(X_s)$ — допустимая длина труб, принимаемая: для $d = 1,0$ м — $L_{\text{доп}}(X_s) = 30$ м; для $d = 0,75$ м — $L_{\text{доп}}(X_s) = 15$ м;

по допустимой высоте насыпи

$$d(X_s) \geq d_{\text{доп}}(H_{\text{нас} s}), \quad (16.37)$$

где $d_{\text{доп}}(H_{\text{нас} s})$ — допустимый минимальный диаметр трубы при заданной высоте насыпи H_s .

Ресурсные и технологические ограничения:

по наличию ассортимента типоразмеров труб

$$m_x \subset M_x, \quad (16.38)$$

где m_x — наличный ассортимент множества типоразмеров труб из общего множества типоразмеров M_x ;

по наличию ассортимента типоразмеров укреплений

$$m_z \subset M_z, \quad (16.39)$$

где m_z — наличный ассортимент множества типов укреплений из общего множества типов укреплений M_z ;

по имеющемуся в наличии объему труб

$$\sum_{s=1}^K Y_{sp} K_i(X_s) \leq R_{ip}, \quad (16.40)$$

где K_i — потребный объем труб i -го типоразмера; R_{ip} — наличный объем труб i -го типоразмера, имеющийся в наличии у p -го поставщика.

Транспортные ограничения:

$$\sum_{p=1}^r Y_{sp} = 1, \quad (16.41)$$

т.е. материалы и конструкции на каждое сооружение определенного типоразмера поставляются только от одного поставщика.

Учитывая, что система ограничений (16.25)—(16.41) не определяет однозначно размеры и характеристики проектируемых сооружений, рассматриваемая проблема относится к классу задач математического оптимального программирования.

Используемый здесь метод оптимизации является реализацией идеи методов последовательного анализа вариантов, возможных направлений, ветвей и границ. Поиск оптимального проектного решения водопропускных труб по длине дороги в рамках комплекса ограничений (16.25)—(16.41) осуществляется в следующей последовательности.

1. Выполняют гидрологические расчеты по определению максимальных расходов талых вод расчетной вероятности превышения Q_r , а также расчетных расходов Q_d и объемов стока W ливневых вод для каждого лога по длине автомобильной дороги, где необходимо строительство малых водопропускных сооружений. Гидрологические расчеты целесообразно выполнять с использованием математических моделей стока (см. § 14.4). В этом случае для каждого малого водосбора получают расчетные гидрографы стока $Q = f(t)$ своеобразной (а не схематизированной) формы.

2. На основе использования детального метода расчета отверстий малых водопропускных сооружений (см. § 16.5) последовательно, начиная с минимального отверстия, отыскивают первое решение, отвечающее комплексу ограничений (16.25)—(16.41). Это решение, называемое *отправным*, соответствует минимальным отверстиям труб с минимальным расходом железобетона, которые еще в состоянии пропустить расчетные расходы при заданной системе ограничений. Для отправного решения вычисляют значение целевой функции (16.23).

Значение отправного решения сразу позволяет установить множество допустимых решений M_0 из исходного множества значений типоразмеров труб M : $M_0 \subset M$.

Очевидно, что конкурирующими вариантами по сравнению с отправным являются варианты с большими размерами отверстий. Увеличение отверстия труб, с одной стороны, приводит к увеличению их стоимости, а с другой — к уменьшению подпоров и скоростей на вы-

ходе, что определяет уменьшение объемов земляных и укрепительных работ и их стоимости. При этом большее отверстие может формироваться путем применения труб с большими отверстиями либо путем увеличения количества отверстий, охватываемых одним сооружением.

3. Разбивают исходное множество допустимых решений M_0 на конечное число непересекающихся подмножеств M_1, M_2, \dots, M_k с разветвлением в возможных направлениях. При этом допустимые решения одного подмножества исключают их дублирование в других (например, трубы круглые одно-, двух-, трехочковые, трубы прямоугольные одно-, двухочковые и т.д.):

$$\bigcup_{j=1}^n M_j = M_0, \quad \bigcap_{j=1}^n M_j = \emptyset,$$

где M_0 — множество допустимых решений; M_i — подмножество допустимых решений в возможных направлениях деления.

4. Для каждого подмножества выполняют его оценку и выбирают наиболее перспективное направление. При этом в качестве оценок подмножеств принимают значение целевой функции (16.23) первых допустимых решений в возможных направлениях. Эти оценки характеризуют влияние увеличения отверстий по отношению к отправному решению путем увеличения размеров отверстия или количества отверстий. На основе изменений оценок подмножеств можно судить о наиболее перспективном подмножестве.

5. Выбрав наиболее перспективное направление движения, т.е. подмножество, в котором наиболее быстро убывает значение целевой функции (16.23) с увеличением отверстия с шагом, обусловленным дискретностью переменных X , отыскивают минимальное значение целевой функции для каждого s -го сооружения.

Выполненное в ГипродорНИИ экспериментально-производственное проектирование с использованием изложенной выше методологии объектов, уже запроектированных по традиционной технологии, показало, что применение метода проектирования оптимальных водопропускных труб позволяет снизить строительную стоимость малых водопропускных сооружений в среднем на 9,5%, а для отдельных сооружений до 26% и более. При этом трудоемкость проектирования снижается до 53%, а время проектирования до 38%, при общем снижении стоимости проектных работ до 28%.

Раздел пятый

ТРАССА АВТОМОБИЛЬНОЙ ДОРОГИ

Глава 17

ПРОЕКТИРОВАНИЕ ПЛАНА ТРАССЫ

17.1. Основные правила трассирования автомобильных дорог

Выбор направления трассы является комплексной задачей, при решении которой конкурирующие варианты автомобильной дороги в пределах полосы варьирования трассы детально оценивают по основным показателям (приведенным затратам, строительной стоимости, транспортно-эксплуатационным расходам, материалоемкости строительства, уровням удобства и безопасности движения, степени загрязнения окружающей среды и т.д.).

Общее направление трассы и ширину полосы варьирования конкурирующих вариантов устанавливают на основе аналитических расчетов по результатам экономических изысканий и разрабатываемых на их основе обоснований инвестиций (ОИ) или технико-экономических частей проектов (ТЭЧ), выполняемых в соответствии со схемами развития и размещения сети автомобильных дорог, развития и размещения производственных сил данного региона, схемами районной планировки и благоустройства.

Выбор общего направления автомобильной дороги выполняют в соответствии с основными законодательными актами РФ по землепользованию, основами водного и лесного законодательства, а также с основными актами по охране недр и окружающей среды.

При нанесении вариантов трассы автомобильной дороги в пределах полосы варьирования принимают во внимание следующие условия:

возможность проектирования автомобильной дороги с соблюдением требований действующих нормативных документов;

трассирование по возможности по кратчайшему направлению между заданными пунктами;

природные условия района трассирования: климатические, топографические, инженерно-геологические, гидрогеологические, инженерно-гидрологические и метеорологические;

ситуационные особенности района проектирования;

варианты пересечения крупных водотоков;

требования трассирования в районах промежуточных пунктов для наилучшего обслуживания местного и транзитного движения;

требования по обеспечению удобства и безопасности движения;

требования ландшафтного проектирования автомобильных дорог.

Всестороннюю оценку каждого варианта по этим критериям удастся сделать при системном, автоматизированном проектировании (см. гл. 32). Для того чтобы дорога наилучшим образом удовлетворяла требованиям удобства и безопасности движения, размеры ее элементов должны обеспечивать возможность движения одиночных автомобилей с расчетными скоростями и транспортных потоков со средними расчетными скоростями, нормируемыми в зависимости от категории дороги, а сочетания элементов плана и продольного профиля должны правильно ориентировать водителей в части дальнейшего направления трассы за пределами фактической видимости.

При проектировании безопасной для автомобильного транспорта трассы автомобильной дороги следует избегать:

кривых малого радиуса в конце затяжных спусков;

резких поворотов дороги за переломами продольного профиля;

пересечений дорог в одном уровне, особенно в условиях необеспеченной видимости;

участков переплетений и слияний транспортных потоков местного и транзитного движения с резко различными скоростями;

длинных прямых, сопрягаемых в конце с кривыми в плане малых радиусов.

Одним из радикальных средств обеспечения удобства и безопасности движения является ландшафтное проектирование (см. гл. 19), принципы которого получили развитие в работах проф. В.Ф. Бабкова, доц. Н.П. Орнатского и других и нашли свое отражение в действующих нормативных документах.

17.2. Учет природных условий при выборе направления трассы

Выбор направления трассы является ответственным этапом проектирования автомобильной дороги, поскольку определяет ее протяжение, расположение и конструкцию всех капитальных дорож-

ных сооружений, объемы и стоимость выполнения строительных работ, стоимость эксплуатационных затрат и, наконец, влияет на показатели работы автомобильного транспорта в течение десятилетий после ввода дороги в эксплуатацию.

При выборе направления трассы всегда стремятся располагать ее на местности таким образом, что взаимное воздействие на дорогу разнообразных природных факторов и в свою очередь автотранспортного комплекса на окружающую среду было минимальным.

В процессе выбора направления трассы на местности приходится учитывать следующие природные факторы: климатические, топографические, инженерно-геологические, гидрогеологические, гидрологические и метеорологические. При учете влияния основных природных факторов на принципиальные решения в процессе трассирования автомобильной дороги обязательно принимают во внимание все те изменения, которые могут произойти в результате народно-хозяйственной деятельности человека в районе прилегающей местности — постройка водохранилищ, проведение ирригационных работ, сведение или, наоборот, посадка лесов, осушение болот, распашка склонов и т.д.

Учет *климатических* факторов, которые неодинаковы в разных регионах страны, осуществляют путем использования в проектировании принципа дорожно-климатического районирования с делением всей страны на дорожно-климатические зоны (см. § 13.5), в каждой из которых проектирование ведут (в том числе и трассирование дорог) по определенным, свойственным каждой зоне правилам.

Топографические условия оказывают сильнейшее влияние на положение трассы автомобильной дороги на местности, во многом определяют объемы строительных работ и стоимость строительства, а также последующие показатели работы автомобильного транспорта. Принципы укладки трассы автомобильных дорог в равнинной, пересеченной и горной местности имеют свои существенные отличительные особенности. Практика дорожного проектирования выработала определенные правила укладки трасс на местности в зависимости от категории рельефа. В частности, коэффициенты удлинения трасс в равнинной местности относительно невелики, а трасса дороги несущественно отклоняется от воздушной линии, в то время как в горной местности во избежание неоправданно больших объемов строительных работ трассу, наоборот, сильно удлиняют, развивая ее по склонам.

Сложность и высокая стоимость обеспечения устойчивости земляного полотна, прочности и долговечности дорожных одежд на участках местности с неудовлетворительными *инженерно-геологическими*

условиями вынуждают во многих случаях обходить такие участки с соответствующим удлинением трассы. В то же время наличие хороших грунтов для возведения земляных сооружений автомобильных дорог и наличие дешевых местных дорожно-строительных материалов для устройства дорожных одежд — самого дорогого элемента автомобильных дорог, побуждает, наоборот, минимально отклоняться с трассой от таких территорий. Типы грунтов при укладке трассы на местности обязательно анализируют не только по их прочности, но и с точки зрения опасности пучинообразования, сильно осложняющей последующую эксплуатацию автомобильной дороги.

Гидрогеологические условия требуют учета при трассировании положения уровней грунтовых вод, оказывающих существенное влияние на прочность грунтового основания дорожных одежд и долговечность их функционирования. Поэтому при укладке трассы всегда являются более предпочтительными участки местности с относительно глубоким залеганием уровней грунтовых вод.

Гидрологические условия местности — чрезвычайно важный фактор в выборе наилучшего положения трасс автомобильных дорог на местности. На автомобильных дорогах проектируют и строят большое количество малых водопропускных сооружений (труб и малых мостов) через периодические, а иногда и через малые постоянные водотоки. При этом, как правило, малые водопропускные сооружения проектируют при любых сочетаниях плана трассы и продольного профиля. Значительно более жесткие требования предъявляют к мостовым переходам через постоянные средние и особенно большие водотоки — этим чрезвычайно ответственным и дорогим участкам автомобильных дорог. Гидрологический и русловый режим постоянных водотоков в большинстве случаев сильно влияет на положения трассы автомобильной дороги и вынуждает нередко отклоняться от воздушной линии, обеспечивая строительство всех сооружений мостового перехода в месте наиболее удобном и безопасном для их строительства и последующей эксплуатации. При проектировании горных дорог на подходах к перевальным участкам в ряде случаев оказывается наиболее экономичным трассирование дорог по долинам рек.

Метеорологические условия районов изысканий автомобильных дорог также учитывают при выборе направления трассы, принимая во внимание направление господствующих ветров, от которых в сильной степени зависит заносимость дороги снегом в зимние периоды ее эксплуатации с соответствующим снижением транспортно-эксплуатационных показателей. В пустынных районах от направления трассы по отношению к господствующим ветрам зависит заносимость дороги песком. При трассировании дорог в обход населен-

ных пунктов трассу стараются располагать с подветренной стороны по отношению к господствующему направлению ветров.

При трассировании автомобильных дорог на местности нередко учитывают также ее расположение по отношению к странам света. Количество солнечной радиации, поглощаемое склонами разной экспозиции, оказывается существенно различным. Склоны южной экспозиции очищаются от снега раньше и просыхают быстрее, чем северной, поэтому дороги (особенно грунтовые), проложенные по южным склонам элементов рельефа, имеют меньший период распутицы, а дороги с капитальными покрытиями меньший период с худшим водно-тепловым режимом земляного полотна. В лесной местности для лучшего осушения земляного полотна автомобильные дороги трассируют, приближаясь к северной стороне просеки, устраивая несимметричные полосы отвода.

17.3. Проложение трассы на местности

Обычно в задании на проектирование автомобильной дороги указывают начальную и конечную и промежуточные точки местности, через которые обязательно должна пройти проектируемая дорога. Эти точки, называемые *контрольными*, могут представлять собой населенные пункты, промышленные и культурно-административные центры, транспортные узлы, согласованные места пересечений с существующими автомобильными и железными дорогами, удобные места переходов через большие водотоки, перевальные участки горных хребтов и т.д. Попытки трассировать автомобильные дороги по прямым (кратчайшим направлениям) чаще всего оказываются невозможными или экономически нецелесообразными в связи с многочисленными препятствиями, встречающимися при трассировании.

Различают высотные и контурные препятствия. К первым относят горные хребты, отдельные возвышенности, крутые склоны и т.д. Ко вторым — населенные пункты, озера и болота, заповедники, запретные зоны объектов оборонного значения, места с неблагоприятными почвенно-грунтовыми условиями и опасными инженерно-геологическими процессами (оползни, осыпи, конуса выноса, интенсивные процессы карстообразования, слабые и просадочные грунты, места интенсивного схода снежных лавин и селеобразований).

Отклонения трассы дорог от воздушных линий нередко определяют и другие соображения, такие, как, обеспечение безопасности и комфортабельности движения, соблюдение принципов ландшафтного проектирования, обеспечение экологической безопасности и т.д.

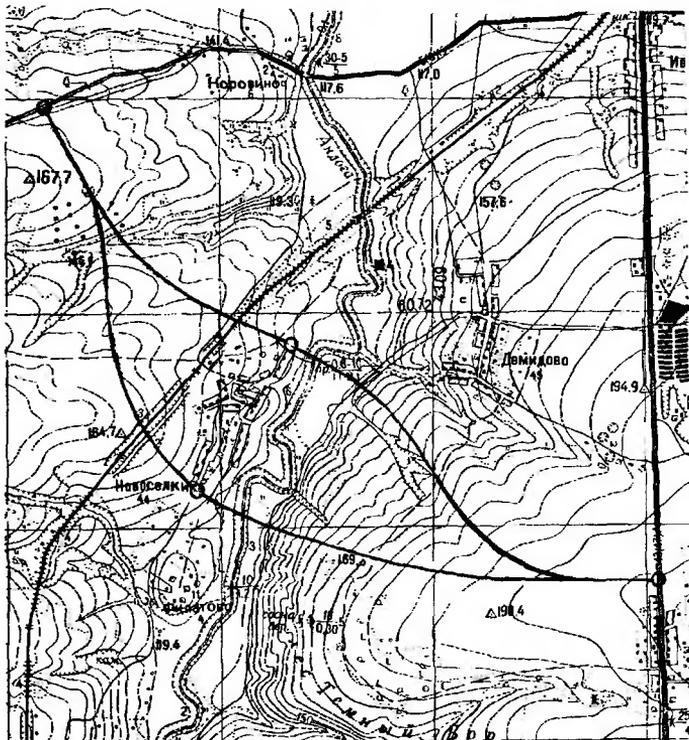
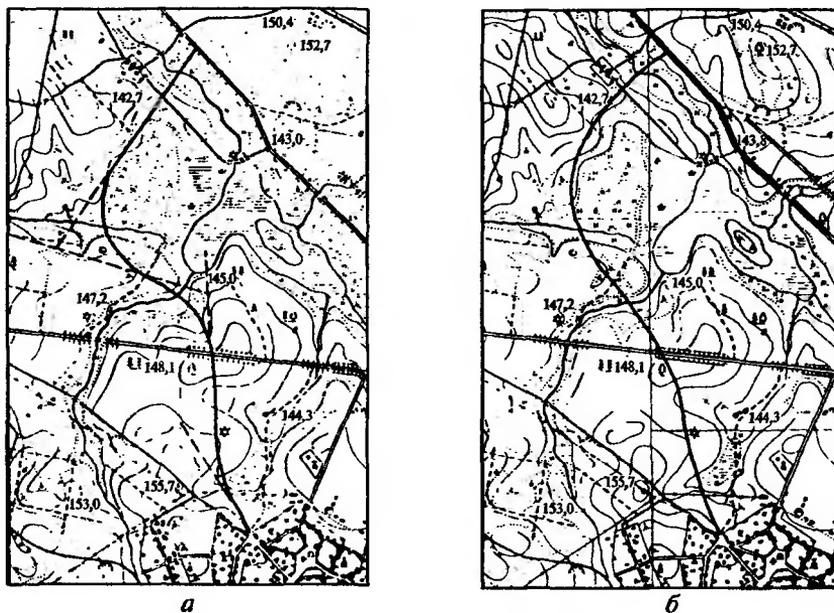


Рис. 17.1. Варианты эскизной трассы между контрольными точками

Обычно варианты обхода трассой дороги различных препятствий намечают по материалам рекогносцировочных наземных и воздушных обследований местности, по крупномасштабным топографическим планам и картам, а также материалам аэрофотосъемок, что позволяет наметить ряд контрольных точек, через которые могут пройти варианты плана трассы дороги в обход всех препятствий. Обычно контрольные точки соединяют плавными эскизными линиями от руки или с помощью гибкой линейки-сплайна (рис. 17.1).

17.4. Принципы трассирования

Традиционный принцип трассирования автомобильных дорог, который можно назвать принципом «*тангенциального трассирования*», состоит в том, что на топографический план либо карту наносят с помощью линейки ломаный (тангенциальный) ход, в изломы которого вписывают круговые кривые либо круговые кривые с вспомога-



Р и с. 17.2. Трасса автомобильной дороги, запроектированная с использованием принципов:

а — «тангенциального трассирования»; *б* — «гибкой линейки»

тельными переходными. Минимальные радиусы закруглений принимают не менее значений, определяемых действующими нормативами для автомобильных дорог соответствующих категорий.

Основной недостаток принципа «тангенциального трассирования» состоит в том, что магистральный ход, укладываемый сообразно рельефу и ситуации, во многом определяет положение самой трассы автомобильной дороги в плане (рис. 17.2, *а*).

Это обстоятельство почти всегда приводит к получению негибкой пространственной линии автомобильной дороги с невыдержанными принципами обеспечения зрительной плавности и ясности трассы, которая к тому же нередко характеризуется наличием длинных прямых и коротких круговых кривых минимальных радиусов, наличием закруглений малых радиусов за переломами продольного профиля, повышенными объемами земляных работ, повышенной аварийностью и т.д. Принцип «тангенциального трассирования» применим лишь на некоторых участках трассы в случаях, когда направления ее, определяющие углы поворота, жестко фиксированы ситуационными условиями (например, в населенных пунктах или в некоторых случа-

ях при реконструкции автомобильных дорог). В остальных случаях свободного трассирования принцип «тангенциального трассирования» использовать не следует ни при ручном, ни тем более при автоматизированном проектировании.

Принцип «гибкой линейки» существенно отличен от идеи «тангенциального трассирования» и является основой автоматизированного проектирования плана автомобильных дорог. Суть принципа «гибкой линейки» состоит в том, что на крупномасштабных топографических планах либо картах, сообразуясь с рельефом и ситуацией, наносят плавную линию от руки или с помощью специальной гибкой линейки — сплайна (рис. 17.2, б). При этом положением магистрального хода — углы поворота, положение их вершин, а также параметры закруглений определяются трассой автомобильной дороги, уложенной в рельеф и ситуацию, а не наоборот, как это принято при тангенциальном трассировании.

Принцип «гибкой линейки» с успехом используют и при неавтоматизированном проектировании, когда закругления трассы представлены лишь в виде обычных круговых кривых либо круговых кривых с вспомогательными переходными. Для этого по плавной эскизной линии трассы автомобильной дороги устанавливают положение магистрального хода, измеряют углы поворота θ и по масштабу значения биссектрис B на закруглениях. По известным значениям θ и B определяют радиусы закруглений с последующим их округлением до кратных значений по зависимости:

$$R = \frac{B}{\left(\sec \frac{\theta}{2} - 1\right)}. \quad (17.1)$$

Принцип «гибкой линейки» является фундаментальной основой определения положения клотоидных трасс автомобильных дорог, обеспечивающих их наибольшую зрительную плавность и ясность, уровни удобства и безопасность движения и т.д. Укладку и расчет клотоидной трассы осуществляют по крупномасштабным топографическим планам как вручную, с использованием прозрачных шаблонов клотоид и круговых кривых, так и автоматизированно на компьютерах.

Получившие распространение методы автоматизированного проектирования плана трассы автомобильных дорог, базирующиеся на принципе «гибкой линейки» (например, «однозначно определенной оси» или «сглаживания эскизной линии»), различаются главным образом способами аппроксимации эскизной линии, однако в резуль-

тате автоматизированной увязки план дороги в конечном итоге оказывается представленным сочетанием обычных элементов клотоидной трассы: клотоидами, отрезками клотоид, круговыми кривыми и прямыми.

17.5. Элементы клотоидной трассы

Решение плана трассы автомобильных дорог представляет собой один из наиболее ответственных этапов проектирования, поскольку во многом определяет приведенные затраты, строительную стоимость, транспортно-эксплуатационные расходы, уровни удобства и безопасность движения, а также степень вредного воздействия дороги на окружающую среду.

Одним из наиболее эффективных средств получения при трассировании наилучших инженерных решений является обеспечение зрительной плавности и ясности верхней части полотна автомобильной дороги. Решить эту задачу традиционными методами трассирования обычно не представляется возможным в связи с тем, что план трассы при традиционном проектировании представляют сочетанием жестких элементов — прямых и круговых кривых. Последние при радиусах $R \leq 3000$ м на дорогах I категории и при $R \leq 2000$ м на дорогах остальных категорий сопрягают с прямыми участками трассы посредством относительно коротких переходных кривых, нормируемых действующими нормативными документами из условия допустимой величины нарастания центростремительного ускорения.

При проектировании автомобильных дорог нашли широкое применение как в РФ, так и за рубежом переходные кривые типа клотоиды (см § 5.4), характеризующиеся линейным законом изменения кривизны по длине переходной кривой и наилучшим образом отвечающие условиям движения по ним автомобилей с постоянными расчетными скоростями (см. рис. 5.6).

При этом кривую на участке от ее начала ($R = \infty$) до любой точки с радиусом $R = R_k$ принято называть *клотоидой*. Кривую же от любой точки с радиусом $R = R_{k1}$ до произвольной точки с радиусом $R = R_{k2}$ называют *отрезком клотоиды*.

Если при традиционном проектировании плана трассы автомобильных дорог переходные кривые являются вспомогательными элементами, обеспечивающими приведение в соответствие плана трассы траектории движения автомобиля на переходных участках закруглений (вход с прямой на круговую кривую и обратно), то при клотоидном трассировании переходные кривые выступают уже как самостоя-

тельные элементы трассирования наравне с прямыми и круговыми кривыми при этом параметры клотоид и их длины принимают существенно большими, чем для переходных кривых традиционной трассы.

По сравнению с традиционной трассой дороги для клотоидной трассы характерно наличие существенно большего числа типов закруглений, которые к тому же являются предельно гибкими и которые поэтому легко приспособлять к конкретным особенностям рельефа и ситуации местности:

биклотоида симметричная при $A_1 = A_2$; несимметричная $A_1 \neq A_2$ (рис. 17.3, а);

биклотоида с круговой вставкой, симметричная при $A_1 = A_2$; несимметричная при $A_1 \neq A_2$ (рис. 17.3, б);

коробовая (составная) клотоида (рис. 17.3, в);

комбинированное закругление (рис. 17.3, г).

Гибкость клотоидной трассы при одних и тех же углах поворота и радиусах сопряжений достигается изменением соотношений параметров соседних клотоид.

Клотоидную трассу проектируют по крупномасштабным топографическим планам, обычно масштабов 1:2000 и 1:5000, аэрофотоснимкам, а на ранних стадиях проектирования по крупномасштабным картам масштаба 1:10 000. Рассмотренные выше типы закруглений определяют положение магистрального хода, который представляют в общей системе координат, выносят в натуру и закрепляют на местности стандартными знаками.

Каждое закругление определяет один угол поворота магистрального хода, от которого осуществляют детальную разбивку трассы для строительства.

При больших длинах кривых нередко вынос трассы в натуру производят от магистрального (тангенциального) хода (рис. 17.4), пред-

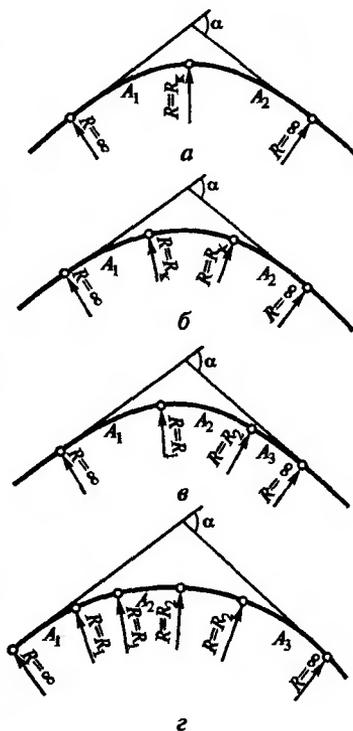
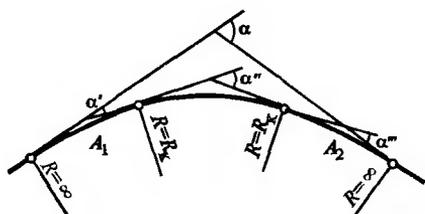


Рис. 17.3. Типы закруглений клотоидной трассы:

а — биклотоида; б — биклотоида с круговой вставкой; в — коробовая клотоида; г — комбинированное закругление



Р и с. 17.4. Представление магистрального (тангенциального) хода по касательным в главных точках трассы;

○ — главная точка

ставленного касательными к главным точкам трассы (точкам сопряжения элементов).

В существующих системах САПР-АД предусмотрен также случай выноса трассы в натуру от произвольного магистрального хода. Аналитический автоматизированный расчет трассы при этом является обязательным.

Таким образом, клотоидная трасса в общем случае представляется сочетанием сопряженных между собой, соизмеримых по длине элементов: клотоид, отрезков клотоид, круговых кривых и прямых. Представление о клотоидной трассе как состоящей только из одних клотоид является неправильным.

17.6. Метод «опорных элементов»

Основные принципы, соблюдаемые при автоматизированном проектировании плана трассы, состоят в следующем: обязательное использование принципов клотоидного трассирования (принцип «гибкой линейки»); детальная, многовариантная проработка трассы с сопоставлением вариантов по основным показателям и выбором наилучшего решения; обеспечение зрительной плавности и ясности трассы и согласование ее с ландшафтом.

При системном автоматизированном проектировании собственно этап трассирования неразрывно связан со всеми последующими этапами проектирования автомобильной дороги и в значительной степени от них зависит. Общая этапная последовательность автоматизированного проектирования плана автомобильных дорог состоит в следующем:

обработка эскизного варианта трассы. С помощью гибкой линейки — сплайна либо от руки сообразно рельефу и ситуации на крупномасштабном топографическом плане наносят плавную линию очередного варианта трассы;

автоматизированное проектирование плана трассы. Выполняют компьютерный расчет геометрических элементов плана, координат

магистрального хода, координат главных точек (НК, СК, КК и т.д.), пикетов и промежуточных точек и т.д.;

подготовка черного профиля земли по оси дороги. Черный профиль готовят по фиксированному плану варианта трассы с использованием цифровой модели местности ЦММ;

проектирование продольного профиля. Используя профиль земли по оси дороги, а также другие необходимые данные, устанавливают компьютерным расчетом оптимальное (или рациональное) положение проектной линии продольного профиля;

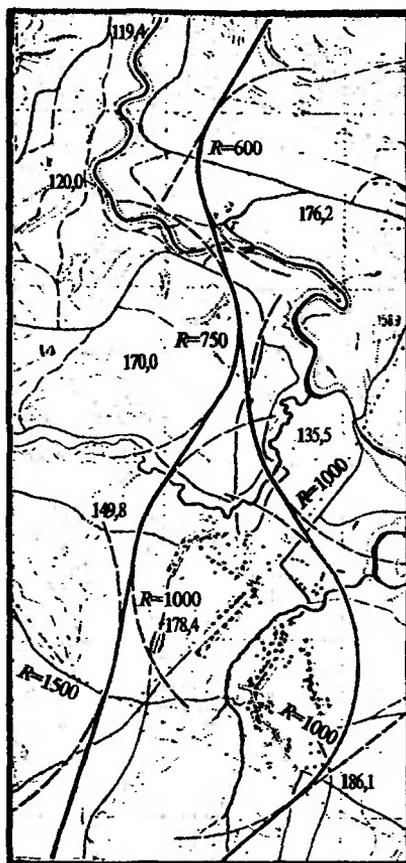
оценка полученного решения по основным показателям. Вариант оценивают по объемам работ, строительной стоимости, транспортно-эксплуатационным расходам, стоимости отвода земель, затратам на борьбу со снегозаносами, уровням удобства и безопасности движения, эстетическим критериям и т.д.;

корректировка плана трассы с последующим повторным проектированием. На основе всесторонней оценки запроектированного варианта трассы, когда проектировщик не удовлетворен теми или иными показателями (большие объемы работ, высокая строительная стоимость, необеспеченная на некоторых участках зрительная плавность и ясность, высокие транспортно-эксплуатационные расходы, необеспеченная видимость, недопустимо высокие значения итоговых коэффициентов относительной аварийности или слишком низкие значения коэффициентов безопасности и т.д.), недостатки проектного решения устраняют путем корректировки плана трассы (а в отдельных случаях только продольного профиля) с последующим повторным проектированием варианта дороги.

Задача трансформации эскизной трассы в последовательность сопряженных между собой элементов клотоидной трассы (клотоид, отрезков клотоид, круговых кривых и прямых) решается автоматизированным компьютерным расчетом с использованием аналитических методов, реализованных на базе специального математического аппарата.

Метод «опорных элементов» является одной из разновидностей «методов однозначно определенной оси» и впервые был разработан в 60-х гг. XX в. в Германии. В нашей стране метод реализован в виде пакета прикладных программ Союздорпроекта и состоит в том, что с помощью линейки и шаблонов круговых кривых устанавливают положение опорных элементов (прямых и круговых кривых), наилучшим образом аппроксимирующих эскизную трассу автомобильной дороги (рис. 17.5) и в последующей аналитической их увязке.

К опорным элементам относят прямые и круговые кривые, которые сопрягаются между собой посредством соединительных элемен-



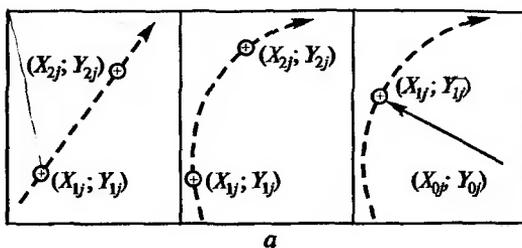
Р и с. 17.5. Представление опорных элементов по эскизным вариантам плана трассы

тов — клотоид и отрезков клотоид. Опорные элементы могут быть заданы в общей системе координат фиксированно, полуфиксированно и свободно (рис. 17.6).

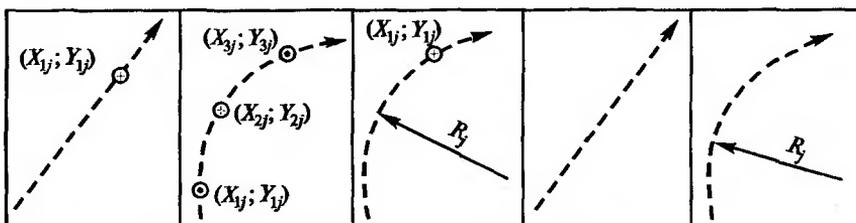
Фиксированным считают элемент, для которого определены его тип (прямая либо круговая кривая), радиус и положение в общей системе координат, не допускающее его перемещения в плане (см. рис. 17.6, а).

Полуфиксированным считают элемент, для которого определены его тип и положение в общей системе координат, допускающее вращение вокруг какой-либо его точки (см. рис. 17.6, б).

Свободным считают элемент, для которого задан его тип, но не определено положение в общей системе координат (см. рис. 17.6, в).



а



б

в

Р и с. 17.6. Способы задания опорных элементов:
 а — фиксированные; б — полуфиксированные; в — свободные

Предусмотренная возможность задания опорных элементов не только фиксированно, но полуфиксированно и свободно существенно облегчает задачу увязки смежных элементов и позволяет принимать округленные значения параметров или длин соединительных кривых. Возможны 16 различных случаев сопряжения опорных элементов, которые по способу задания элементов разделяют на три группы (рис. 17.7):

I группа (рис. 17.7, а) — оба элемента заданы фиксированно;

II группа (см. рис. 17.7, б) — первый элемент задан фиксированно, второй — полуфиксированно;

III — группа (см. рис. 17.7, в) — первый и третий элементы заданы фиксированно, второй — свободно.

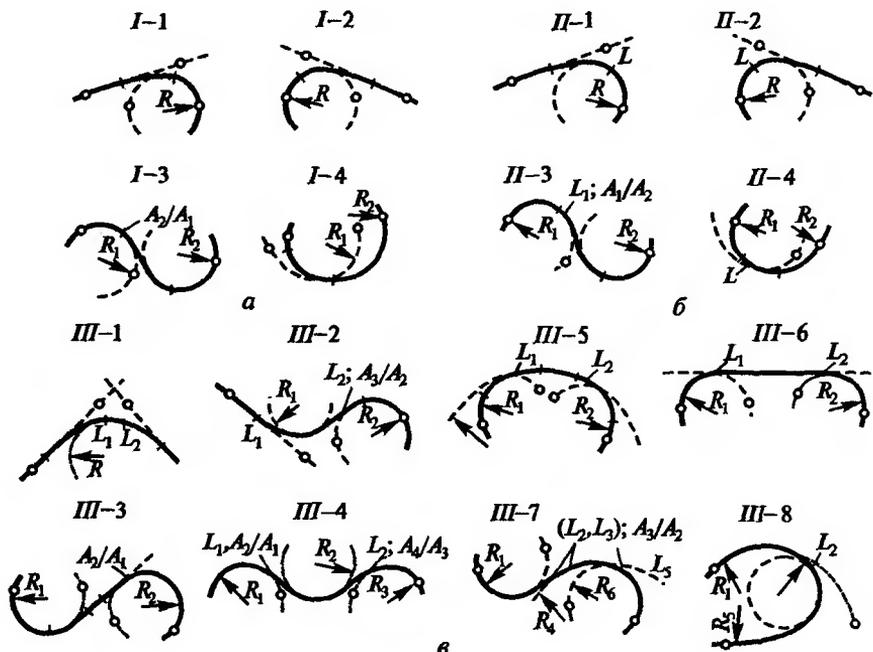
Для обеспечения автоматизированного анализа при выборе расчетной схемы сопряжения опорные элементы задают с учетом правила знаков (рис. 17.8).

Последовательность проектирования плана трассы автомобильных дорог по методу «опорных элементов» состоит в следующем:

пользуясь шаблонами круговых кривых и линейкой, по эскизному варианту плана трассы устанавливают положение опорных элементов, радиусы и способы их задания;

с плана снимают исходную информацию, необходимую для автоматической увязки плана трассы на компьютере;

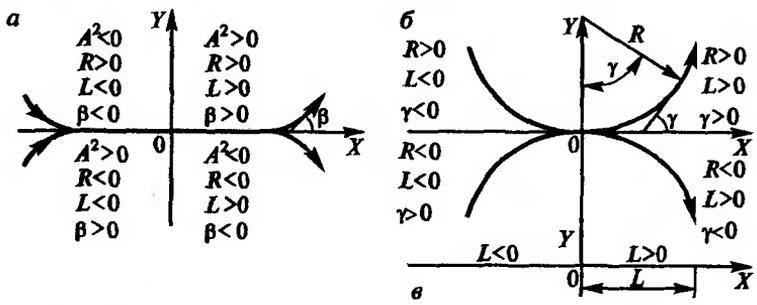
осуществляют автоматический расчет трассы с выдачей необходимой информации.



Р и с. 17.7. Схемы сопряжения опорных элементов:

○ — фиксированные точки

В результате получают следующие данные, необходимые для дальнейшего проектирования и выноса трассы в натуру:
 параметры геометрических элементов увязанной трассы;
 координаты магистрального хода;
 координаты главных и промежуточных точек;



Р и с. 17.8. Правила знаков при задании и расчетах элементов трассы:

а — клятоид; б — круговых кривых; в — прямых

таблицы координат для разбивки трассы от магистрального хода по методу прямоугольных координат, методу засечек и методу полярных координат.

Одно из достоинств метода «опорных элементов» заключается в возможности непосредственного контроля за параметрами и положением всех элементов трассы.

17.7. Метод «сглаживания эскизной линии трассы»

Метод «сглаживания эскизной линии трассы», разработанный в конце 60-х гг. XX в. в США и развитый в Германии, заключается в задании координат последовательности точек, снимаемых с эскизного варианта трассы, с последующей аналитической аппроксимацией посредством алгебраических полиномов высоких степеней. В отличие от метода «однозначно определенной оси», в котором задают лишь информацию, необходимую для однозначного определения трассы, в методе «сглаживания эскизной линии трассы» задают избыточное количество точек эскизной линии и в общем случае через все заданные точки не может быть проведена удовлетворительная трасса. Эти точки эскизной линии рассматривают как «приближенные», вблизи которых должна пройти трасса.

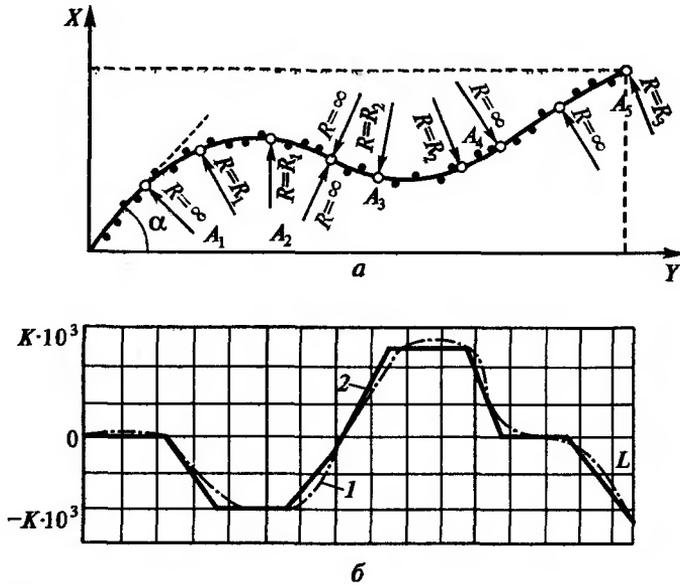
Эскизную трассу заносят в память компьютера координатами последовательности точек с шагом через 10—400 м (в зависимости от извилистости линии), снимаемых с эскизной линии, нанесенной на крупномасштабный план или аэрофотоснимок от руки либо с помощью гибкой линейки — сплайна (рис. 17.9, а).

Начальную точку и направление всегда задают фиксированными, поскольку осуществляют отмыкание от ранее запроектированного участка трассы или от существующей автомобильной дороги. Конечную точку трассы можно либо фиксировать, либо задавать свободно. Точкам также придают различные весовые значения, предопределяющие различную степень приближения, либо обязательное прохождение через них аппроксимирующей линии.

Аналитическую аппроксимацию эскизной трассы, заданной последовательностью точек, осуществляют с использованием алгебраических полиномов высокой степени (обычно 3-й степени), имеющих общую касательную в точках сопряжения.

$$Y = Ax^3 + Bx^2 + Cx + D,$$

где A , B , C , D — коэффициенты аппроксимирующих отрезков кривых, определяемых из условия приближения к эскизной линии по методу «наименьших квадратов».



Р и с. 17.9. Проектирование плана дорог по методу «сглаживания эскизной линии трассы»:

a — план трассы; *b* — диаграмма изменения кривизны; 1 — фактическая кривизна аппроксимирующей линии; 2 — выровненная кривизна

Полученная аналитическая интерпретация эскизной трассы еще не дает возможности контроля за характером изменения кривизны линии, а также за значениями радиусов кривизны в различных ее точках. Чтобы такой контроль мог быть осуществлен, а также с целью представления линии сочетанием обычных элементов клотоидной трассы (прямых, круговых кривых, клотоид и отрезков клотоид), строят диаграмму кривизны (рис. 17.9, б). При этом кривизну проектной линии трассы в любой ее точке определяют:

$$K = \frac{d^2 y / dx^2}{[1 + (dy / dx)^2]^{3/2}} = \frac{2(3Ax + B)}{[1 + (3Ax^2 + 2Bx + C^2)]^{3/2}}.$$

Фактическое очертание диаграммы кривизны заменяют ломаной. Тогда прямые, совпадающие с осью абсцисс, соответствуют прямым участкам трассы, прямые, параллельные оси абсцисс, — круговым кривым и наклонные прямые — клотоидам или отрезкам клотоид. Таким образом, в конечном итоге трассу представляют в виде обычных элементов клотоидной трассы.

Одна из разновидностей метода «сглаживания эскизной линии трассы» — метод «аппроксимации последовательности точек» реализован в Союздорпроекте в виде пакета прикладных программ «План». Идея метода «аппроксимации последовательности точек» заключается в компьютерной обработке эскизной линии трассы с целью определения геометрических характеристик и положения элементов клотоидной трассы, отвечающей определенным требованиям, предъявляемым к ней.

Модель эскизной линии трассы в плане представляют упорядоченным множеством точек, определяемым тремя характеристиками: x_i, y_i, p_i (где x_i и y_i — координаты i -й точки в общей системе координат; p_i — «вес» i -точки). Задача определения геометрических характеристик элементов трассы и их положения, наилучшим образом приближающихся к заданной эскизной линии, решается с применением методов математической оптимизации. При этом в качестве целевой функции принято выражение:

$$C_0 = \sum_{i=1}^j (z_i^2 p_i) \Rightarrow \min,$$

где C_0 — критерий оптимальности; z_i — расстояние от i -й точки до трассы по нормали.

Обязательными ограничениями являются:

$$\Delta\tau_{\min} \leq \Delta\tau \leq \Delta\tau_{\max};$$

$$\Delta R_{\min} \leq \Delta R \leq \Delta R_{\max};$$

$$\Delta L_{\min} \leq \Delta L \leq \Delta L_{\max};$$

$$\Delta A_{\min} \leq \Delta A \leq \Delta A_{\max},$$

где $\Delta\tau$ — изменение центрального угла круговых кривых; ΔR — изменение радиуса круговых кривых; ΔL — изменение длин прямых; ΔA — изменение параметров клотоид; \min, \max — индексы, обозначающие нижнюю и верхнюю границы соответствующих переменных.

Пакет прикладных программ «План» Союздорпроекта, кроме того, позволяет рассчитывать координаты главных и промежуточных точек трассы, поперечников трассы, готовить таблицы для разбивки трассы от произвольного магистрального хода по методам: прямоугольных координат, полярных координат и засечек. Пакет прикладных программ «План» обеспечивает получение продольных и поперечных черных профилей земли с использованием ЦММ.

Метод «сглаживания эскизной линии трассы» выгодно отличается от метода «однозначно определенной оси» тем, что исключает не-

обходимость предварительной, весьма трудоемкой графической проработки трассы с помощью шаблонов круговых кривых и линейки.

Еще одна из разновидностей метода «сглаживания эскизной линии трассы» — метод «кубических сплайнов», реализованный в Союздорпроекте В.А. Федотовым, предполагает аппроксимацию установленной в результате тщательной графической проработки с помощью шаблонов и гибкой линейки эскизной линии, задаваемой координатами последовательности точек, кубическими интерполяционными сплайнами. Метод предполагает обязательное прохождение через заданные точки аппроксимирующих сплайн-функций. Метод «кубических сплайнов» используют главным образом при проектировании право- и левоповоротных директивно направленных соединительных рамп развязок движения в разных уровнях (см. гл. 20).

17.8. Сплайн-трассирование

В условиях автоматизированного проектирования, когда любое проектное решение требует формализованного представления информации в числовом или аналитическом виде, а оценка этих решений связана, как правило, с функциональным анализом, значимость выбора подходящих интерполирующих и аппроксимирующих функций для описания плана трассы автомобильных дорог возрастает. Наиболее подходящими функциями для этого являются *сплайны* — кривые высокой степени гладкости, как универсальный математический аппарат для описания, хранения, преобразования, анализа и представления геометрических форм элементов, в первую очередь трасс проектируемых автомобильных дорог.

Термин «сплайн» (от англ. — spline) происходит от названия чертежного инструмента — гибкой пластмассовой, металлической или деревянной линейки, которая изгибается так, чтобы проходить через заданные точки $\{x_i, y_i = f(x_i)\}$ (рис. 17.10).

Теория сплайнов, получившая распространение в 60-е гг. XX в., прошла этап бурного развития. В настоящее время сплайны наряду с классическими многочленами признаны стандартными функциями

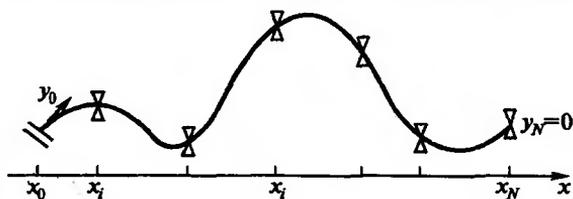


Рис. 17.10. Очертание сплайна как математического аналога гибкой линейки

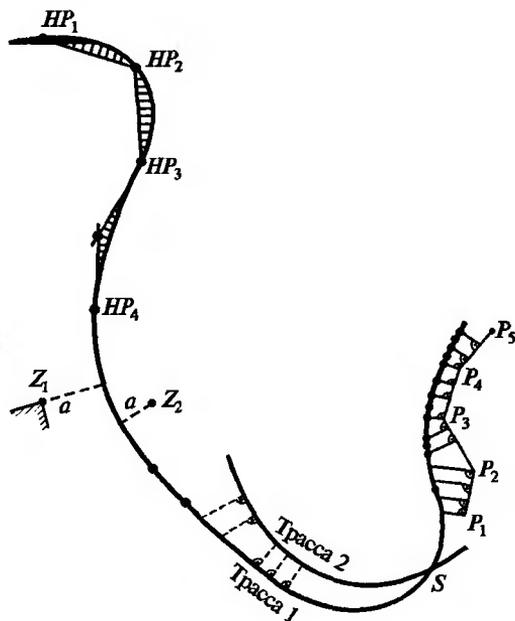


Рис. 17.11. Возможные схемы разбивки сплайн-трасс

математического анализа. Их широкое применение в автомобильном проектировании связано с тем, что сплайны имеют хорошие аппроксимативные свойства и в то же время чрезвычайно просты и удобны для построения вычислительных алгоритмов и подготовки программ на компьютерах.

Применимость сплайнов в дорожном проектировании активно исследовалась едва ли не с самого зарождения теории сплайнов (В.А. Федотов, В.Ю. Голубин, В. Кюн, В. Фулчик и др.). Ряд программных разработок для автоматизированного трассирования автомобильных дорог в плане и продольном профиле на основе сплайнов нашли применение в проектной практике. Следует отметить, что сплайн-трассы никоим образом не связаны с тангенциальным ходом и разбивку их на местности осуществляют от произвольных базисов (рис. 17.11).

Из всего многообразия сплайнов при проектировании автомобильных дорог используют, прежде всего, алгебраические сплайны 1-й и 3-й степеней — интерполяционные и сглаживающие. Выбор алгебраических сплайнов обусловлен тем, что они наиболее экономичны с точки зрения многодельности расчетов и обладают свойствами достаточной точности аппроксимации и гладкости.

Сплайны 1-й степени (линейные) служат главным образом для описания геометрических элементов дорог, представляемых в виде ломаных линий (магистральные и тангенциальные ходы, продольные и поперечные профили земли — черные профили и т.д.), а также как дискретные аналоги кривых переменных радиусов при малой длине шага ломаной (см. § 18.7).

Для построения гладких кривых используют сплайны 3-й степени (кубические), которые вместе со своими первой и второй производными обеспечивают информацию о кривизне и законах ее изменения по длине кривых.

Сплайны определяют двумя способами: взаимным согласованием простых функций (многочленов невысокой степени) и решением задачи математической оптимизации (минимизации).

К сплайнам, определяемым по первому способу, можно отнести интерполяционные сплайны, которые необходимы для аналитического представления дискретно заданной информации. Их широко используют при проектировании лево- и правоповоротных директивно направленных съездов развязок движения в разных уровнях (см. § 20.2).

Сглаживающие сплайны чаще определяют на основе второго способа. Именно они находят самое широкое применение для проектирования плана трасс основных участков автомобильных дорог.

В качестве математического аппарата для решения задачи трассирования дорог можно использовать сглаживающие сплайны, которые минимизируют функционал И. Шенберга:

$$\int_{x_0}^{x_n} |S^{(q)}(x)|^2 dx + \sum_{i=0}^n \frac{1}{\rho_i} [S(x_i) - f_0(x_i)]^2 \Rightarrow \min, \quad (17.2)$$

при ограничениях

$$|S(x_i) - f_0(x_i)| < \varepsilon_i, \quad i = 0, \dots, n, \quad \text{либо} \quad \max |S_{(x_i)}^{(k+1)} - S_{(x_i)}^{(k)}| \leq \delta,$$

где $q = 1, 2$; $S(x)$ — сплайн; ρ_i — весовой коэффициент узла интерполяции; $f_0(x_i)$ — функция начального приближения.

Ограничения могут быть самыми разными, и в случае трассирования дорог — ограничения по допустимому минимальному радиусу кривизны в плане, направлению трассы в плане и предельному уклону в продольном профиле и т.д. При этом для сплайнов третьей степени ($q = 2$) должны быть добавлены также «краевые условия» в точках $x_0 = a$, $x_n = b$, обеспечивающие единственность построения сплайна. Например, это могут быть условия заданного начального и конечного направления проектируемого участка трассы $S'(x_a)$, $S'(x_b)$.

Функционал (17.2) хорошо моделирует задачу трассирования дороги при их реконструкции, когда необходимо добиться минимального отклонения проектируемой трассы от существующей, при одновременном выполнении комплекса ограничений по допустимому уклону и кривизне в продольном профиле и по кривизне и скорости нарастания кривизны в плане согласно требованиям СНиП 2.05.02—85* для дороги данной категории. Минимальное отклонение достигается за счет второго слагаемого функционала (17.2), а условия по кривизне — за счет первого слагаемого.

Так как в процессе проектирования разбивку трассы ведут по пикетам, то переменные координаты X , Y узлов этой трассы удобнее выражать при помощи одного параметра l — текущей длины трассы. В этом случае на любом интервале трасса дороги в плане описывается единственным сочетанием элементов: сплайн-сплайн. Значение параметра l задает координатный вектор точки на трассе. В частности, для плана координаты точки на трассе математически описываются совокупностью параметрических сплайнов:

$$x = X_s(l),$$

$$y = Y_s(l).$$

Вычисления сглаживающих сплайнов 1-й и 3-й степеней осуществляют, как правило, методами математической оптимизации: «покоординатного спуска» или «штрафных функций».

Рассмотренные выше методы проектирования трассы автомобильных дорог предполагают плоское расположение опорных точек трассы и соответственно рассматривают представление только плоских кривых.

Глава 18

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОЛОЖЕНИЯ ПРОЕКТНОЙ ЛИНИИ ПРОДОЛЬНОГО ПРОФИЛЯ

18.1. Принципы проектирования продольного профиля автомобильных дорог

Определение положения проектной линии продольного профиля — один из наиболее ответственных и сложных этапов проектирования автомобильных дорог. На положение проектной линии продольного профиля влияет большое число факторов и условий.

Топографические условия проложения трассы в сильной степени определяют положение проектной линии продольного профиля. На участках местности со спокойными плавными формами рельефа продольный профиль проектируют «по обертывающей», следующей в основном очертанию земли, и, наоборот, на участках с резко пересеченным рельефом положение проектной линии устанавливают «по секущей» с устройством чередующихся выемок и насыпей. При проектировании «по обертывающей» руководящую отметку назначают из условия незаносимости земляного полотна снегом (см. § 13.6) либо из условия минимального возвышения поверхности покрытия над уровнем грунтовых и поверхностных вод в соответствии с табл. 13.3.

Гидрогеологические условия в ряде случаев вынуждают ограничивать глубину выемок в связи с необходимостью обеспечения нормируемого возвышения поверхности покрытия над уровнем грунтовых вод. Несоблюдение этого условия требует строительства дорогостоящих откосных и подкюветных дренажей.

Почвенно-грунтовые и геологические условия во многом влияют не только на положение проектной линии продольного профиля, но и на конструкцию земляного полотна: ограничивают высоту насыпей на слабых основаниях и вынуждают по возможности уменьшать глубину выемок в грунтах, непригодных для отсыпки насыпей на прилегающих участках дороги, а в местах, где качество грунтов позволяет возводить насыпи из притрассовых резервов, дают возможность проектировать продольный профиль «по обертывающей» с минимальной руководящей отметкой и т.д.

Климатические факторы оказывают ощутимое влияние на положение проектной линии продольного профиля. На участках, подверженных снежным заносам, всегда стремятся избегать выемок (особенно мелких) при проектировании продольного профиля, для предотвращения снегозаносов на будущей дороге, а при проектировании «по обертывающей» руководящую отметку назначают из условия незаносимости земляного полотна снегом (см. § 13.6).

Гидрологические условия определяют минимальное возвышение бровок земляного полотна над трубами. Во многом определяют высоты бровок земляного полотна на подходах к мостам, а также высоты проезда на самих мостах.

Ситуационные особенности района проложения трассы диктуют прохождение линии продольного профиля через определенные фиксированные точки (пересечения и примыкания автомобильных дорог, пересечения железных дорог, входы в города и населенные пункты, условия прохождения через населенные пункты и т.д.).

Общими требованиями по установлению положения проектной линии продольного профиля независимо от используемого метода проектирования являются:

соблюдение технических норм проектирования (допустимые продольные уклоны; минимальные радиусы вертикальных выпуклых и вогнутых кривых, минимальные расстояния видимости и т.д.);

обеспечение минимальных объемов земляных работ и рационального распределения земляных масс;

прохождение проектной линии через контрольные точки (фиксированные, полуфиксированные, ограничивающие зоны и т.д.);

ограничение длин участков с предельно допустимыми уклонами;

ограничение минимальных длин вертикальных кривых одного знака (шаг проектирования) во избежание получения «неспокойной» проектной линии;

обеспечение зрительной плавности и ясности трассы и связанных с ними уровней удобства и безопасности движения. Эта задача, как правило, решается совместно с проектированием плана автомобильных дорог.

18.2. Критерии оптимальности

Выбор критерия оптимальности является важнейшим элементом проектирования, во многом определяющим его результаты. Для оптимизации положения проектной линии продольного профиля автомобильных дорог (при фиксированном плане трассы) могут быть использованы следующие критерии: приведенные затраты; стоимость строительства; транспортно-эксплуатационные расходы; стоимость отчуждения земель под земляное полотно; затраты на борьбу со снежными заносами; уровни удобства и безопасность движения; обеспечение зрительной плавности и ясности трассы.

Наиболее полным критерием оптимальности являются *приведенные затраты*, учитывающие как стоимость строительства, так и последующие эксплуатационные расходы.

Среди составляющих единовременных затрат в наибольшей степени реагируют на изменение положения проектной линии продольного профиля стоимости возведения земляного полотна, искусственных сооружений, укреплений откосов, стоимость отчуждения земель и, в общем случае, стоимость дорожных одежд.

Среди составляющих текущих затрат от положения проектной линии продольного профиля зависят: ежегодные расходы на снегоборьбу; стоимость перевозок; потери, связанные со временем нахождения

в пути пассажиров; потери, связанные с дорожно-транспортными происшествиями.

Таким образом, *общий критерий оптимальности* при поиске положения проектной линии продольного профиля автомобильных дорог может быть представлен в виде приведенных затрат:

$$P_{\text{пр}} = K_0^{(\text{зп})} + K_0^{(\text{ис})} + K_0^{(\text{укр})} + K_0^{(\text{оз})} + K_0^{(\text{до})} + \sum_{i=1}^T \frac{1}{(1 + E_{\text{нт}})^i} (\mathcal{E}_i^{(\text{сн})} + \mathcal{E}_i^{(\text{тр})} + \mathcal{E}_i^{(\text{в})} + \mathcal{E}_i^{(\text{дтп})}), \quad (18.1)$$

где $K_0^{(\text{зп})}$ — стоимость сооружения земляного полотна; $K_0^{(\text{ис})}$ — стоимость строительства искусственных сооружений; $K_0^{(\text{укр})}$ — стоимость укрепительных работ; $K_0^{(\text{оз})}$ — стоимость отчуждения земель под земляное полотно автомобильной дороги; $K_0^{(\text{до})}$ — стоимость дорожной одежды; $\mathcal{E}_i^{(\text{сн})}$ — ежегодные затраты на снегоборьбу; $\mathcal{E}_i^{(\text{тр})}$ — ежегодные транспортные расходы; $\mathcal{E}_i^{(\text{в})}$ — потери, связанные с затратами времени пассажиров в пути следования; $\mathcal{E}_i^{(\text{дтп})}$ — потери, связанные с дорожно-транспортными происшествиями; $E_{\text{нт}} = 0,08$ — коэффициент приведения разновременных затрат.

Стоимость возведения земляного полотна

$$K_0^{(\text{зп})} = \sum_{i=1}^n q_i V_i,$$

где q_i — стоимость единицы объема земляных работ на i -м участке продольного профиля, зависящая от категории грунта и способа производства земляных работ; V_i — профильный объем i -го массива земляного полотна; n — количество массивов земляного полотна.

Стоимость искусственных сооружений (водопропускных труб, мостов и путепроводов)

$$K_0^{(\text{ис})} = \sum_{i=1}^n (K_i^{(\text{вв})} + K_i^{(\text{укр})} + K_i^{(\text{тр})} l_i) + \sum_{j=1}^m [K_j^{(\text{уст})} + n' k_j^{(\text{тр})} + k_j^{(\text{оп})} (n' - 1) + K_j^{(\text{укр})}],$$

где $K_i^{(\text{вв})}$ — стоимость входного и выходного оголовков i -й трубы; $K_i^{(\text{укр})}$ — стоимость укрепления верхнего и нижнего бьефов; $K_i^{(\text{тр})}$ — стоимость единицы длины тела трубы, включая фундамент; $l_i = B + f(y_i)$ — длина основной части трубы; B — ширина земляного полотна в бровках; y_i — рабочая отметка; n — количество труб; $K_j^{(\text{уст})}$ — стоимость устоев j -го моста; $k_j^{(\text{тр})}$ — стоимость одного пролетного

строения; $n' = f(y_j)$ — число пролетов j -го моста; $k_j^{(оп)} = f(y_j)$ — стоимость одной опоры; $K_j^{(укр)}$ — стоимость укрепительных работ.

Стоимость укрепления откосов насыпей и выемок

$$K_0^{(укр)} = \sum_{i=1}^n k_i^{(укр)} \left(\frac{l_i^{(отк)} + l_{i+1}^{(отк)}}{2} \right) \Delta l_i,$$

где $k_i^{(укр)}$ — стоимость единицы площади укрепления; $l_i^{(отк)} l_{i+1}^{(отк)}$ — длины по высоте укрепляемой части откосов в i -м и $i + 1$ -м сечениях земляного полотна; Δl_i — длина i -го укрепляемого участка земляного полотна.

Стоимость отчуждения земель под земляное полотно автомобильной дороги

$$K_0^{(оз)} = \sum_{i=1}^n k_i^{(оз)} \left(\frac{B_i + B_{i+1}}{2} + 2 \right) \Delta l_i,$$

где $k_i^{(оз)}$ — стоимость единицы площади отводимой земли на i -м участке; B_i, B_{i+1} — общая ширина всех элементов земляного полотна в i -м и $i + 1$ -м сечениях; слагаемое «2» означает, что в постоянный отвод входит еще дополнительная ширина по 1 м от крайних элементов земляного полотна; Δl_i — длина i -го участка.

Стоимость дорожной одежды

$$K_0^{(до)} = \sum_{i=1}^n k_i^{(н)} \Delta l_i + \sum_{j=1}^m k_j^{(в)} \Delta l_j,$$

где $k_i^{(н)}$ — стоимость 1 пог. метра дорожной одежды для i -й насыпи; Δl_i — длина i -й насыпи; n — общее количество участков трассы в насыпях; $k_j^{(в)}$ — стоимость 1 пог. метра дорожной одежды для j -й выемки; Δl_j — длина j -й выемки; m — количество участков трассы в выемках.

Ежегодные затраты на борьбу со снеготаносами

$$\mathcal{E}_i^{(сн)} = \mathcal{E}_{сн} \left[L_{сн} + \sum_{i=1}^n L_i \left(1 - \frac{y_i}{h_{сн} + \Delta} \right) \right],$$

где $\mathcal{E}_{сн}$ — ежегодные расходы на снегоборьбу на единицу длины снеготаносимых выемок и насыпей; $L_{сн}$ — общая протяженность снеготаносимых выемок, нулевых участков и насыпей высотой до 0,1 м; L_i — длина i -го участка насыпи высотой от 0,1 м до $y = h_{сн} + \Delta$; y_i — средняя высота насыпи на i -м участке; $h_{сн}$ — высота снегового

покрова 5%-й вероятности превышения; Δ — нормируемое возвышение бровки земляного полотна над расчетным уровнем снега.

Транспортно-эксплуатационные расходы

$$\mathcal{E}_i^{\text{тп}} = \sum_{t=1}^n \sum_k L_i N_{kt} \mathcal{E}_{ki}^{(\text{тп})},$$

где L_i — длина i -го проектируемого участка дороги; N_{kt} — среднегодовая суточная интенсивность движения автомобиля k -го типа в t -м году эксплуатации; $\mathcal{E}_{ki}^{(\text{тп})}$ — себестоимость перевозок на единице длины i -го участка для k -го типа автомобиля, зависящая от конкретных дорожных условий.

Потери народного хозяйства, связанные с затратами времени на проезд пассажиров по дороге

$$\mathcal{E}_i^{(\text{в})} = 365 \left[N_{\text{лт}} \left(\frac{L}{v_{\text{л}}} + t_{\text{пл}} \right) P_{\text{л}} + N_{\text{ат}} \left(\frac{L}{v_{\text{а}}} + t_{\text{па}} \right) P_{\text{а}} \right] \mathcal{E}_{\text{п}},$$

где $N_{\text{лт}}$, $N_{\text{ат}}$ — интенсивность движения легкового автотранспорта и автобусов в t -м году эксплуатации автомобильной дороги; L — длина проектируемого участка дороги; $v_{\text{л}}$, $v_{\text{а}}$ — средняя скорость движения легковых автомобилей и автобусов; $t_{\text{пл}}$, $t_{\text{па}}$ — суммарные потери времени, связанные с простоями на пересечениях дорог в одном уровне, на несовершенных переходах через водотоки, паромных переправах и т.д.; $P_{\text{л}}$, $P_{\text{а}}$ — среднее количество пассажиров в одном легковом автомобиле и в одном автобусе; $\mathcal{E}_{\text{п}}$ — средние потери, приходящиеся на единицу времени пребывания в пути одного пассажира.

Потери, связанные с дорожно-транспортными происшествиями:

$$\mathcal{E}_i^{(\text{дтп})} = 3,65 \cdot 10^{-6} \sum_{i=1}^n L_i a_{ii} C_{ii} m_{ii} N_{ii},$$

где L_i — длина i -го участка дороги; $a_{ii} = 0,009K^2 - 0,27K + 34,5$ — количество дорожно-транспортных происшествий на 100 млн авт-км в t -м году эксплуатации автомобильной дороги; K — итоговый коэффициент относительной аварийности, определяемый путем построения линейного графика итогового коэффициента аварийности (см. гл. 32); C_{ii} — средний размер потерь от дорожно-транспортных происшествий, определяемый по табл. 32.1; N_{ii} — среднегодовая суточная интенсивность движения в t -м году эксплуатации автомобильной дороги.

Зрительная плавность и ясность трассы, оптимальное сочетание элементов ее плана и продольного профиля, наилучшее вписывание

полотна дороги в окружающий ландшафт при автоматизированном проектировании обеспечивают на стадии оценки проектных решений путем построения перспективных или перцептивных изображений, либо киноперспектив или киноперцептив автомобильной дороги. В случае обнаружения неудачных сочетаний элементов автомобильной дороги между собой либо с окружающим ландшафтом, не обеспечения зрительной плавности и ясности полотна дороги, видимости и т.д. эти участки перепроектируют, добиваясь лучших результатов даже ценой увеличения объемов работ и строительной стоимости.

18.3. Комплекс технических ограничений

К положению проектной линии продольного профиля выдвигается целый ряд требований и условий со стороны автомобильного транспорта, технологических особенностей строительства и со стороны условий последующей эксплуатации автомобильных дорог. Оптимальное положение проектной линии продольного профиля при автоматизированном проектировании и проектные решения при ручной технологии всегда отыскивают в рамках соответствующего комплекса технических ограничений, который включает:

допустимые продольные уклоны. Уклон ни в одной точке продольного профиля не должен превышать значения, нормируемого для данной категории дороги (см. § 7.2):

$$i \leq i_{\text{доп}};$$

допустимую наибольшую кривизну вертикальных выпуклых и вогнутых кривых. Радиусы вертикальных выпуклых и вогнутых кривых ни в одной точке продольного профиля не должны быть меньше нормируемых (см. § 7.3);

$$R_{\text{вып}} \geq R_{\text{вып доп}},$$

$$R_{\text{вог}} \geq R_{\text{вог доп}};$$

руководящую отметку. При проектировании продольного профиля на спокойных участках рельефа «по обертывающей» необходимое возвышение бровки земляного полотна определяется из условия незааносимости снегом (см. § 13.6) либо из условия минимального возвышения поверхности покрытия над уровнем грунтовых и поверхностных вод (см. табл. 13.3);

фиксированные контрольные точки. Прохождение проектной линии через фиксированные контрольные точки, назначаемые по ситуационным условиям, является обязательным;

ограничивающие точки и зоны. Прохождение проектной линии продольного профиля допускается не ниже ограничивающих точек и зон (обычно это минимальные высоты над трубами, на подходах к мостам, на мостах и путепроводах и т.д.);

контурные ограничения. Это ограничения высоты насыпей и глубины выемок при неудовлетворительных геологических, гидрогеологических, почвенно-грунтовых условиях и т.д.;

допустимые наибольшие длины участков с предельными уклонами продольного профиля;

наименьшую длину вертикальных кривых одного знака — шаг проектирования (см. гл. 7).

При традиционной технологии проектирования продольного профиля автомобильных дорог (например, по методу Союздорпроекта) определяющим является визуальный контроль за положением проектной линии. При субъективной оценке качества решения проектной линии продольного профиля возможны сильные ее отклонения от оптимального положения.

Автоматизированное проектирование продольного профиля автомобильных дорог с использованием оптимизирующих алгоритмов и компьютерных программ исключает субъективизм и связанную с ним неоднозначность проектных решений при одной и той же исходной информации и обеспечивает получение оптимальных проектных решений по различным критериям.

18.4. Техника традиционного проектирования продольного профиля

Определение положения проектной линии продольного профиля автомобильных дорог осуществляют, сообразуясь с основными принципами проектирования продольного профиля с обязательным учетом топографических, гидрогеологических, почвенно-грунтовых и геологических, климатических, гидрологических и ситуационных условий. При этом среди огромного множества возможных инженерных решений инженер-дорожник должен получать проектные решения, обеспечивающие приближение к минимуму целевой функции (приведенных затрат) либо наиболее существенных в данных условиях ее составляющих. Степень приближения к минимуму при этом, естественно, оказывается различной при традиционном (неавтоматизированном) проектировании даже в случае использования одинако-

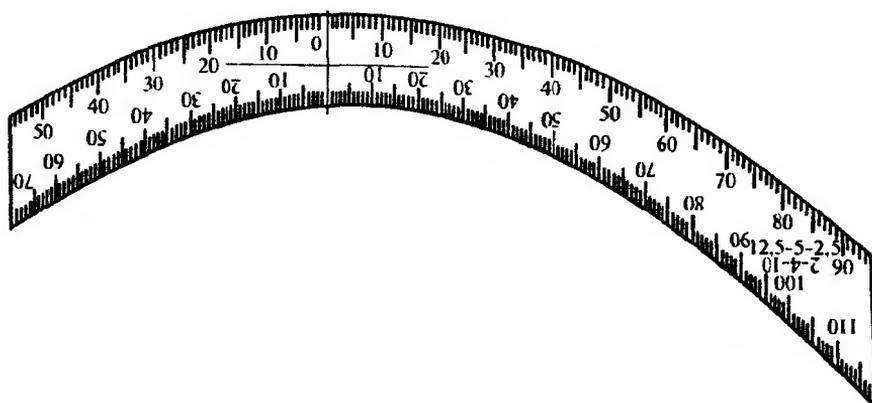
вого набора технических ограничений. Степень приближения к минимуму целевой функции при традиционном проектировании во многом зависит от опыта проектировщика и всегда оказывается меньшей, чем при автоматизированном проектировании, где для этой цели привлекается специальный математический аппарат оптимизации проектных решений.

В качестве исходных данных для ручного проектирования служит черный профиль земли по оси дороги, вычерченный на наклеенной на картон миллиметровой бумаге в масштабах: горизонтальный — 1:5000, вертикальный — 1:500 и грунтово-геологический — 1:50. На чертеж черного профиля в нужных местах наносят фиксированные контрольные точки, прохождение проектной линии продольного профиля через которые является обязательным, ограничивающие точки и зоны, а также контурные ограничения, прохождение проектной линии ниже которых не допускается. Эта информация также выступает в качестве обязательной и для автоматизированного проектирования. И наконец, к исходным данным относятся также требования технических норм к геометрическим параметрам проектной линии согласно категории проектируемой дороги: допустимые продольные уклоны, допустимые радиусы вертикальных выпуклых и вогнутых кривых, минимальные длины вертикальных выпуклых и вогнутых кривых и т.д.

Графоаналитический метод проектирования продольного профиля автомобильных дорог Союздорпроекта (автор инж. Н.А. Боровков) все еще используют в настоящее время наряду с методами автоматизированного проектирования. Для этой цели применяют специальный набор прозрачных лекал, изготовленных в масштабах черного профиля, с нанесенными на них штрихами в точках кривых с соответствующими уклонами (рис. 18.1) и прозрачный треугольник с нанесенными на нем также в масштабах профиля линиями различных уклонов (рис. 18.2).

Пользование шаблонами вертикальных кривых и треугольником уклонов предполагает обязательным тщательное выполнение чертежно-графических работ. Для этой цели нижний обрез шаблона или треугольника должен быть точно сориентирован по горизонтальной сетке миллиметровки, смежные вертикальные кривые должны обязательно сопрягаться между собой в точках с одинаковыми продольными уклонами, прямолинейные участки продольного профиля с заданными уклонами должны сопрягаться со смежными вертикальными кривыми в точках с теми же уклонами и т.д.

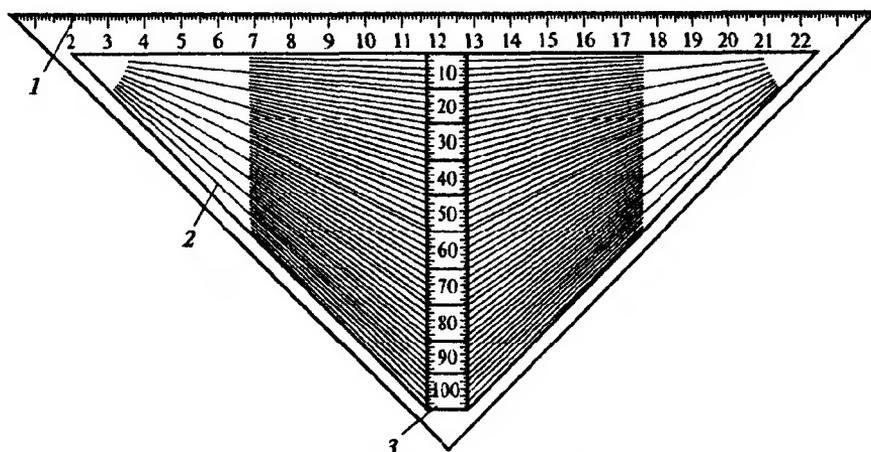
Технология графоаналитического проектирования линии продольного профиля автомобильных дорог сводится к следующему:



Р и с. 18.1. Шаблон для проектирования проектной линии автомобильных дорог

на чертеж черного профиля земли по оси дороги наносят все контрольные фиксированные точки, ограничивающие точки и зоны, а также наносят линии контурных ограничений;

от руки, сообразуясь с контрольными точками, зонами и контурными ограничениями, на профиль земли по оси дороги наносят эскизную проектную линию, стремясь при этом обеспечить: минимальные объемы земляных работ; продольную компенсацию объемов земляных работ на смежных участках выемок и насыпей; минимальные



Р и с. 18.2. Шаблон для проектирования прямолинейных участков продольного профиля:

1 — рабочая сторона треугольника; 2 — лучи-уклоны; 3 — вертикальная шкала

объемы работ по искусственным сооружениям; минимальные площади отчуждаемых под земляное полотно земель; сочетание элементов продольного профиля с планом автомобильной дороги и т.д. В сомнительных местах эскизную линию контролируют и в необходимых случаях корректируют по допустимой кривизне и допустимым продольным уклонам с использованием шаблонов вертикальных кривых минимальных радиусов для данной категории дороги и треугольника уклонов;

осуществляют графоаналитическую аппроксимацию эскизной линии с использованием шаблонов вертикальных кривых соответствующих радиусов и треугольника уклонов с одновременным определением координат (пикетажного положения, высот и уклонов) главных точек проектной линии продольного профиля: точек сопряжения элементов и вершин вертикальных кривых. Для этой цели используют либо специальные таблицы, либо элементы продольного профиля непосредственно рассчитывают по формулам (7.1)—(7.4);

оформляют чертеж продольного профиля, заполняя графы таблицы продольного профиля «Уклоны и вертикальные кривые» и «Отметки по бровке земляного полотна» в местах положения ординат главных точек профиля;

рассчитывают проектные и рабочие отметки продольного профиля с заполнением графы «Отметки по бровке земляного полотна» с использованием специальных таблиц либо по формулам (7.1)—(7.4) с определением точек нулевых работ и с записью рабочих отметок над графическим изображением проектной линии продольного профиля — для участков насыпей и под изображением проектной линии — для участков выемок (см. рис. 2.13);

оформляют чертеж продольного профиля в соответствии с рекомендациями § 2.4 (см. рис. 2.13).

При графоаналитическом проектировании продольного профиля автомобильных дорог наиболее часто приходится решать следующие геометрические задачи (решение их не представляет труда и изложено в специальной литературе): определение местоположения точек нулевых работ, т.е. перехода из насыпи в выемку, и наоборот; увязка проектных отметок в местах сопряжения участков продольного профиля при встречном проектировании; сопряжение двух вертикальных кривых прямым участком профиля, совпадающего с общей с ним касательной; проектирование прямого участка продольного профиля из заданной точки, совпадающего с касательной к вертикальной кривой заданного радиуса, и т.д.

18.5. Метод «опорных точек»

Автоматизированное проектирование земляного полотна осуществляют в разных САПР с использованием соответствующих технологических линий проектирования (ТЛП), являющихся составными частями задачи поиска трассы в пространстве, и эту задачу решают во взаимодействии с проектированием плана трассы. Эти ТЛП позволяют автоматизировать расчетно-графические, конструирующие и оптимизационные задачи, оставляя за проектировщиком право принятия окончательных проектных решений и определения последовательности выполнения проектных работ.

При проектировании земляного полотна учитывают категорию и назначение проектируемой дороги, рельеф местности, геологические, гидрогеологические и другие факторы. На основе данных о перспективной интенсивности и составе движения устанавливают категорию проектируемой автомобильной дороги, расчетную скорость и нормы проектирования геометрических элементов (предельно допустимые значения продольных уклонов, радиусов выпуклых и вогнутых кривых, руководящую отметку и т.д.). Проектирование продольного профиля осуществляют либо путем многовариантной проработки по методу «опорных точек», либо с использованием одного из методов оптимизации.

Метод «опорных точек» предназначен для расчета проектной линии продольного профиля по заданным проектировщиком контрольным (опорным) точкам и радиусам вертикальных кривых. Метод был предложен проф. К.А. Хавкиным в 1965 г. и усовершенствован в Союздорпроекте. Этот метод часто применяют при проектировании продольного профиля автомобильных дорог в равнинной местности и в стесненных условиях (при значительном количестве контрольных точек). Проектную линию продольного профиля методом «опорных точек» решают в традиционном классе функций: в классе вертикальных выпуклых и вогнутых параболических кривых и сопрягающих их прямых.

Проектирование осуществляют следующим образом: на продольном профиле земли по оси трассы («черном профиле») с помощью шаблонов вертикальных кривых (см. § 18.4) графически наносят эскизную проектную линию, состоящую из вертикальных параболических кривых и прямых, с учетом технико-экономических требований. На основе графического проектирования продольного профиля составляют исходные данные для компьютерного расчета (табл. 18.1).

Таблица 18.1. Схемы сопряжений элементов проектной линии и задаваемая по ним информация

Схема сопряжения	Исходная информация
	$\text{ПК}_{T_1}, H_{T_1}, \pm R_1, \pm i_{T_1}$ $\pm R_2$ $\text{ПК}_{T_2}, H_{T_2}, \pm R_3, \pm i_{T_3}$
	$\text{ПК}_{T_1}, H_{T_1}, \pm R_1, \pm i_{T_1}$ $\text{ПК}_{T_2}, H_{T_2}, \pm R_3, \pm i_{T_3}$
	$\text{ПК}_{T_1}, H_{T_1}, \pm R_1, \pm i_{T_1}$ $\pm R_2$ $\text{ПК}_{T_2}, H_{T_2}, \pm i_{T_3}$
	$\text{ПК}_{T_1}, H_{T_1}, \pm i_{T_1}$ $\pm R_2$ $\text{ПК}_{T_2}, H_{T_2}, \pm R_3, \pm i_{T_3}$
	$\text{ПК}_{T_1}, H_{T_1}, \pm i_{T_1}$ $\pm R_2$ $\text{ПК}_{T_2}, H_{T_2}, \pm i_{T_3}$
	1) $\text{ПК}_{T_1}, H_{T_1}, \pm R_1, \pm i_{T_1}$ $\text{ПК}_{T_2}, H_{T_2}$ 2) $\text{ПК}_{T_1}, H_{T_1}, \pm R_1$ $\text{ПК}_{T_2}, H_{T_2}, \pm i_{T_2}$
	1) $\text{ПК}_{T_1}, H_{T_1}$ $\text{ПК}_{T_2}, H_{T_2}, \pm R_2, \pm i_{T_2}$ 2) $\text{ПК}_{T_1}, H_{T_1}, \pm i_{T_1}$ $\text{ПК}_{T_2}, H_{T_2}, \pm R_2$
	$\text{ПК}_{T_1}, H_{T_1}, \pm i_{T_1}$ $\text{ПК}_{T_2}, H_{T_2}, \pm i_{T_2}$

Элементы продольного профиля могут быть: фиксированными (задают пикетажное положение, проектные высоты, радиусы и уклоны в какой-либо точке); полуфиксированными (задают пикетажное положение, проектные высоты и радиусы или уклоны в какой-либо точке); свободными (задают только радиус элемента).

Первый элемент должен быть обязательно задан фиксированным. Последний может быть либо фиксированным, либо полуфиксированным. В табл. 18.1 представлены возможные случаи сопряжения элементов между собой и задаваемая по ним информация.

При задании исходной информации установлены следующие правила знаков: выпуклая кривая «-»; вогнутая кривая «+»; уклон нисходящий «-»; уклон восходящий «+».

Проектирование осуществляют в диалоговом режиме. Исходную информацию вводят либо с дискет, либо из других разделов САПР, либо непосредственно с клавиатуры, анализируют и в случае необходимости корректируют.

После корректировки исходных данных дают команду на увязку проектной линии продольного профиля. Результаты счета выводят на экран монитора в виде таблиц либо чаще всего в графической форме в виде готового чертежа продольного профиля.

Проектировщик анализирует результаты и либо корректирует их для получения нового решения, либо дает команду на выдачу готового чертежа и передачу информации для последующих этапов проектирования.

18.6. Метод «проекции градиента»

Оптимизационный метод проектирования продольного профиля «проекции градиента» применительно к автомобильным дорогам был разработан в 1974 г. во Всесоюзном научно-исследовательском институте транспортного строительства ЦНИИС В.И. Струченковым.

Автоматизированное проектирование оптимальной линии продольного профиля автомобильных дорог по методу «проекции градиента» осуществляют в три этапа: оптимизация проектных отметок; сглаживание «цепочечной» проектной линии; оптимизация элементов продольного профиля.

На первом этапе искомую проектную линию представляют в виде «цепочечной линии» с узлами, совпадающими с переломными точками черного профиля земли. «Цепочечная линия» при этом должна удовлетворять всем техническим условиям и ограничениям. Поиск оптимального решения осуществляют методом «проекции градиента», представляющего собой итерационный процесс, на каждом шаге

которого получают новую проектную линию с меньшим значением целевой функции, чем на предыдущем шаге.

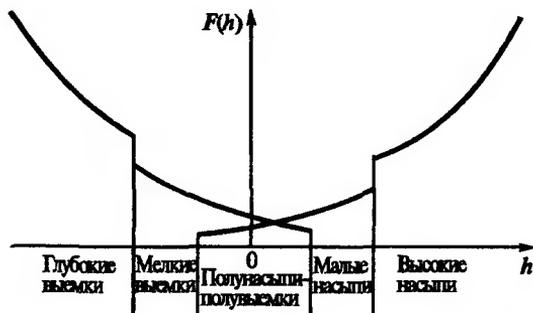
В качестве целевой функции принята строительная стоимость земляного полотна и искусственных сооружений. Оптимальное решение считают найденным, если выполнены все ограничения, проекция градиента равна нулю и никаких изменений положения проектной линии, в части уменьшения значения целевой функции не происходит.

На втором этапе происходит определение границ элементов продольного профиля: «цепочечный» продольный профиль аппроксимируют последовательностью традиционных элементов: квадратных парабол и прямых, при этом могут иметь место переломы касательных на стыке элементов. Критерием оптимальности на этой стадии является минимум суммы квадратов отклонений полученной кусочно-параболической кривой от исходной ломаной. Параметры парабол определяются таким образом, чтобы не нарушались ограничения по уклону и кривизне во всех точках предполагаемого элемента, а также выполнялись граничные условия в точках примыкания и отмыкания.

На третьем этапе выполняется оптимизация коэффициентов кусочно-параболических кривых проектной линии по строительной стоимости. При этом учитывают все заданные ограничения, длины принимают как на предыдущем этапе и исключают переломы касательных на стыках парабол.

Оптимальная проектная линия продольного профиля готовится в несколько этапов с последовательным уточнением и детализацией исходных данных. На каждом этапе задают исходные данные о нормах проектирования, технических ограничениях, о поперечных профилях земляного полотна, единичных стоимостях производства земляных работ и распределении земляных масс. В местах расположения водопропускных сооружений, подземных коммуникаций, на участках с неблагоприятными гидрогеологическими условиями и т.д. задают высотные ограничения снизу. В местах прохождения проектируемой дороги под существующими или проектируемыми дорогами, ЛЭП и т.д. задают высотные ограничения сверху.

Для обеспечения требования минимального возвышения насыпи на подтопляемых участках задают так называемые «зонные высотные ограничения». На этих участках проектная линия не должна проходить ниже прямой, соединяющей начальную и конечную точки «зоны» с заданными проектными высотами. Для обеспечения условий примыкания слева и справа задают высоты и уклоны на границах участка. Предусмотрена возможность оптимизации проектной ли-



Р и с. 18.3. График зависимости площади поперечного сечения $F(h)$ от рабочей отметки h

нии со свободным правым концом. На равнинных участках местности задают руководящие рабочие отметки.

Для поиска оптимальной линии используют построение по участкам зависимости площади поперечника от величины рабочей отметки. В общем случае они имеют вид, представленный на рис. 18.3, и состоят из четырех ветвей квадратных парабол $F(h) = ah^2 + bh + c$.

Весь проектируемый профиль земляного полотна разбивают на участки так, чтобы в пределах каждого участка были приблизительно одинаковыми косогорность и типы конструкций земляного полотна.

При последующем совершенствовании программы Союздорпроектом разработана подпрограмма автоматического формирования коэффициентов зависимости $F(h)$.

По каждому участку задают:

минимальную и максимальную рабочие отметки, т.е. устанавливают интервал, в пределах которого строят зависимости $F(h)$;

толщину дорожной одежды по оси;

мощность снимаемого растительного слоя торфа или слабого грунта, подлежащего замене;

средневзвешенные на участок единичные стоимости выполнения земляных работ: из выемки в насыпь, из выемки в кавальер, из резерва в насыпь;

дифференцированно для левой и правой частей поперечного профиля уклон земли, ширину и уклон земляного полотна поверху, параметры откоса для большой насыпи, малой насыпи, большой выемки, малой выемки.

Оптимизацию продольного профиля выполняют с ориентировочным учетом способов производства работ и распределения земляных масс. При этом проектируемый профиль разбивают на участки, где насыпь и выемки сооружают совместно. На каждом из участков задают соотношения объемов насыпей V_n и выемок V_v вида:

$$kV_b \geq V_n + C,$$

где k — коэффициент, позволяющий учитывать степень уплотнения грунта и непригодность использования части грунта выемок для сооружения насыпи; C — слагаемое, позволяющее учитывать запасы грунта на соседних участках или транспортных развязках (может быть как положительным, так и отрицательным).

Если при поиске положения оптимальной линии продольного профиля учитывают и стоимость искусственных сооружений, то необходимы данные об увеличении стоимости сооружений при изменении рабочей отметки на 1 м.

Задачу проектирования оптимального продольного профиля решают в интерактивном режиме с оценкой промежуточных результатов на экране монитора.

18.7. Метод «граничных итераций»

Метод «граничных итераций» разработан в 1967 г. Е.Л. Фильштейном. Метод, реализованный в виде компьютерной программы «Пола», при проектировании оптимальной линии продольного профиля автомобильных дорог позволяет учитывать следующие условия и ограничения:

для каждого элемента продольного профиля уклон проектной линии K_i не должен превышать предельно допустимого значения K_i . Для обеспечения зрительной плавности и ясности трассы, органического вписывания ее в окружающий ландшафт и достижения в связи с этим высоких уровней удобства и безопасности движения методом предусмотрена возможность дифференцированного задания предельных уклонов K_i на различных участках автомобильной дороги;

в каждой точке проектной линии, представляющей собой плавную кривую переменного радиуса, радиусы кривизны вертикальных выпуклых и вогнутых кривых не должны быть меньше допустимых значений $R_{\text{вып}}$ и $R_{\text{вог}}$. Методом предусмотрена возможность дифференцированного задания допустимых значений радиусов вертикальных кривых на различных участках автомобильной дороги;

геодезические высоты (отметки) проектной линии в специально оговоренных точках, называемых *фиксированными*, должны быть равными заданным значениям. К этим точкам могут быть отнесены: отметки проезжей части мостов и путепроводов, головок рельсов железных дорог и проезжих частей автомобильных дорог, пересекаемых в одном уровне; отметки проезда в населенных пунктах и т.д. Фиксиро-

ванными являются также точки начала и конца проектируемого участка автомобильной дороги;

геодезические высоты проектной линии в специально оговоренных точках или зонах, называемых *ограничивающими*, должны быть не ниже заданных значений. К этим точкам обычно относят: отметки пойменных насыпей на подходах к мостам; отметки насыпей на болотах; отметки насыпей над трубами; минимальные отметки проезда на мостах и путепроводах, когда их высоты строго зафиксированы снизу;

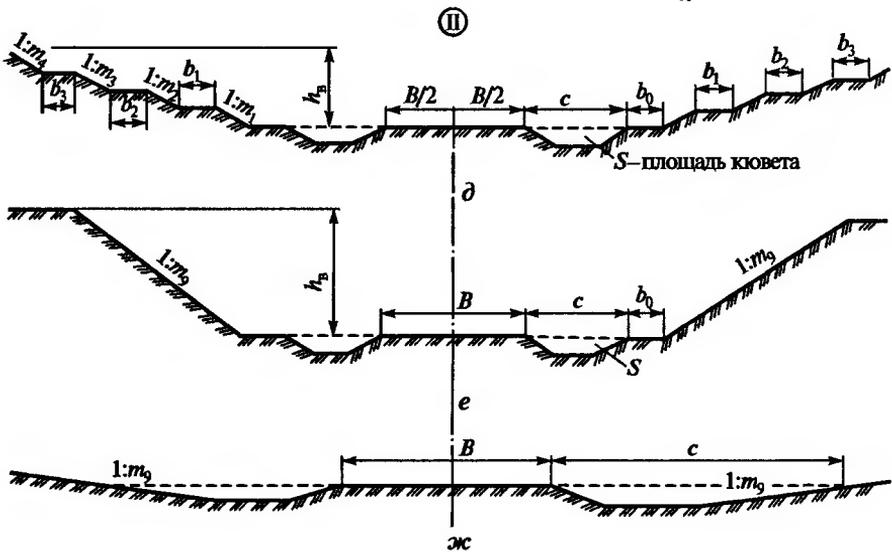
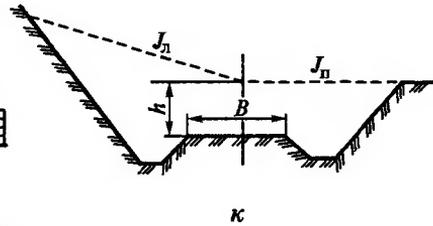
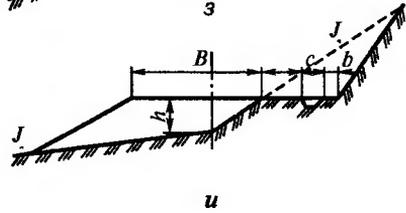
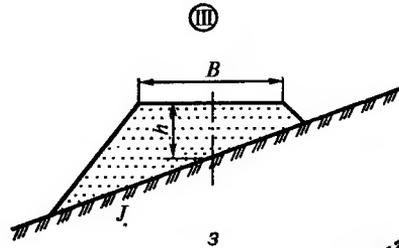
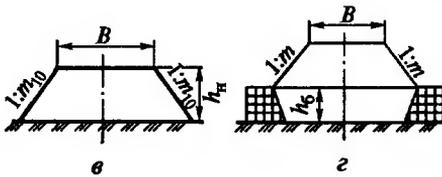
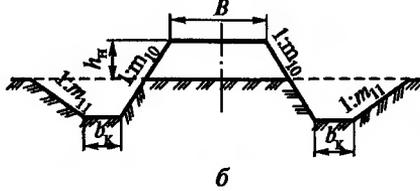
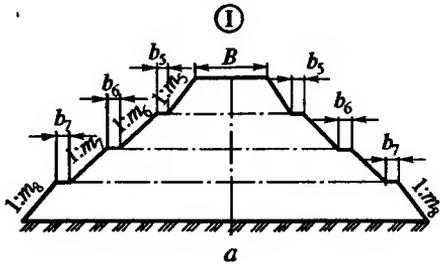
геодезические высоты точек верха зоны с гидрогеологическими условиями, затрудняющими или делающими нежелательным прохождение проектной линии продольного профиля ниже границы этой зоны. К этим ограничениям, называемым *контурными*, относят, например, требование проложения проектной линии без выемок либо с выемками ограниченной глубины или с насыпями с высотой не ниже заданной. Для этой цели проектировщик задает значение $\pm H'$ — расстояние от черной линии, на котором должна находиться параллельная ей ограничивающая линия с указанием начала и конца этой зоны.

При автоматизированном проектировании оптимальной линии продольного профиля должна быть обеспечена минимальная строительная стоимость. Для этой цели задают ориентировочные стоимости 1 м^3 грунта насыпи и 1 м^3 грунта выемки, которые назначают дифференцированно по участкам проектируемой дороги в зависимости от категории разрабатываемого грунта, способа производства работ, дальности возки и т.д.

Тип поперечного профиля земляного полотна в каждом сечении выбирают в зависимости от рабочей отметки, ее знака и заданных параметров земляного полотна. Метод «граничных итераций» и программа «Пола» предусматривают в процессе проектирования автоматический выбор типа поперечного профиля земляного полотна, задаваемого параметрами основных форм насыпей и выемок (рис. 18.4).

Р и с. 18.4. Типовые поперечные профили земляного полотна, используемые при автоматизированном проектировании продольного профиля по программе «Пола»:

I — насыпи на равнинных участках; II — выемки на равнинных участках; III — поперечные профили земляного полотна на косогорах; а — программное изменение поперечника высокой насыпи; б — насыпь с боковыми кюветами или притрассовыми резервами; в — то же, без кюветов (притрассовых резервов); г — насыпь на болоте; д — программное изменение поперечника глубокой выемки; е — выемка с закюветными полками; ж — мелкая выемка; з — насыпь на косогоре; и — полу-
выемка-полунасыпь; к — выемка на косогоре



К параметрам земляного полотна относят: его ширину, коэффициенты заложения откосов, ширину берм, размеры кюветов и резервов и т.д. В зависимости от знака и численного значения рабочей отметки при подсчете объемов земляных работ в расчет автоматически вводятся соответствующие очертания поперечников земляного полотна.

Стоимость отвода 1 м^2 земельных угодий, по которым проходит автомобильная дорога, задают с целью учета изменения стоимости строительства, связанного с постоянным отчуждением земель при высотном перемещении проектной линии.

Стоимость искусственных сооружений при автоматизированном проектировании оптимального продольного профиля учитывают заменой участков автомобильных дорог на искусственных сооружениях эквивалентными по стоимости участками земляного полотна.

Автоматизированное определение оптимального положения проектной линии продольного профиля оказывается наиболее эффективным при проектировании автомобильных дорог в пересеченной местности. В этих случаях совершенно необходимым является учет косогорности при подсчетах объемов земляных работ и корректировке проектной линии для отыскания оптимального решения. Поперечные профили земли, получаемые с использованием цифровых моделей местности (ЦММ) или в результате инструментальной съемки местности по характерным точкам, преобразуют в двухскатный эквивалентный профиль с точкой перелома, лежащей по оси проектируемой дороги. Для этой цели задают уклоны левой и правой от оси частей поперечника и его пикетажное положение (рис. 18.5).

Очертание косогора в промежуточных сечениях между заданными поперечниками интерполируется автоматически программным путем и учитывается при подсчете объемов земляных работ. Тип поперечного профиля земляного полотна в каждом сечении косогорного участка автоматически выбирается в зависимости от величин рабочих отметок, параметров земляного полотна, положения точек перегиба поверхности косогора с откосами земляного полотна.

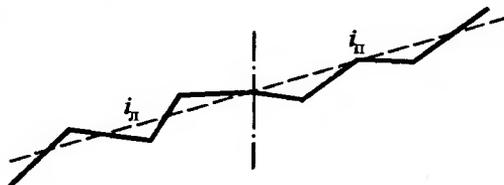


Рис. 18.5. Представление поперечного черного профиля

Основная идея метода «граничных итераций» состоит в следующем. Для решения поставленной задачи определен класс функций, в котором отыскивается оптимальное решение, — это ломаная линия (линейный сплайн) с коротким строительным шагом, обычно принимаемым равным 20 м. Ломаная с минимально возможным строительным шагом представляет собой дискретный аналог кривой переменного радиуса. Являясь более гибким элементом по сравнению с обычной круговой (или параболической) кривой, она позволяет максимально приближаться к оптимальному решению и обеспечивает большую зрительную плавность и ясность трассы, что для автомобильных дорог (особенно высоких категорий) имеет одно из важнейших значений.

Для получения нулевого (отправного) проектного решения строят математическую модель профиля земли по оси дороги (черного профиля) в классе ломаных с равным шагом. Как известно, исходный черный профиль всегда представляют в виде ломаной с неравным шагом, уравнение которой имеет вид:

$$y(x) = y_0 + \frac{1}{2} \sum_{i=0}^n K_i (a_i - a_{i-1} + |x - a_{i-1}| - |x - a_i|), \quad (18.2)$$

где $K_i = \frac{y_i - y_{i-1}}{a_i - a_{i-1}}$ — тангенс угла наклона i -го отрезка; a_i, y_i — соответственно абсциссы и ординаты ломаной (т.е. черного профиля).

Математическая модель черного профиля в классе ломаных с равным шагом должна наименьшим образом отклоняться от исходного черного профиля, описываемого уравнением (18.2).

Задача оптимизации положения проектной линии продольного профиля сводится к отысканию такого ее положения, при котором достигается:

$$\sum_{i=1}^n (y_i - y_i^{(0)})^2 \Rightarrow \min, \quad (18.3)$$

при выполнении ограничений:

по уклону

$$|y_i - y_{i-1}| \leq \bar{K}_i \delta \quad \text{при } 1 \leq i \leq n; \quad (18.4)$$

по кривизне

$$\rho_i = |y_{i-1} - 2y_i + y_{i+1}| \leq \frac{\delta^2}{|R|}; \quad (18.5)$$

по фиксированным точкам

$$y_s = \overline{y_s}; \quad (18.6)$$

по ограничивающим точкам и зонам

$$y_j \geq \overline{y_j}, \quad (18.7)$$

где y_j — ординаты проектной линии; \overline{K} — предельно допустимые уклоны; δ — шаг моделирования (обычно принимаемый $\delta = 20$ м); \overline{R} — предельные радиусы кривизны для выпуклых и вогнутых вертикальных кривых; y_s — фиксированные точки; y_j — ограничивающие точки и зоны.

Задача отыскания в принятом классе функций такой ломаной, которая удовлетворяла бы заданным ограничениям (18.4)—(18.7) и в то же время соответствовала минимуму строительной стоимости возведения земляного полотна (условию 18.3), разбивается на два этапа.

На *первом этапе* отыскивается положение проектной линии продольного профиля, соответствующее минимуму профильных объемов земляных работ при единообразном очертании поперечного профиля земляного полотна.

Нулевым приближением (отправным решением) является модель черного профиля земли $y^{(0)}$, которое, естественно, не может быть окончательным, так как в общем случае для некоторых элементов линии $y^{(0)}$ оказываются не выполненными ограничения (18.4)—(18.7). В связи с этим вначале проектная линия регулируется по величине допустимого уклона. Для этой цели отыскивается какое-либо $|K_i^{(0)}| > \overline{K}_i$ и находят такое решение $y^{(1)}$, при котором достигается $\min(y^{(1)} - y^{(0)})^2$ и $K_i^{(1)} = \overline{K}_i \text{sign} K_i^{(0)}$. Затем выбирают $|K_i^{(1)}| > \overline{K}_j$ и отыскивают такое положение проектной линии $y^{(2)}$, при котором достигается $\min(y^{(2)} - y^{(1)})^2$ и $K_j^{(2)} = \overline{K}_j \text{sign} K_j^{(1)}$ и т.д.

Иными словами, на каждом p -м шаге алгоритма накладывается только одно ограничение и ищется минимальное отклонение не от нулевого приближения ($y^{(0)}$), а от решения полученного на $(p - 1)$ -м шаге алгоритма. В этом заключается основная идея метода «граничных итераций». Возможные расчетные случаи при регулировании продольного уклона представлены в табл. 18.2.

Затем аналогичным образом проектная линия регулируется по кривизне и т.д. Возможные расчетные случаи при регулировании проектной линии по кривизне представлены в табл. 18.3.

Таблица 18.2. Расчетные случаи при регулировании продольного уклона

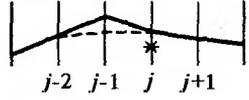
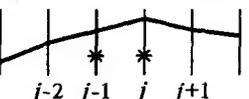
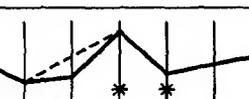
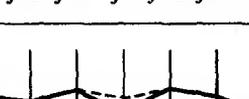
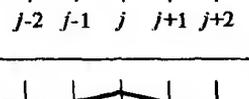
№ п/п	Схема	Индексы фиксированных ординат	Расчетные формулы
1		—	$Y_{j-1}^{(p+1)} = Y_{j-1}^{(p)} + \frac{1}{2} [K_j^{(p)} - \bar{K}_j \text{sign}(K_j^{(p)})]$ $Y_j^{(p+1)} = Y_j^{(p)} - \frac{1}{2} [K_j^{(p)} - \bar{K}_j \text{sign}(K_j^{(p)})]$
2		$j-1$	$Y_{j-1}^{(p+1)} = Y_{j-1}^{(p)}$ $Y_j^{(p+1)} = Y_j^{(p)} + \bar{K}_j \text{sign}(K_j^{(p)})$
3		j	$Y_{j-1}^{(p+1)} = Y_{j-1}^{(p)} - \bar{K}_j \text{sign}(K_j^{(p)})$ $Y_j^{(p+1)} = Y_j^{(p)}$
4		$j-1; j$	$Y_{j-1}^{(p+1)} = Y_{j-1}^{(p)}$ $Y_j^{(p+1)} = Y_j^{(p)}$
5		$j-1; j$	$Y_{j-1}^{(p+1)} = Y_{j-1}^{(p)}$ $Y_j^{(p+1)} = Y_j^{(p)}$ $Y_{j+1}^{(p+1)} = Y_{j+1}^{(p)} - \rho_i^{(p)} + \bar{\rho}_i \text{sign}(\rho_j^{(p)})$
6		$j, j+1$	$Y_{j-1}^{(p+1)} = Y_{j-1}^{(p)} - \rho_i^{(p)} + \bar{\rho}_i \text{sign}(\rho_j^{(p)})$ $Y_j^{(p+1)} = Y_j^{(p)}$ $Y_{j+1}^{(p+1)} = Y_{j+1}^{(p)}$
7		$j-1, j+1$	$Y_{j-1}^{(p+1)} = Y_{j-1}^{(p)}$ $Y_j^{(p+1)} = Y_j^{(p)} + \frac{1}{2} [\rho_i^{(p)} - \bar{\rho}_i \text{sign}(\rho_j^{(p)})]$ $Y_{j+1}^{(p+1)} = Y_{j+1}^{(p)}$
8		$j-1, j, j+1$	$Y_{j-1}^{(p+1)} = Y_{j-1}^{(p)}$ $Y_j^{(p+1)} = Y_j^{(p)}$ $Y_{j+1}^{(p+1)} = Y_{j+1}^{(p)}$

Таблица 18.3. Расчетные случаи при регулировании кривизны

№ п/п	Схема	Индексы фиксированных ординат	Расчетные формулы
1		—	$Y_{j-1}^{(p+1)} = Y_{j-1}^{(p)} - \frac{1}{3}[\rho_i^{(p)} - \bar{\rho}_i \text{sign}(\rho_j^{(p)})]$ $Y_j^{(p+1)} = Y_j^{(p)} + \frac{1}{3}[\rho_i^{(p)} - \bar{\rho}_i \text{sign}(\rho_j^{(p)})]$ $Y_{j+1}^{(p+1)} = Y_{j+1}^{(p)} - \frac{1}{3}[\rho_i^{(p)} - \bar{\rho}_i \text{sign}(\rho_j^{(p)})]$
2		$j - 1$	$Y_{j+1}^{(p+1)} = Y_{j-1}^{(p)}$ $Y_j^{(p+1)} = Y_j^{(p)} + \frac{2}{5}[\rho_i^{(p)} - \bar{\rho}_i \text{sign}(\rho_j^{(p)})]$ $Y_{j+1}^{(p+1)} = Y_{j+1}^{(p)} - \frac{1}{5}[\rho_i^{(p)} - \bar{\rho}_i \text{sign}(\rho_j^{(p)})]$
3		j	$Y_{j-1}^{(p+1)} = Y_{j-1}^{(p)} - \frac{1}{2}[\rho_i^{(p)} - \bar{\rho}_i \text{sign}(\rho_j^{(p)})]$ $Y_j^{(p+1)} = Y_j^{(p)}$ $Y_{j+1}^{(p+1)} = Y_{j+1}^{(p)} + \frac{1}{2}[\rho_i^{(p)} - \bar{\rho}_i \text{sign}(\rho_j^{(p)})]$
4		$j + 1$	$Y_{j-1}^{(p+1)} = Y_{j-1}^{(p)} - \frac{1}{5}[\rho_i^{(p)} - \bar{\rho}_i \text{sign}(\rho_j^{(p)})]$ $Y_j^{(p+1)} = Y_j^{(p)} + \frac{2}{5}[\rho_i^{(p)} - \bar{\rho}_i \text{sign}(\rho_j^{(p)})]$

Отличительные особенности метода «граничных итераций» от других методов оптимизации состоят в том, что в процессе поиска допустимого решения не производится прямого вычисления и сравнения функции цели — строительной стоимости. Все промежуточные состояния продольного профиля являются недопустимыми по техническим ограничениям, но каждое последующее состояние имеет невязку в ограничениях меньшую, чем предыдущее состояние. Первое допустимое по техническим ограничениям решение является оптимальным при условии единообразного очертания поперечного профиля и одинаковой стоимости единицы объема земляных работ по всей трассе.

На втором этапе автоматизированного проектирования продольного профиля осуществляется коррекция проектной линии, полученной на первом этапе, с учетом фактического очертания поперечных профилей земляного полотна и с учетом различных стоимостных

показателей возведения земляного полотна на различных участках проектируемой автомобильной дороги. Для этого в программе «Пола» использован эффективный эвристический метод коррекции проектной линии продольного профиля.

После определения предварительного положения проектной линии вычисляют рабочие отметки и соответствующие им стоимости каждого условного поперечника на единице длины трассы. Затем в зависимости от численного значения и знака рабочей отметки, параметров истинного поперечного профиля и фактической стоимости 1 м^3 грунта вычисляют скорректированную рабочую отметку при условии, что стоимость единицы длины истинного поперечника должна равняться стоимости единицы длины ранее найденного условного поперечника. Поскольку при этом могут быть нарушены некоторые ограничения, то в результате новой корректировки отыскивают линию, отвечающую условиям (18.4)—(18.7) и минимально отклоняющуюся от скорректированной из условия (18.3).

По результатам расчета на плоттере получают чертеж продольного профиля автомобильной дороги в виде, принятом при традиционном проектировании (рис. 18.6).

По полученному профилю производят распределение земляных масс, определяют действительную стоимость разработки грунта на различных участках трассы и получают уточненное положение проектной линии при повторном проектировании по программе «Пола».

18.8. Методы «свободной геометрии»

Основные положения методов «свободной геометрии» разработаны проф. В.Н. Бойковым и реализованы в системе автоматизированного проектирования «IndorCAD/Road».

При проектировании продольного профиля линейными сплайнами (см. § 18.7) проектная линия представляет собой дискретный аналог гибкой кривой переменного радиуса. Ограничения по кривизне в этом случае косвенно обеспечиваются ограничениями на алгебраическую разность уклонов двух смежных отрезков прямых. Необходимость проектирования продольного профиля в классе ломаных возникает чаще всего при ремонте и реконструкции автомобильных дорог, когда математическая модель проектной линии в виде последовательности прямых и дуг окружностей (квадратных парабол) оказывается недостаточно гибкой для получения приемлемого проектного решения. Особенно очевидным это становится при проектировании микропрофиля капитально ремонтируемых покрытий.

При автоматизированном проектировании описание проектной линии в классе ломаных требует определенной математической формализации. Наиболее просто и эффективно эта задача формализуется в терминах и математических построениях сплайн-функций 1-й степени.

С математической точки зрения, сплайн 1-й степени — это кусочно-непрерывная функция, на каждом отрезке описываемая уравнением вида:

$$y = a_i + b_i x, \quad (18.8)$$

где i — номер рассматриваемого интервала между узлами интерполяции x_i и x_{i+1} .

Как следует из уравнения (18.8), на элементарном интервале вид уравнения не отличается от общепринятого выражения прямой линии. В целом уравнение ломаной (сплайна 1-й степени) в матричной форме можно записать как:

$$S_1(x) = \begin{bmatrix} a_0 \\ a_1 \\ \dots \\ \dots \\ a_n \end{bmatrix} + \text{diag} \begin{bmatrix} b_0 \\ b_1 \\ \dots \\ \dots \\ b_n \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} x_{0-1} \\ x_{1-2} \\ \dots \\ \dots \\ x_{(n-1)-n} \end{bmatrix}. \quad (18.9)$$

Система линейных уравнений (18.9) не требует совместного решения и распадается на решения каждого уравнения в отдельности. Сплайн, решение которого связано с вычислением подсистем небольшой размерности (в данном случае — уравнений первого порядка), называют *локальным*.

Интерполяционный сплайн 1-й степени — это ломаная, проходящая через точки (x_i, y_i) . Для совокупности $x_i (i = 0, 1, \dots, n)$ в интервале $[a, b]$ при этом должно выполняться условие $x_i < x_{i+1}$. Используя интерполяционный полином Лагранжа, можно построить сплайн для интервала $i - (i + 1)$:

$$S_i(x) = y_i \frac{x_{i+1} - x}{x_{i+1} - x_i} + y_{i+1} \frac{x - x_i}{x_{i+1} - x_i}.$$

Обозначение $S_1(x)$ будем понимать как сплайн-функцию 1-й степени. Форму записи этой функции можно преобразовать к виду:

$$S_1(x) = y_i + \frac{y_{i+1} - y_i}{x_{i+1} - x_i} (x - x_i).$$

Для построения алгоритма и составления процедуры вычисления линейных сплайн-функций необходимо помнить всего лишь $(2n + 2)$ числа.

На основе интерполяционных сплайнов 1-й степени можно разрабатывать автоматизированные процедуры построения оптимальной проектной линии (см. § 18.7) и эвристической проектной линии, получаемой в диалоговом режиме, когда в основе проектного решения лежат интуиция и опыт инженера-проектировщика. Суть проектирования здесь состоит в том, что эскизно намечают ломаную проектную линию и посредством «ручного» перемещения узлов излома этой линии находят приемлемое ее положение с позиции проектировщика.

Другую перспективу открывают сглаживающие линейные сплайны, на основе которых можно строить алгоритмы нахождения оптимального положения ломаной проектной линии.

В случае применения сплайнов 1-й степени функционал цели имеет вид:

$$\int_a^b |S'(x)|^2 dx \Rightarrow \min.$$

После подстановки первой производной сплайна, совпадающей в данном случае с разделенной разностью, функционал примет вид:

$$P_1(S(x)) = \sum_{i=0}^{n-1} \frac{(S(x_{i+1}) - S(x_i))^2}{h_i}, \quad (18.10)$$

где $h_i = x_{i+1} - x_i$.

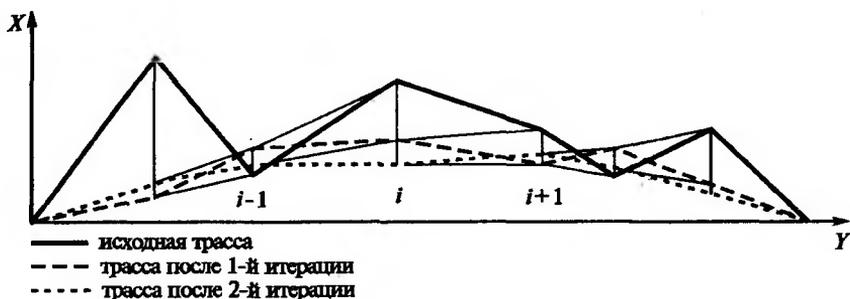
Если продифференцировать выражение (18.10) по переменной $S(x_i)$ и сложить два последовательных слагаемых уравнения, содержащих эту неизвестную, получим:

$$\frac{\partial}{\partial S(x_i)} P_1(S(x)) = \left(\frac{S^2(x_i) - 2S(x_{i-1})S(x_i) + S^2(x_{i-1})}{h_{i-1}} \right)',$$

$$\frac{\partial}{\partial S(x_i)} P_1(S(x)) = \left(\frac{S^2(x_{i+1}) - 2S(x_i)S(x_{i+1}) + S^2(x_i)}{h_i} \right)'$$

Приравняв полученную сумму нулю и выразив неизвестное $S(x_i)$, получим рекуррентную формулу:

$$S(x_i) = \frac{S(x_{i-1})h_i + S(x_{i+1})h_{i-1}}{h_i + h_{i-1}}.$$



Р и с. 18.7. Графическая интерпретация сглаживания линейного сплайна

Здесь знак « \Leftarrow » представляет собой оператор присваивания. Если принять шаг интерполяции равномерным, т.е. $h_i = \text{const}$, то процесс оптимизации (пошаговых итераций) в графической интерпретации будет вполне понятен (рис. 18.7).

Быстрая сходимость итерационного процесса позволяет рекомендовать этот метод для предварительной выработки проектных решений по проектной линии продольного профиля. В этом случае радиусы кривизны и уклоны проектной линии можно контролировать в системе ограничений посредством построения первых и вторых разделенных разностей.

Следует отметить, что методы «проекции градиента» и «граничных итераций», изложенные в § 18.6, 18.7, также реализованы посредством математической модели проектной линии в виде линейных сплайнов.

Более совершенные проектные решения по продольному профилю можно получить, если реализовывать проектную линию в виде функций (сплайнов) более высоких степеней, чем первая. Например, сплайны 3-й степени обладают свойством нелинейного изменения кривизны. Это свойство придает им высокую гибкость изменения формы, что чрезвычайно важно при выработке проектных решений в узкой полосе варьирования (в проектах капитального ремонта и реконструкции автомобильных дорог). К тому же 1-я и 2-я производные этих сплайнов непрерывны, что обеспечивает контроль за величинами радиусов кривизны вертикальных кривых и законами изменения кривизны по длине трассы и в конечном итоге высокую гладкость и плавность проектной линии.

Методы проектирования продольного профиля, основанные на применении сплайнов 3-й степени (кубических), используют для

описания проектной линии как интерполяционные, так и сглаживающие сплайны.

Сглаживающие сплайны необходимы для поиска оптимального положения проектной линии в заданной полосе варьирования. А интерполяционные сплайны позволяют обеспечить быстрый процесс корректировки проектной линии в интерактивном режиме работы инженера-проектировщика при эвристическом проектировании.

Для описания проектной линии на каждом интервале в виде интерполяционного кубического сплайна применяют или естественный сплайн вида:

$$Z_s = Z_i + B_i(S - S_i) + C_i(S - S_i)^2 + D_i(S - S_i)^3, \quad S_i \leq S \leq S_{i+1},$$

или рациональный сплайн вида:

$$Z_s = Z_i(1-t) + Z_{i+1}t + C_i \left[\frac{t^3}{1+p_i(1-t)} - t \right] + D_i \left[\frac{(1-t)^3}{1+q_it} - (1-t) \right],$$

где $t = (S - S_i)/h_i$, $h_i = S_{i+1} - S_i$, p_i, q_i — заданные числа, $-1 < p_i, q_i < \infty$.

Рациональный сплайн обладает свойствами изменения формы на любом интервале за счет варьирования величинами коэффициентов p_i, q_i , что дает возможность гибкого и точного приближения проектной линии к форме рельефа или существующим очертаниям реконструируемой (капитально ремонтируемой) автомобильной дороги.

Сглаживающие кубические сплайны, применяемые для оптимизации положения проектной линии, как правило, минимизируют функционал вида:

$$\int_a^b |S^{(q)}(x)|^2 dx + \sum_{i=0}^n \frac{1}{\rho_i} [S(x_i) - f_0(x_i)]^2 \Rightarrow \min.$$

Вычисления сглаживающих сплайнов 3-й степени осуществляют методами «покоординатного спуска» или «штрафных функций».

Современные системы автоматизированного проектирования автомобильных дорог содержат, как правило, алгоритмы построения проектных линий продольного профиля как на основе традиционного математического аппарата (прямые, круговые кривые, квадратные параболы), так и на основе сплайн-функций.

Глава 19

АРХИТЕКТУРНО-ЛАНДШАФТНОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ АВТОМОБИЛЬНЫХ ДОРОГ

19.1. Цели и задачи ландшафтного проектирования¹

Ландшафтным проектированием называют трассирование дорог на местности, обеспечивающее плавность сопряжения между собой элементов автомобильных дорог и гармоничное сопряжение полотна дорог с окружающим ландшафтом. При этом к элементам дорожного ландшафта относят формы рельефа местности, растительный покров, водные и заболоченные поверхности, а также возникшие в результате деятельности человека сельскохозяйственные угодья, лесные разработки, горные выработки, населенные пункты и промышленные предприятия. Цель ландшафтного проектирования — создание трассы, обеспечивающей высокие транспортно-эксплуатационные качества автомобильной дороги, удобство и безопасность движения, которая будет не утомительна при совершении поездок для водителей и пассажиров и способствует сохранению цельного и живописного ландшафта.

Современная автомобильная дорога является местом работы и отдыха многих тысяч людей и должна удовлетворять не только техническим, но и эстетическим требованиям. Установлено, что дорога с пространственно плавной трассой, хорошо сочетающаяся с ландшафтом, менее утомительна для водителей, обеспечивает меньший риск дорожно-транспортных происшествий и обеспечивает экономичность перевозок.

Ландшафтное проектирование автомобильных дорог в наибольшей степени обеспечивает возможность выполнения требований, вытекающих из принятых в РФ законов об охране природы и землепользовании. Оно дает возможность строить дороги, не только не нарушая сложившихся природных ландшафтов, но и способствовать их обогащению и повышению плодородности. Ландшафтное проектирование дорог может обеспечивать снижение строительной стоимости и приведенных затрат за счет уменьшения объемов строительных работ и снижения транспортно-эксплуатационных расходов. Для автомагистралей и автомобильных дорог I категории это достигается, в частности, ступенчатым расположением земляного полотна на косо-

¹ Глава 19 подготовлена с использованием материалов проф. В.Ф. Бабкова.

горных участках, для дорог более низких категорий — снижением рабочих отметок в результате плавного вписывания трассы дороги в конкретные формы рельефа.

Удовлетворение эстетическим критериям при ландшафтном проектировании не является самоцелью, оно способствует, прежде всего, наилучшему удовлетворению функциональных требований к дороге.

Однако необходимость соблюдения принципов ландшафтного проектирования не следует относить только к проектам новых дорог высших категорий. При интенсивной автомобилизации страны и быстром росте грузо- и пассажиропотоков на дорогах необходимо уже при проектировании новой дороги предвидеть пути ее последующей реконструкции. Опыт показывает, что полоса местности, прилегающая к дороге, быстро застраивается, засаживается ценными культурами, и даже минимальные последующие исправления трассы оказываются затруднительными или невозможными. Поэтому для дорог любых категорий соблюдение требований ландшафтного проектирования является обязательным.

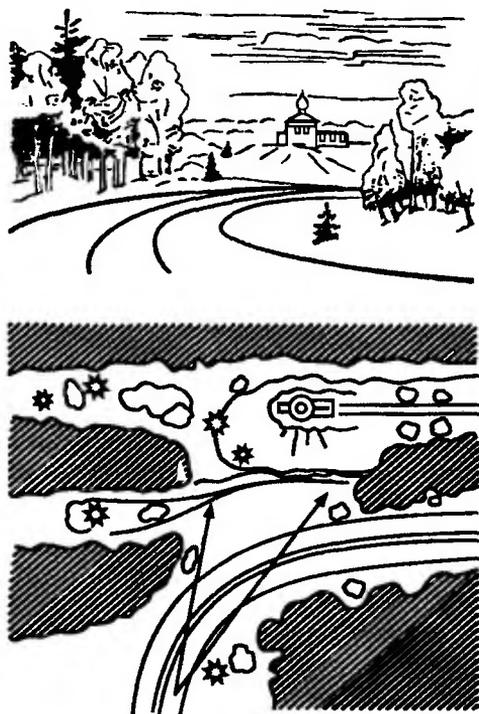
Ландшафтное проектирование автомобильных дорог включает в себя комплексное решение следующих задач:

соблюдение требований к плавному сочетанию между собой геометрических элементов трассы в целях обеспечения высоких уровней удобства и безопасности движения автомобилей с расчетными скоростями;

обеспечение «зрительного ориентирования» водителей — ясности в направлении дороги на достаточно больших расстояниях и даже за пределами фактической видимости, чтобы при движении водители не сталкивались с неожиданными для них изменениями дорожных условий, требующими резкого изменения скоростного режима. Видимые участки дороги и придорожной полосы должны заблаговременно подсказывать водителю дальнейшие изменения направления движения за пределами фактической видимости;

проложение трассы дороги и назначение ее геометрических элементов такими, чтобы у водителей не возникали зрительные искажения вида отдельных ее участков в перспективе и не создавались ошибочные впечатления о якобы резких изменениях направления впереди лежащих участков дороги;

обеспечение гармоничного вписывания полотна дороги в ландшафт местности для повышения комфортабельности движения, лучшего раскрытия перед его участниками красоты природы, устранения нарушений дорогой закономерностей сложившегося придорожного ландшафта, соблюдения требований охраны окружающей среды;



Р и с. 19.1. Расчистка леса для раскрытия вида на памятник архитектуры

сохранение исторических и культурных памятников, ценных сельскохозяйственных угодий, сведение к минимуму вредного воздействия дороги на окружающую среду;



Р и с. 19.2. Маскировка грунтового карьера посадкой деревьев:
а — придорожная полоса после постройки; *б* — после декоративных посадок

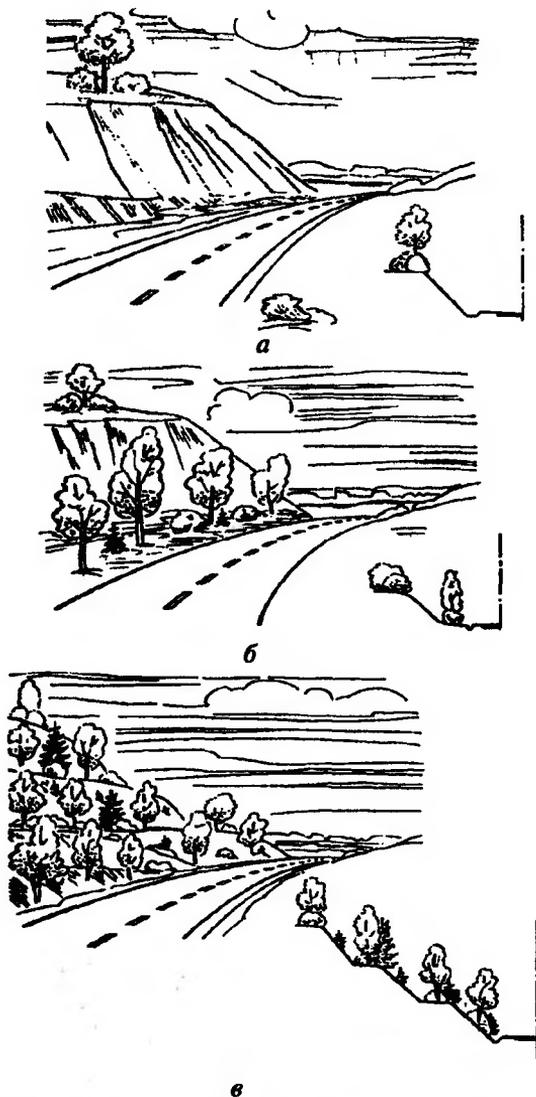


Рис. 19.3. Маскировка высокого обнаженного откоса посадкой высоких деревьев:
а — некрасивый обнаженный откос выемки; *б* — посадка вдоль дороги высокорослых деревьев;
в — уменьшение видимой высоты откоса с устройством на откосе нескольких берм

дополнение и улучшение природного ландшафта посадками деревьев и кустарников на придорожной полосе, планировочными и осушительными работами, созданием водоемов, раскрытием или маскировкой вида с дороги отдельных участков ландшафта. Для этой

цели на дорогах высоких категорий с большой долей легкового транспорта в транспортном потоке производят разреживание леса или срезку откосов выемок, закрывающих красивые виды (рис. 19.1), а также осуществляют маскировку растительными посадками некрасивых выработок или больших обнаженных откосов (рис. 19.2, 19.3).

Первые три задачи ландшафтного проектирования направлены на обеспечение плавности и психологической ясности дороги для водителей («внутренняя гармоничность трассы»).

Две последующие задачи преследуют цель согласования полотна дороги с придорожной полосой («внешняя гармоничность трассы»).

При решении всех этих задач выполняют обязательное соблюдение требований действующих нормативных документов.

Ведущим в процессе ландшафтного проектирования автомобильных дорог является инженер-дорожник — главный инженер проекта. При оценке возможных вариантов трассы и корректировке проектных решений отдельных ее участков желательно также участие архитектора, для оценки вариантов с точки зрения удовлетворения ими эстетическим критериям и дающего советы в отношении осуществления лучшей увязки полотна дороги с ландшафтом и архитектурной композицией придорожной полосы. При этом дорогу со всеми ее элементами (трасса, искусственные сооружения, придорожные постройки, обстановка дороги, снегозащитные и декоративные посадки) необходимо рассматриваться как единый архитектурный ансамбль, обладающий определенным единством.

Попытки улучшения неудачно запроектированной дороги средствами ландшафтной архитектуры, в первую очередь маскирующими декоративными посадками, обычно обречены на неудачу и сводятся к украшательству.

19.2. Согласование элементов трассы с ландшафтом

Согласование дороги с ландшафтом основывается на закономерностях сочетания элементов ландшафта. Трасса дороги должна соответствовать изменениям общего ритма взаимного расположения элементов рельефа, сглаживать их в соответствии с требованиями пространственной плавности и ясности трассы. Трасса в пространстве должна представлять плавную кривую с отсутствием резких изгибов и переломов, нарушающих ее общий ритм. Она может состоять из сочетающихся прямых, круговых и переходных кривых с закономерной изменяющейся кривизной или быть пространственной кривой с непрерывно меняющейся кривизной, участки которой описываются двух- или трехмерными сплайнами.

При следовании вдоль водотоков или по берегам больших водоемов трассу удаляют примерно на одинаковое расстояние от водного зеркала, пересекая узкие заливы мостами или насыпями. В некоторых случаях осью ландшафта, в непосредственной близости от которой трассируют автомобильную дорогу, могут быть другие линейные инженерные сооружения: мелиоративные, ирригационные и судоходные каналы, железные дороги, линии электропередач и т.д.

Идея согласования дороги с ландшафтом отнюдь не означает полного ее подчинения формам рельефа или элементам ситуации. В каждом ландшафте есть основные, характеризующие его элементы, на которые и следует ориентироваться при трассировании дороги. Автомобильная дорога должна следовать крупным формам рельефа, не считаясь с множеством малых и мельчайших складок местности или извилин границ леса. Степень согласования дороги и ландшафта во многом определяется значением и категорией дороги.

Чем выше категория дороги, тем более строгие требования к согласованию должны предъявляться. В отдельных случаях, например в курортных районах и в заповедниках, трассирование дороги может быть полностью подчинено задаче внезапного раскрытия перед участниками движения красивых видов и при этом могут даже предусматриваться специально размещаемые с этой целью смотровые площадки.

В список многочисленных задач дорожного озеленения входит и использование древесных и кустарниковых посадок как средства согласования дороги с ландшафтом, его украшения и дополнения. Тщательно подобранные совместно со специалистом-озеленителем древесно-кустарниковые посадки позволяют:

закрывать вид с дороги на некрасивые или неудачные места придорожного ландшафта или сооружения самой дороги: выработанные придорожные карьеры, обнаженные откосы выемок на покрытых растительностью склонах холмов, насыпи подходов к пересекающим дорогу путепроводам, складские территории вблизи границ полосы отвода и т.д.;

устранять монотонные и однообразные виды длинных прямых участков в лесных районах путем посадки декоративных групп деревьев и расчистки границ просек;

создавать в однообразной степной местности на придорожной полосе отдельные декоративные группы кустарников и деревьев, привлекающие и активизирующие внимание водителей;

на подъездах к городам и курортным поселкам подчеркивать приближение к цели путешествия, а в некоторых случаях и создавать на-

строение торжественности, используя для этих целей посадки аллей из высоких деревьев на прямых участках автомобильных дорог; создавать зрительные ориентиры в виде «барьерных» посадок, показывающих водителям предстоящие изменения направления трассы и крутизну поворота за пределами фактической видимости, «обозначающих» посадок, указывающих в степных районах места пересечений и примыканий второстепенных дорог в одном уровне и т.д.

19.3. Особенности трассирования автомобильных дорог в характерных ландшафтах

Из всего многообразия факторов (как природных, так и возникших в результате деятельности человека), которые определяют современные географические ландшафты, необходимо выделить, прежде всего, высотные и плановые препятствия, между которыми должна быть уложена трасса автомобильной дороги. Выделяемые далее типичные ландшафты могут встречаться в различных географических зонах, что придает общность описываемым приемам трассирования.

Выделяют следующие основные типы характерных ландшафтов, идентичные по принципам трассирования автомобильных дорог: равнинные (степной, низменный заболоченный, лесисто-болотистый); холмистые (пересеченная лесостепь, сильно холмистый, моренный ландшафт, ландшафт речных долин); горные (предгорья, морские побережья, долины горных рек, высокогорные перевальные участки).

В *степных районах* рельеф и ситуация местности обычно не вносят существенных ограничений при трассировании автомобильных дорог как в плане, так и в продольном профиле. В этих районах, как правило, отсутствуют какие-либо серьезные препятствия при трассировании дорог длинными прямыми, протяженностью иногда до нескольких десятков километров. Однако движение по длинным прямым в открытой однообразной равнинной местности для водителей сопряжено с повышенной утомляемостью, снижением внимательности, а в отдельных случаях даже с впадением в дремотное состояние. Водители нередко теряют контроль над скоростью движения. В ночное время на длинных прямых участках дорог повышается опасность ослепления водителей светом фар встречных автомобилей. Все это приводит к увеличению числа дорожно-транспортных происшествий на длинных прямых участках автомобильных дорог.

Предельную длину прямых в плане ограничивают согласно табл. 19.1. Необходимо также ограничивать суммарную длину прямых, сопрягаемых короткими кривыми в плане. Если длина кривой в

плане менее 300 м, суммарная длина двух сопрягаемых ею прямых также не должна превышать величин, указанных в табл. 19.1, более чем на 20%.

Т а б л и ц а 19.1. Предельные длины прямых в плане

Категория дороги	Предельная длина прямой в плане, на местности, м	
	равнинной	пересеченной
Автомобильные дороги I категории	3500—5000	2000—3000
Автомобильные дороги II и III категорий	2000—3500	1500—2000

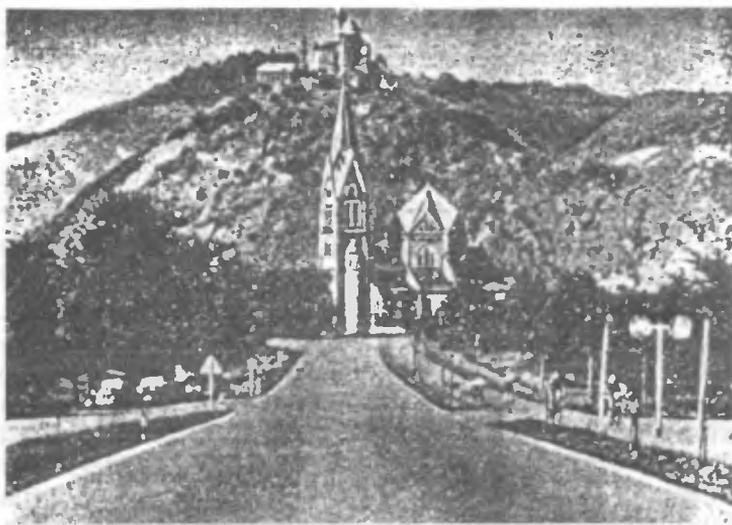
П р и м е ч а н и е. Большие длины прямых применяют при наличии в транспортном потоке грузового движения менее 30%, меньшие — при грузовом движении более 30%.

Установлено, что длины прямых не должны превышать расстояний, проходимых автомобилями с расчетной скоростью за 3—4 мин, и составлять не более длин, рекомендуемых табл. 19.1.

Выполнение этих требований, как правило, не требует искусственного искривления трассы, так как при детальном изучении микрорельефа равнинной местности обычно всегда обнаруживается достаточно много причин, делающих обоснованным искривление трассы (участки поверхностного заболачивания и пятен избыточного засоления, места с необеспеченным стоком поверхностных вод, лесные массивы и рощи в степных районах, мелкие элементы рельефа, не находящие отражения на топографических картах, но влияющие на условия поверхностного водоотвода, ценные сельскохозяйственные угодья, населенные пункты, понижения местности, над которыми в безветренные летние ночи образуются туманы, ограничивающие видимость, и т.д.).

Допустимая длина прямых участков трассы связана также с окружающей местностью. Всякие выделяющиеся элементы местности привлекают к себе внимание водителей и способствуют повышению их сосредоточенности. В связи с этим всегда оправдывает себя направление дороги на хорошо заметные издали ориентиры—«доминанты»: выделяющиеся на общем фоне местности горы, высокие здания и заводские сооружения, шахтные терриконы, соборы и церкви (рис. 19.4).

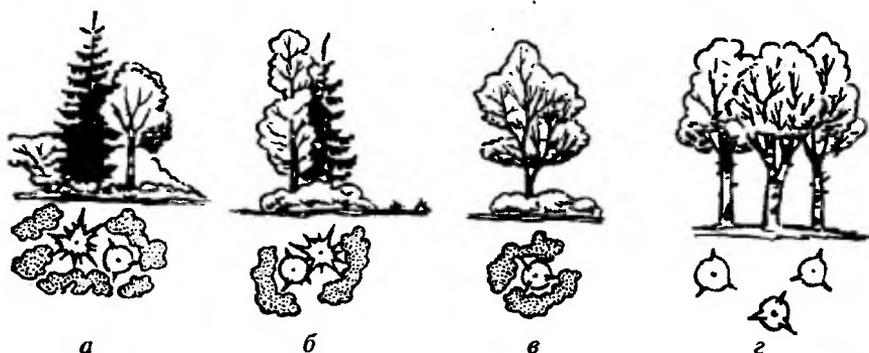
При отсутствии на местности естественных ориентиров их создают искусственно в виде декоративных групп деревьев на придорожной полосе (рис. 19.5) или в виде памятников и обелисков, указываю-



Р и с. 19.4. Трассирование дороги на «доминанту». Видно дальнейшее сооружение, расположенное на горе; вблизи доминирующее влияние оказывает нижнее, свидетельствующее о повороте дороги

щих на расположенные в стороне от дороги достопримечательности местности.

Радиусы смежных кривых в плане должны различаться не более чем в 1,3 раза. Параметры смежных переходных кривых при сопряжении кривых в плане разных знаков рекомендуется назначать одинаковыми.



Р и с. 19.5. Примеры групповых декоративных придорожных насаждений:

a — из двух деревьев и высокого кустарника; *б* — из двух деревьев и низкого кустарника; *в* — из одного дерева; *г* — из нескольких деревьев без посадки кустарника

При малых углах поворота (менее 7°) радиусы кривых в плане рекомендуется назначать в зависимости от величины угла поворота по табл. 19.2.

Т а б л и ц а 19.2. Наименьшие радиусы кривых в плане при малых углах поворота трассы

Угол поворота, град	1	2	3	4	5	6	7
Наименьший радиус круговой кривой, м	30 000	20 000	10 000	6000	5000	3000	2500

Рекомендуется избегать коротких прямых вставок между кривыми в плане одного знака. При длине прямой менее 100 м рекомендуется заменять смежные кривые одной кривой большего радиуса, при длине прямой вставки от 100 до 300 м последнюю целесообразно заменять переходными кривыми соответствующей суммарной длины.

Глубокие долины малых рек и широкие балки нецелесообразно пересекать длинными прямыми, так как затяжные спуски, в которых глубокие выемки, переходят в нижней части спуска в высокие насыпи, характеризующиеся повышенной аварийностью.

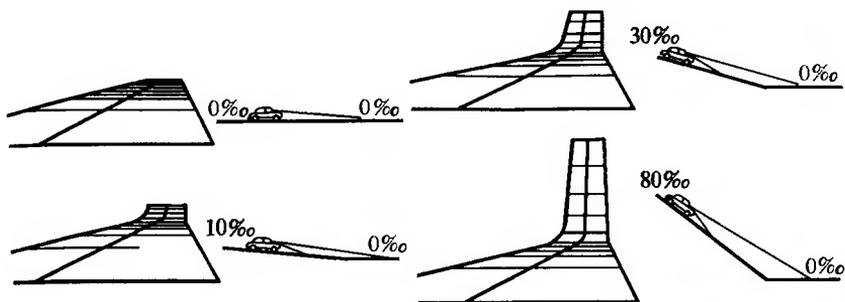
Опасными являются участки перехода из выемок в насыпи и на съездах с мостов со сплошными перильными ограждениями, на которых на автомобили нередко возможны внезапные воздействия боковой ветровой нагрузки.

Желательность искривления плана дороги на крутых подъемах после пересечения долин связана также с возникающим в этих случаях зрительным обманом. Взгляд водителя направлен при движении в направлении спуска в долину параллельно проезжей части, поэтому последующий подъем представляется ему значительно более крутым, чем есть на самом деле. У водителей создается иллюзия, что он движется по горизонтальному участку, а впереди ожидается подъем с крутизной, равной сумме фактических уклонов, подъема и спуска (рис. 19.6).

В ряде случаев это приводит к тому, что в нижней части склонов водители развивают опасно высокие скорости с намерением форсировать кажущиеся крутые подъемы с помощью инерции.

Местные дороги пересекают магистрали по путепроводам с высокими насыпями на подходах. Желательно в таких случаях маскировать эти насыпи декоративными посадками, расположенными у подошвы насыпи (рис. 19.7).

Ландшафты осваиваемых заболоченных низменностей и орошаемых районов характеризует ярко выраженная созидательная деятельность



Р и с. 19.6. Кажущееся увеличение продольного уклона при спуске по прямым участкам дороги разной крутизны

человека, превращающего системой ирригационных и мелиоративных каналов ранее заболоченные или пустынные территории в плодородные сельскохозяйственные угодья.

Соображения экономии производства строительных работ и обеспечение лучшей организации сельскохозяйственного производ-



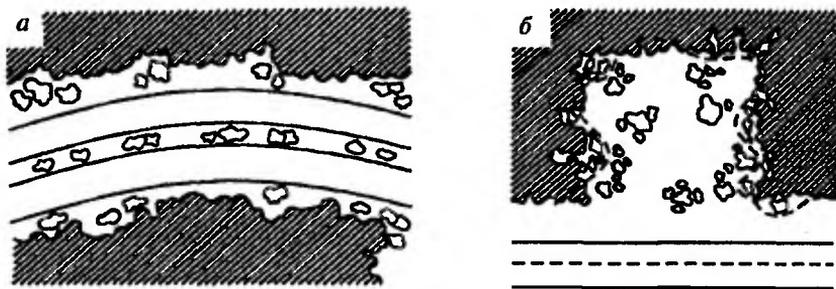
Р и с. 19.7. Маскировка высокой насыпи в равнинной местности на подходах к пересечению в разных уровнях

ства в большинстве случаев определяют трассирование дорог, по возможности в непосредственной близости и параллельно направлению каналов, хотя это заметно ухудшает водно-тепловой режим земляного полотна автомобильных дорог. На вновь осваиваемых территориях это требует совместного решения дорожных и ирригационно-мелиоративных проблем. Дороги высших категорий трассируют в соответствии с требованиями экономичности перевозок, пересекая каналы.

Трассы местных дорог подчиняют ирригационно-мелиоративной сети. Они состоят из прямых участков, обычно окаймленных рядами деревьев и сопряженных кривыми минимальных радиусов. Плоский характер местности и неблагоприятные гидрогеологические условия в связи с высокими уровнями грунтовых вод обуславливают расположение дорог в невысоких насыпях.

В *лесисто-болотистых и лесных районах в равнинной и слабо холмистой местности* автомобильные дороги трассируют по длинным однообразным лесным просекам. Обязательными мерами устранения однообразности и монотонности вида дороги являются посадки по краям просек декоративных растительных групп, отличающихся цветом листвы от основного фона леса. Впечатление прямолинейности коридора может быть исключено посредством посадки выступающих групп деревьев или вырубкой, по договоренности с органами управления лесным хозяйством, в основном лесном массиве углублений — «бухт» (рис. 19.8).

Ландшафт лесостепи характеризуется наличием развитых малых форм рельефа и частых долин постоянных и временных водотоков: рек, заросших балок и действующих оврагов. Леса в этой зоне расположены своеобразными островами, представляющими в связи с их



Р и с. 19.8. Устранение прямолинейных краев просеки и исправление прямолинейных границ вырубки:

а — устройство местных уширений и посадка деревьев; *б* — улучшение придорожной поляны приданием ее контурам неправильной формы подсадкой деревьев и кустарников

относительно малыми площадями значительную ценность. Поскольку элементы рельефа не создают существенных препятствий для трассирования, за редким исключением дороги трассируют с соблюдением допустимых продольных уклонов, не затрагивая лесных массивов.

Наиболее целесообразным является трассирование дорог вдоль опушек лесных массивов, что не мешает сельскому хозяйству, так как не вызывает необходимости перепланирования полей и не отрезает от них узких полос, дальнейшее использование которых в сельскохозяйственном обороте становится затруднительным в связи с невозможностью их механизированной обработки.

В южных районах целесообразно обходить даже небольшие рощи. При необходимости их пересечения нельзя делить лес прямой сквозной просеккой на зрительно изолированные друг от друга части. Дорога должна входить в лес на закруглении (рис. 19.9).

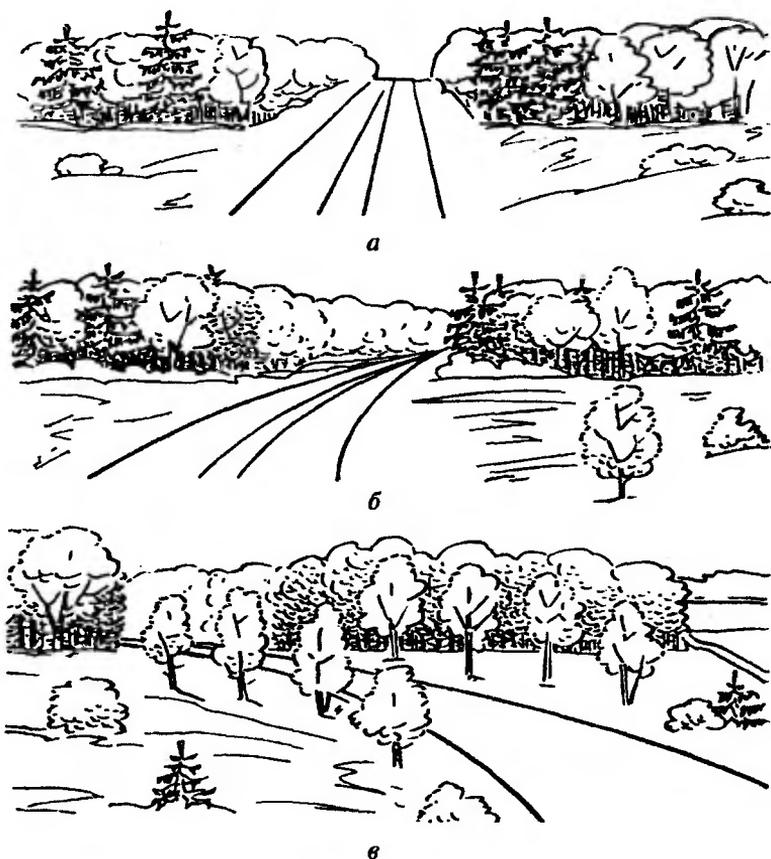
При неизбежности прохода дороги через небольшие рощи прямыми участками некрасиво выглядят как пересечение их точно посередине, так и асимметрично, так как отрезаются узкие полоски леса.

Чтобы предотвратить заносы дорог снегом, переносимом вдоль опушек леса, отклоняющих общее направление ветрового потока, на участках автомобильных дорог, которые прилегают к лесу, располагают групповые посадки деревьев и кустарников. По мере приближения к лесу эти посадки должны становиться все более густыми и увеличивающимися по высоте. Их назначение состоит в смягчении перехода от открытого пространства к узкой лесной просеке и плавном изменении боковой ветровой нагрузки на автомобиль.

В южной части лесостепной и степной зон большое значение приобретает сохранение не только существующих лесов, но даже отдельных групп деревьев. В большинстве случаев бывает достаточно незначительного смещения трассы в сторону для сохранения красивой группы деревьев. При реконструкции дорог необходимо стремиться к использованию существующих придорожных насаждений.

Холмистый ландшафт складывается из более развитых элементов рельефа. Для сокращения объемов земляных работ рекомендуется осуществлять трассирование в виде кривых преимущественно больших радиусов с вписыванием их в элементы ситуации и рельефа с обязательным прохождением между крупными элементами ландшафта.

Основная трудность трассирования дорог в холмистой местности заключается в выявлении основных форм рельефа, с которыми должна быть увязана трасса без подчинения мелким второстепенным элементам. Чем выше категория дороги и шире земляное полотно, тем с



Р и с. 19.9. Особенности трассирования автомобильных дорог на участках входа в лес:

а — прямолинейное пересечение леса; *б* — вход в лес на кривой; *в* — посадка деревьев и кустарников на входных участках

более крупными элементами рельефа должна увязываться трасса. Это обусловлено тем, что для обеспечения плавности широкого земляного полотна требуется вводить кривые больших радиусов, чем при узком земляном полотне. Влияние пересекаемых дорогой небольших впадин и отрогов холмов обычно уничтожается планировочными работами и плавным сопряжением земляного полотна с прилегающей местностью.

Дорога в холмистой местности в результате сочетания подъемов и спусков с кривыми в плане обычно открыта для обзора на значительном протяжении, особенно на спусках с водоразделов. Непродуман-

ное сочетание элементов плана и продольного профиля с элементами ландшафта в этом случае особенно резко бросается в глаза.

В условиях холмистого ландшафта наиболее целесообразным является проектирование трассы в плане сопрягающимися кривыми с введением переходных кривых большой длины и с большими параметрами, типа клотоид и сплайнов.

При сильно извилистых трассах на местности с пересеченным рельефом иногда бывает трудно обеспечить видимость дороги на большом расстоянии. В таких случаях целесообразно предусматривать обгонные участки с увеличенными расстояниями видимости, располагаемые на прямых или кривых в плане больших радиусов. Длины этих участков в зависимости от категории дороги должны быть не менее утроенного расстояния видимости встречного автомобиля.

К прямым участкам следует относить в данном случае и так называемые «квазипрямые» — конечные участки переходных кривых, в пределах которых ось дороги отклоняется от действительно прямого направления не более чем на 1 м.

В горной местности высотные элементы ландшафта преобладают настолько, что любое неподчинение им дороги сопряжено с резким увеличением сметной стоимости строительства. Согласование с ландшафтом для горных дорог сводится к огибанию элементов горного рельефа с отклонением от них на минимальное расстояние, необходимое для соблюдения требований к элементам плана и продольного профиля в трудных условиях рельефа.

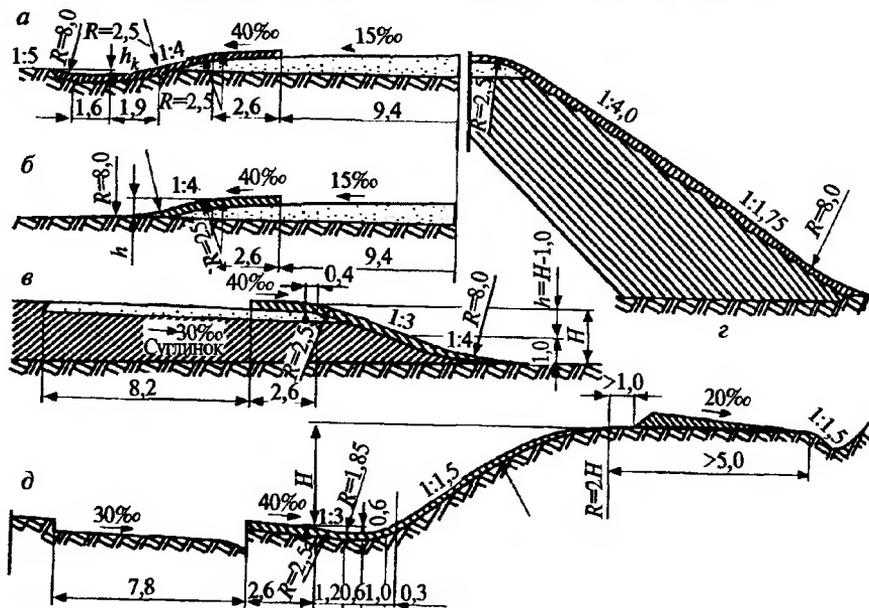
При обеспечении достаточно высоких технических нормативов для автомагистралей геометрическая правильность их очертания приобретает решающую роль в формировании нового ландшафта горной местности. Дорога становится господствующим и организующим элементом крутых склонов горного ландшафта, не затронутого деятельностью людей. Монументальные инженерные сооружения — серпантины, подпорные стенки, мосты, балконы, тоннели, противолавинные и противоселевые галереи, выделяясь на однообразной поверхности горных склонов, сосредоточивают внимание и определяют характер ландшафта. В данном случае гармоничное сочетание дороги с ландшафтом достигается контрастностью между геометрически правильными элементами дороги и хаотичностью горного ландшафта.

В согласовании дорог с ландшафтом в горной и сильно пересеченной местности существенное значение приобретает оформление откосов и обнажений склонов, получившихся при устройстве земляного полотна на полках косогоры. Средством маскировки обнажений могут быть посадки кустарника и ползучих растений в грунт, которым заполняют выдолбленные в откосе карманы.

19.4. Согласование земляного полотна с ландшафтом

Одним из главных принципов увязки дороги с ландшафтом является условие, чтобы дорога не выделялась резко на общем фоне местности. Поэтому целесообразен поперечный профиль земляного полотна с пологими, округленными очертаниями откосов, плавно переходящими в поверхность прилегающих элементов рельефа (рис. 19.10).

Пологие обтекаемые откосы имеют следующие преимущества по сравнению с обычно применяемыми откосами постоянной крутизны: обеспечивают безопасность движения, поскольку при отсутствии боковых канав автомобиль, потерявший управление, имеет возможность съехать по пологому откосу с насыпи на прилегающую местность; возрастает уверенность водителя в управлении автомобилем, так как он видит весь откос, а не только бровку земляного полотна, закрывающую от него вид на откос насыпи; обеспечивается лучшее обтекание земляного полотна снеговетровым потоком и снег переносится через дорогу, не откладываясь на проезжей части.



Р и с. 19.10. Обтекаемые поперечные профили земляного полотна:

а — невысокая насыпь с лотком вместо боковой канавы; *б* — невысокая насыпь с пологими откосами; *в* — насыпь высотой до 2 м; *г* — высокая насыпь с откосами переменной крутизны; *д* — выемка с лотками и округленными кромками откосов

При индивидуальном проектировании земляного полотна, например в парковых зонах, мелкие выемки и невысокие насыпи обязательно устраивают с пологими откосами. Коэффициент заложения откосов принимают тем большим, чем ниже насыпь. У невысоких насыпей откосам придают заложение 1:4—1:6. Высокие насыпи устраивают или с постоянным по высоте заложением откосов, или даже делают откосы ломаными с крутизной, уменьшающейся сверху вниз. Откосы выемок чаще всего устраивают с откосами постоянной крутизны.

Большое внимание уделяют сопряжению земляного полотна с прилегающей местностью, добиваясь их плавного слияния. Для этого верхнюю часть откосов выемок и подошву насыпей плавно сопрягают с прилегающей поверхностью грунта по круговым кривым малого радиуса, обычно принимаемого равным одной-двум величинам рабочих отметок.

При сильно пересеченном рельефе местности для лучшего вписывания дороги в ландшафт крутизну откосов выемок и насыпей следует изменять как по высоте, так и по протяжению дороги в зависимости от значения рабочих отметок. Для наилучшего сочетания форм земляного полотна с ландшафтом необходимо:

устанавливать более пологие откосы, меньше чем рабочие отметки насыпей и выемок. Наиболее просто достигнуть этого, приняв постоянный размер подошвы откоса, соответствующий крутизне откоса 1:1,5 в месте наибольшей глубины выемки;

наряду с округлением кромок земляного полотна использовать плавные формы перехода элементов земляного полотна в окружающие элементы местности, например, заполняя пазухи с верхних сторон насыпей на косогорах или срезая бугры, образующиеся в выемках на косогорах у низовых сторон откосов;

на участках перехода из выемок в насыпи устанавливать очень пологие откосы с заложением от 1:7 до 1:12, что способствует уменьшению заносимости дороги снегом;

в местах, где дорога пересекается путепроводами, прилегающим участкам земляного полотна придавать геометрически правильные очертания, плавно переходящие через 20—40 м в обтекаемые поперечные профили;

при длинных выемках примерно постоянной глубины, которые приходится устраивать с откосами постоянного заложения, для расчленения однообразного вида откосов использовать посадку декоративных групп деревьев и кустарников;

избыточный грунт, получаемый при разработке выемок, в первую очередь использовать для засыпки пониженных мест рельефа с одно-

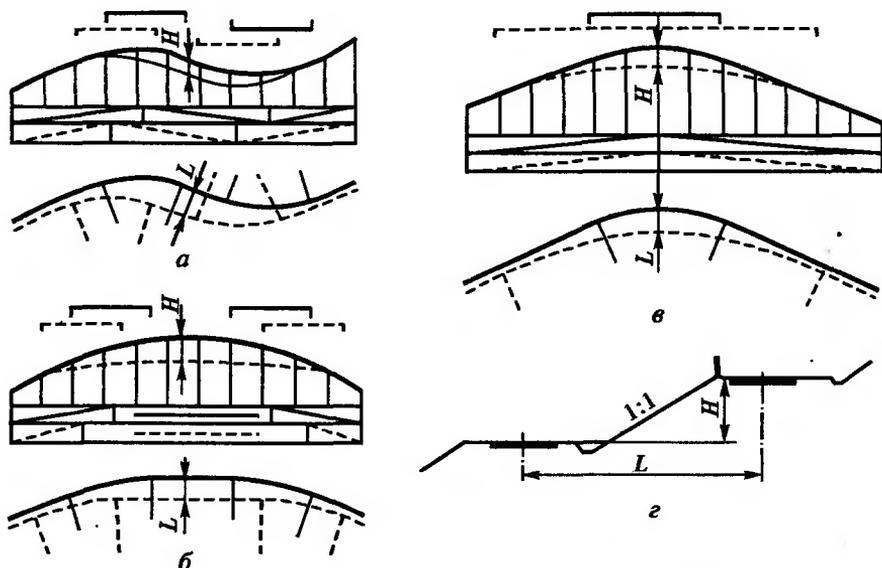


Рис. 19.11. Способы перехода от обычного расположения проезжей части к ступенчатому на автомагистралях с разделительной полосой:

а, б, в — продольные профили и планы трассы; *г* — поперечный профиль

временной рекультивацией для последующей передачи землепользователям, а при невозможности этого — отсыпать вблизи дороги отвалы, оформляемые на основе проектов, разработанных ландшафтным архитектором;

применять раздельное трассирование проезжих частей автомагистралей на косогорных участках, поскольку трассирование по склонам в сильно пересеченной местности автомагистралей с разделительной полосой требует выполнения значительных объемов земляных работ для размещения широкого земляного полотна на полке или в полувыемке-полунасыпи. При этом дорога начинает резко выделяться на местности, ухудшая вид ландшафта большими обнаженными поверхностями откосов. Особенно заметно это бывает на склонах, покрытых лесом. Более экономичное решение достигается при раздельном трассировании с расположением проезжих частей уступами на разных уровнях, что эффективно уже при разностях высот проезжих частей более 0,1 м. Переход от общей трассы к участкам ступенчатого, раздельного трассирования допускается только на участках кривых в плане (рис. 19.11).

При этом не должна нарушаться плавность трассы обоих направлений и каждая из проезжих частей должна удовлетворять нормати-

вам плана и продольного профиля, принятым для автомагистрали в целом.

В сложных условиях рельефа также применяют самостоятельное трассирование обеих проезжих частей. В этом случае ведут трассирование как бы двух параллельных дорог, по каждой из которых происходит одностороннее движение в соответствующих направлениях. Сложным является в данном случае обеспечение впечатления единой дороги. Для этого проезжие части должны периодически сближаться.

19.5. Правила обеспечения зрительной плавности и ясности трассы

Основные требования, которым должна удовлетворять трасса дороги в пространстве, сводятся к следующему:

ритмичность изменения размеров элементов трассы («внутренняя гармония трассы») — закономерность чередования и изменения элементов трассы (длин, углов поворота, радиусов кривых);

согласованность с окружающим ландшафтом («внешняя гармония трассы») — соответствие элементов дороги элементам рельефа и ситуации;

зрительная плавность трассы — отсутствие искажений вида дороги в перспективе, создающих у водителей ошибочное впечатление о необходимости в дальнейшем резкого изменения режима движения;

психологическая ясность трассы — создание придорожной обстановкой и озеленением уверенности у водителей в части дальнейшего направления дороги за пределами фактической видимости, что позволяет прогнозировать ожидаемые изменения режимов движения.

Для выполнения этих требований необходимо обеспечение движения по дороге практически с постоянными скоростями, исключив необходимость частых торможений и последующих разгонов. Водители должны быть ориентированы в направлении дороги и в дорожной обстановке на расстояниях, существенно превышающих нормативное расстояние видимости, что обеспечивает возможность уверенного управления автомобилем.

При проектировании необходимо исключать зрительные искажения вида впереди лежащих участков дороги, связанные с тем, что водители воспринимают их в перспективе под малым углом зрения, причем оптическая ось глаза направлена не по горизонтали, как в обычных условиях, а параллельно уклону того участка дороги, на котором автомобиль в данный момент находится. В результате изменения вида дороги в перспективе криволинейные участки трассы пред-

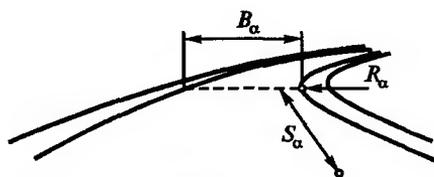


Рис. 19.12. Характеристики изображения в картинной плоскости, определяющие зрительную плавность дороги

ставляются водителям деформированными, длины кривых уменьшенными, а крутизна поворотов значительно возросшей. Углы поворота в несколько градусов, искажаясь в перспективе, кажутся поворотом в 15—20° и более. Короткая кривая между длинными прямыми воспринимается как крутой изгиб дороги, а сравнительно пологие поднимающиеся участки за длинными спусками — как крутые подъемы. Эти особенности восприятия отражаются на избираемых водителями режимах движения, как правило, более напряженных, чем позволяют фактические дорожные условия (рис. 19.12).

По предложению проф. Е.М. Лобанова, за критерий зрительной плавности принимают изменение кривизны линий, образующих изображение дороги на картинной плоскости, на которую как бы проецируется дорога при взгляде водителя. Из контурных линий, определяющих вид дороги, наиболее характерной является внутренняя кромка дороги — «ведущая линия» (см. рис. 19.12), математической характеристикой изображения которой является видимый радиус R_α в точке с наибольшей видимой кривизной (в «экстремальной точке»).

$$R_\alpha = \frac{R h_b^2}{S_\alpha^3} K,$$

где R — радиус кривой в плане, м; h_b — высота глаза водителя над поверхностью проезжей части, м; S_α — расстояние от водителя до экстремальной точки, м; $K = \frac{10^3}{2,91}$ — коэффициент перехода к градусным единицам измерения.

Вид дороги считается зрительно плавным при соблюдении условия:

$$B_\alpha < 1,6\sqrt{R_\alpha - 1}, \quad (19.1)$$

где $B_\alpha = \frac{B_{пч}}{0,18}$ — видимая ширина проезжей части, м; $B_{пч}$ — фактическая ширина проезжей части, м.

По мере сокращения расстояния от автомобиля до критической точки зрительная плавность дороги возрастает. Желательно, чтобы

она была обеспечена при взгляде с границ ландшафтного бассейна и, во всяком случае, на расстоянии, не меньшем расстояния видимости из условия обгона.

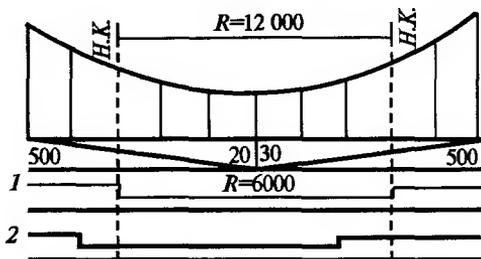
Трассу автомобильной дороги следует рассматривать как плавную пространственную линию. Недопустимо проектировать план, продольный профиль и поперечные профили земляного полотна независимо друг от друга, без учета их взаимного влияния, создаваемых ими условий движения и зрительного восприятия дороги. Рациональное сочетание элементов дорог в плане и продольном профиле всегда подразумевает определенное соотношение вертикальных и горизонтальных проекций плавной пространственной линии. Плавность трассы должна быть обеспечена в пределах видимых водителем участков местности («ландшафтных бассейнов»), на которые ее расчленяют естественные препятствия — элементы рельефа и ситуации.

Следует избегать использования предельно допустимых норм на элементы плана и продольного профиля (минимальные радиусы кривых в плане и продольном профиле, максимальные продольные уклоны). Необходимо применять максимально возможные по местным условиям и не вызывающие чрезмерного удорожания строительства радиусы кривых в плане и профиле, желательно не меньше указанных в СНиП 2.05.02—85*. Наибольшую плавность в продольном профиле обеспечивают при проектировании его из вогнутых и выпуклых кривых, непосредственно сопрягая их друг с другом без промежуточных прямых вставок, либо в виде непрерывной линии переменного радиуса (см. § 18.7).

Чем меньше разность смежных уклонов, тем большими должны быть радиусы вертикальных кривых.

Обертывающая проектная линия, точно следующая очертанию форм поверхности земли, нерациональна, так как это часто приводит к получению участков с недостаточной видимостью или неприятной для взгляда водителей волнистой поверхностью. В то же время длинные участки, запроектированные с постоянными продольными уклонами, нерациональны даже при слабо пересеченном рельефе, поскольку их устройство связано с необходимостью строительства высоких насыпей и глубоких выемок.

Наибольшая плавность трассы бывает обеспеченной при совпадении вертикальных и горизонтальных кривых. Желательно, чтобы длина горизонтальной кривой превышала длину выпуклой вертикальной кривой, а радиус выпуклой кривой превышал радиус кривой в плане не менее чем в 8 раз. Несовпадение вершин кривых допустимы не более чем на $1/4$ длины наименьшей из них. Взаимное смеще-



Р и с. 19.13. Сочетание кривых в плане с вогнутыми вертикальными кривыми:

1 — рекомендуемое; 2 — допустимое

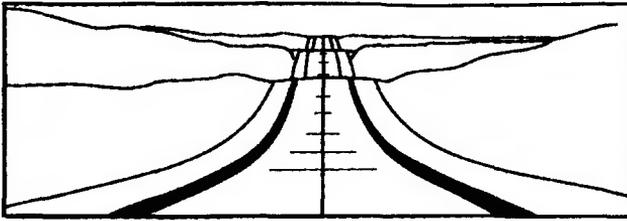
ние вершин горизонтальных и вогнутых вертикальных кривых допустимо только в исключительных случаях, но при этом поворот влево следует разбивать перед вогнутостью продольного профиля, а поворот вправо — за ней (рис. 19.13).

Вогнутые кривые на прямых участках допустимы, если сумма продольных уклонов тангенсов вертикальных кривых не превышает максимального допустимого уклона. В противном случае вогнутую кривую целесообразно совмещать с кривой в плане большого радиуса. Наилучшая плавность достигается, если радиусы вертикальных вогнутых кривых не менее чем в 6 раз превышают соответствующие радиусы горизонтальных кривых.

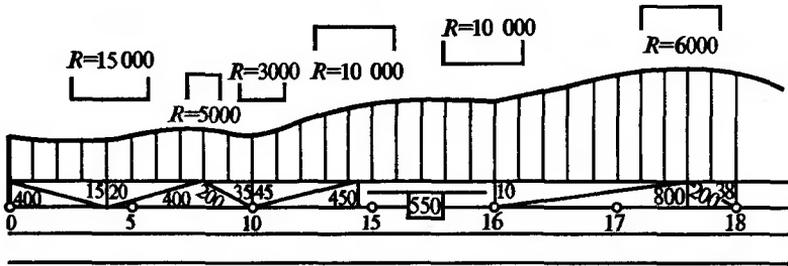
Следует избегать сопряжений концов кривых в плане с началом выпуклых или вогнутых вертикальных кривых, расположенных на последующих прямых участках. В первом случае для водителей автомобилей, следующих в сторону вертикальной кривой, не ясно дальнейшее направление дороги. Во втором случае создаются участки с плохой видимостью ночью при свете фар.

Для обеспечения на дороге видимости на большом расстоянии следует избегать сочетания элементов трассы, в результате которых для водителей остается неопределенным дальнейшее направление дороги. К их числу относятся: короткие вогнутые участки в продольном профиле на прямых и кривых в плане большого радиуса, которые создают впечатление карманов или просядок; резкие снижения продольного уклона на подъемах, при которых нарушается видимость проезжей части на большом расстоянии; крутые выпуклые участки, как бы упирающиеся в небо, на вершинах выпуклых кривых малого радиуса или на путепроводах пересечений дорог в разных уровнях.

Количество переломов в плане и продольном профиле должно быть по возможности одинаковым. Нарушение этого принципа обычно приводит к неудачным решениям, в ряде случаев характеризующимся низкими уровнями удобства и безопасности движения.



a



б

Рис. 19.14. Волнистый вид участка дороги в результате частых переломов продольного профиля на длинных прямых

a — перспектива; *б* — продольный профиль

Частые переломы продольного профиля на длинных прямых в плане определяют неспокойную волнистую поверхность проезжей части (рис. 19.14).

Если при постоянном общем продольном уклоне местности углов поворота в плане назначено больше, чем вертикальных кривых в продольном профиле, то получают *S*-образные кривые или извилистые участки, вид которых участники движения воспринимают как логически неоправданные. При регулярном изменении направления трассы на пересечениях цепи холмов («биение трассы») дорога оказывается весьма неудобной и опасной для движения (рис. 19.15).

Длины прямых и кривых участков дороги в плане должны быть соизмеримыми. Следует избегать:

сочетаний элементов дороги в плане и профиле, которые из-за искажения их вида в перспективе кажутся неплавными, имеющими крутые изломы;

коротких кривых в плане, располагаемых между длинными прямыми, которые водителям издалека кажутся резкими переломами дороги и вызывают необоснованное снижение скорости движения. Поэтому в малые углы повороты дороги следует вписывать кривые больших радиусов (рис. 19.16);

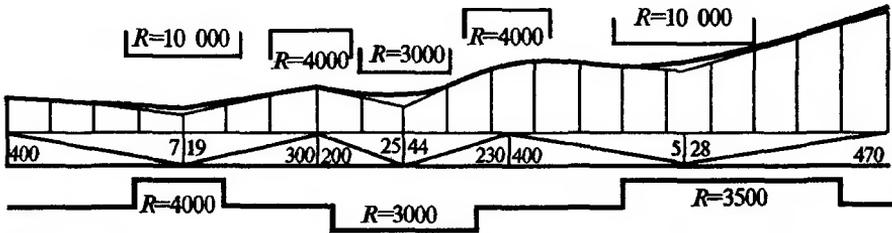
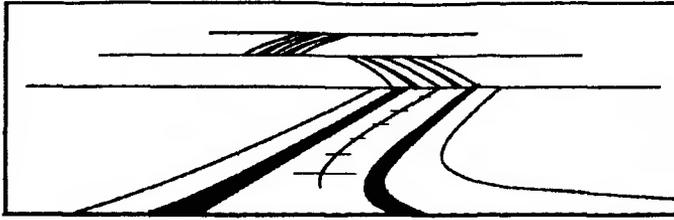


Рис. 19.15. «Биение трассы» при регулярном изменении направления дороги

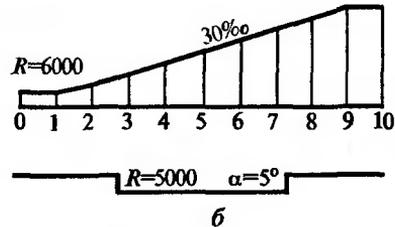
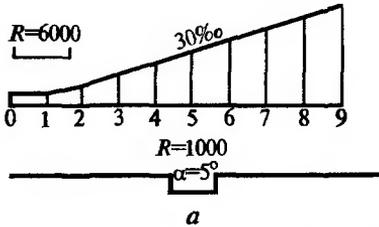
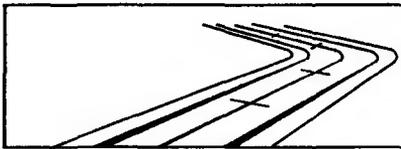


Рис. 19.16. Изменение вида дороги в зависимости от радиуса кривой в плане при малом угле поворота:

a — при малой длине круговой вставки, при радиусе 1000 м; *б* — то же при увеличении радиуса до 5000 м

коротких прямых вставок между кривыми в плане одного знака. Зрительная плавность не нарушается лишь в том случае, если видимые угловые размеры вставки менее $0,1R$ ближайшей к водителю кривой. Иначе они воспринимаются как неприятный для взгляда излом дороги (рис. 19.17).

В равнинной местности рекомендуются соотношения, приведенные в табл. 19.3.

Таблица 19.3. Рекомендуемые соотношения параметров кривых, вписываемых в малые углы поворота трассы между длинными прямыми

Длина меньшей из двух прямых, м	Наименьшая длина кривой, м	Наименьший радиус кривой
≥ 2000	500	$2R_{\min}$
1000	400	$1,2R_{\min}$
≤ 500	350	R_{\min}

Примечание. R_{\min} — минимальный радиус для дороги соответствующей категории согласно СНиП 2.05.02—85.

Особенно неблагоприятны такие сочетания при совпадении их с вогнутыми вертикальными кривыми. В этих случаях целесообразно заменять смежные кривые с короткой прямой вставкой между ними непосредственно сопрягаемыми между собой кривыми больших радиусов и параметров или трехзвенными коробовыми кривыми;

прямых вставок между обратными кривыми, которые могут быть оставлены лишь в тех случаях, когда воспринимаются как самостоятельный элемент трассы (не менее 700 м для дорог I категории с многополосной проезжей частью и не менее 300 м для дорог II, III и IV категорий).

Недопустимы резкие переходы от кривых большого радиуса в плане к кривым малого радиуса. Желательно, чтобы радиусы смеж-

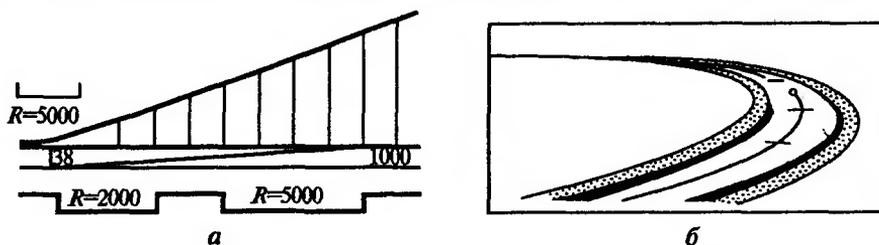


Рис. 19.17. Вид участка дороги с короткой прямой вставкой между двумя кривыми, направленными в одну сторону:

a — продольный профиль и план трассы; *б* — вид дороги

ных кривых в плане различались не более чем в 1,3 раза. Это необходимо как для обеспечения зрительной плавности дороги, так и для плавного изменения скоростного режима на смежных ее участках (не более чем на 10—15%). Если в каком-либо месте извилистой дороги неизбежно значительное снижение скорости, радиусы предшествующих кривых должны постепенно уменьшаться, чтобы водитель, снижая скорость на каждой последующей кривой по отношению к предыдущей, подъехал к указанному участку с существенно меньшей скоростью.

Недопустимы сочетания элементов дорог, при которых в каком-либо месте требуется неожиданное для водителя резкое снижение скорости, например устройство кривых малых радиусов среди группы кривых, допускающих движение с высокими скоростями, или устройство кривой малого радиуса на затяжном спуске. Такие места всегда характеризуются повышенной аварийностью. Поэтому радиусы кривых, расположенных в конце спусков длиной более 500 м и с уклонами более 30%, следует увеличивать не менее чем в 1,5 раза по сравнению с минимальными, нормируемыми СНиПом.

Необходимо избегать сочетаний элементов трассы, создающих у водителей ошибочное представление о дальнейшем направлении дороги за пределами фактической видимости (рис. 19.18).

При трассировании автомобильной дороги и последующем размещении озеленительных посадок и расстановкой оборудования дороги следует соблюдать принцип «зрительного ориентирования» — создания комплекса опорных точек для взгляда водителя, подсказывающего ему последующее направление дороги. При продуманном размещении эти точки могут ориентировать водителей в направлении дороги на сравнительно большом расстоянии за пределами фактической видимости. Для этого края дороги обозначают при помощи видимых издали предметов направляющими столбиками, ограждениями бордюрного типа, растительными посадками и т.д.

Средствами зрительного ориентирования являются:

полотно дороги в целом. Например, в случае, когда начало кривой в плане, частично перекрывающееся вертикальной кривой, расположено за пределами видимого участка продольного профиля, направление движения остается непонятным для водителей (рис. 19.19, а). Ясность в направлении дороги может быть достигнута увеличением радиуса кривой в плане или смещением ее вершины таким образом, чтобы начало кривой располагалось до перелома продольного профиля (рис. 19.19, б). При этом угол поворота видимого участка кривой должен быть не менее 3° ;

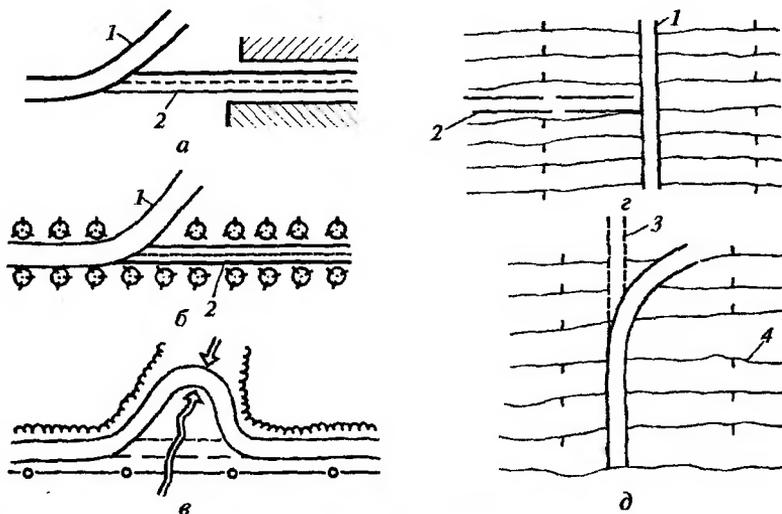


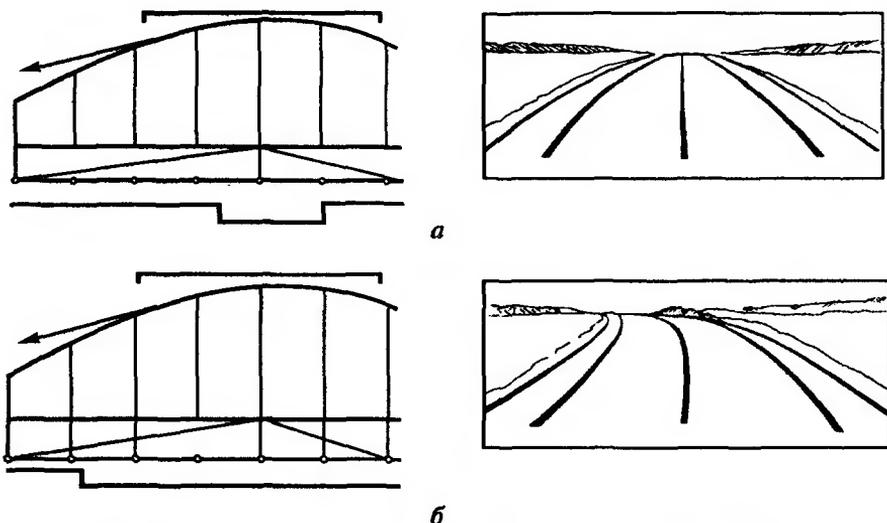
Рис. 19.18. Примеры неудачных сочетаний элементов трассы, которые создают у водителя неправильное представление о дальнейшем направлении дороги:

a, б — незаметный издали поворот основной дороги (водителю кажется, что она не меняет направления); *в* — спуск дороги по склонам оврага, когда начало спуска не видно водителю (линия связи, пересекающая овраг по прямому направлению, создает ошибочное представление, что и дорога продолжается прямо); *г* — примыкание второстепенной дороги на гребне водораздела (водителю кажется, что основная дорога круто поворачивает в сторону); *д* — скрытый поворот дороги за водоразделом (у водителя создается впечатление, что дорога идет прямо); *1* — основная дорога; *2* — примыкающая второстепенная дорога; *3* — кажущееся водителю направление дороги; *4* — горизонтали рельефа местности

сигнальные столбики, боковые ограждения барьерного типа. Установленные на обочинах, они, сливаясь в перспективе, создают цепь опорных точек, скользя по которым взглядом и мысленно экстраполируя их дальнейшее направление, водители получают представление о дальнейшем направлении дороги;

придорожная растительность, особенно высокие деревья. Изменения направления проезжей части иногда бывают плохо видны с большого расстояния, так как луч зрения водителя, направленный под очень острым углом к полотну дороги, может прерываться выпуклыми переломами продольного профиля или неровностями поверхности земли на придорожной полосе. Возвышающиеся вершины деревьев хорошо видны издали и, привлекая к себе внимание водителей, указывают дальнейшее направление дороги (рис. 19.20);

ориентирование дороги на отдельные возвышающиеся предметы, повышающие внимательность водителей. Появляющийся на горизонте силуэт ориентира, вначале трудноразличимый, заинтересовывает во-



Р и с. 19.19. Обеспечение видимости кривой в плане, расположенной за выпуклым перегибом продольного профиля (а) путем выноса ее начала на вершину вертикальной кривой (б)

дителя и, сосредоточивая на себе внимание, способствует устранению усыпляющего влияния однообразной придорожной обстановки. Для этой цели около дорог в степной местности иногда устанавливают обелиски и скульптурные группы.

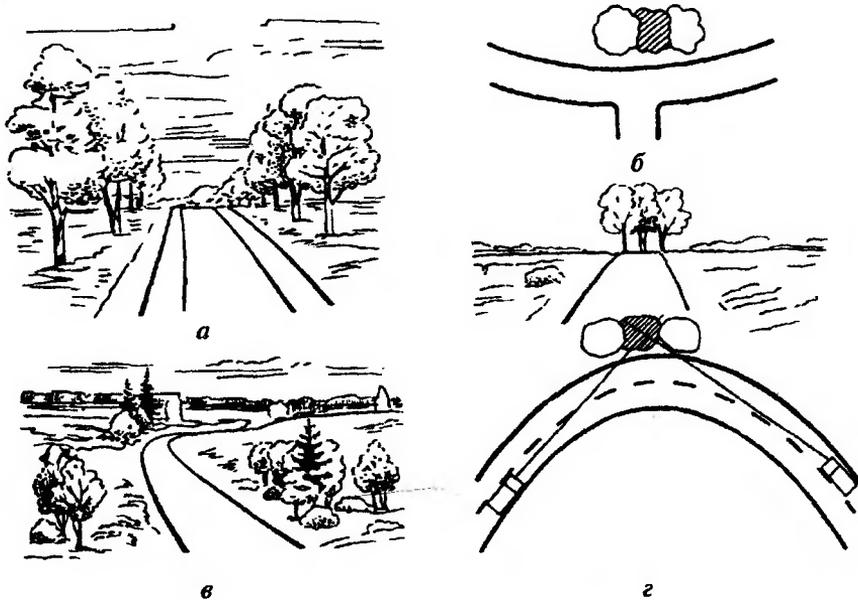
Наибольшая плавность трассы дороги обеспечивается введением длинных переходных кривых, описанных по клотоиде с уравнением в параметрическом виде $A^2 = RL$. Значение параметра A переходных кривых должно находиться в пределах от $0,4R$ до $1,4R$, причем параметры смежных кривых не должны различаться более чем в $1,5$ раза.

Для зрительной плавности дороги угол поворота трассы при вписывании переходных кривых должен составлять не менее 3° . Длина каждой переходной кривой должна быть не менее $1/4$ длины круговой кривой. При сопряжении переходными кривыми обратных S -образных кривых желательно, чтобы обе переходные кривые имели одинаковые значения параметров A . При этом радиусы сопрягаемых кривых должны находиться в соотношении $R_1 \leq 3R_2$.

При сопряжении переходными кривыми круговых кривых одного знака следует соблюдать соотношения:

$$0,5R_1 < A < R_2.$$

При $R_1 \leq 2R_2$ круговые кривые можно сопрягать между собой непосредственно. Длина прямой вставки между обратными клотоидами с параметрами A_1 и A_2 не должна превышать



Р и с. 19.20. Обозначение направления дороги вершинами деревьев:

a — поворот за переломом профиля, хорошо заметный по положению крон деревьев; *б* — Т-образный перекресток, обозначенный группой деревьев; *в* — участок дороги большой протяженности, обозначенный группами деревьев, расположенными с интервалами; *г* — вершина кривой малого радиуса, обозначенная группой деревьев

$$L = (A_1 + A_2)/2.$$

При этом параметры A_1 и A_2 не должны различаться более чем в два раза.

Расположение малых и средних мостов должно полностью подчиняться общему направлению трассы. Прямолинейные мосты небольшой длины, расположенные между кривыми в плане, или горизонтальные мосты в пределах вертикальной кривой резко нарушают зрительную плавность полотна дороги, а при резком несоответствии ухудшают условия и безопасность движения. Совершенно недопустимо устройство кривых малых радиусов перед въездами на мосты.

Малые и средние мосты следует располагать в соответствии с общим направлением дороги — на кривых в плане и профиле, на переходных кривых с устройством виражей. Неизбежное усложнение конструкции моста оправдывается в этом случае улучшением условий движения по дороге. Строительство мостов на кривых повышает безопасность движения и транспортно-эксплуатационные характе-

ристики дороги и позволяет едущим в полной мере оценить красоту этих оригинальных инженерных сооружений.

Большие мосты через реки, особенно судоходные, являются весьма дорогими и уникальными сооружениями, и их расположение обосновывают выбором наиболее рационального места мостового перехода. Трасса дороги соответственно должна быть подчинена на достаточно большом расстоянии рациональному створу мостового перехода без резкого ее изменения вблизи моста.

В горных районах широкое применение должны находить высокие мосты и эстакады, пересекающие глубокие долины без изменения общего направления трассы. Они требуют меньшего отвода земли по сравнению с высокими насыпями, что очень важно, в частности, для курортных районов и при высокопродуктивных землях. При строительстве мостов не нарушаются условия устойчивости горных склонов, в то время как отсыпка высоких насыпей, перегружая склоны, иногда вызывает развитие оползневых явлений.

Пересечения автомобильных дорог в разных уровнях, расположенных на прямых участках, являются местами с необеспеченной видимостью, так как водители подъезжающих автомобилей видят дорогу только до верхней точки путепроводов. Участок за путепроводом остается невидимым, что существенно снижает уровни удобства и безопасность движения. Поэтому целесообразно располагать путепроводы на кривых в плане с радиусами более 1000 м и углами поворота, близкими к 30° .

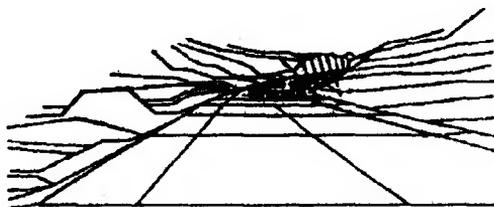
19.6. Построение перспективных изображений автомобильных дорог

С помощью перспективных изображений участков дорог могут быть оценены сочетание дороги с окружающим ландшафтом, обеспечение видимости при совпадении кривых в плане и продольном профиле, выявлено наличие участков с оптическими искажениями вида дороги, излишней волнистостью.

Для построения перспективных изображений дороги используют координатный или панорамный методы, основанные на пересчете пространственных координат любой точки дороги или рельефа местности в координаты ее изображения на картинной поверхности, в качестве которой применяют вертикальную или наклонную плоскости, цилиндрическую или коническую поверхности.

Долгое время для оценки зрительной плавности трассы на этапе проектирования использовали разработанный в 1941 г. доктором В. Ранке графоаналитический способ построения перспективных

Рис. 19.21. Перспективное компьютерное изображение участка дороги, получаемое на мониторе или плоттере



изображений автомобильных дорог методами начертательной геометрии — «*центральную проекцию*», — оказавшийся весьма эффективным. Тем не менее в практике отечественного проектирования дорог в связи с многодельностью и сжатыми сроками проектирования долгое время метод В. Ранке широкого применения не находил, равно как и другие разработанные впоследствии методы (координатный, панорамный, фотографический, полярный и т.д.).

Широкие возможности открылись перед координатным методом построения перспективных изображений полотна автомобильных дорог и прилегающей местности в связи с использованием современной компьютерной техники с вычерчиванием перспективных изображений на плоттерах (рис. 19.21).

Суть координатного метода построения перспективных изображений автомобильных дорог состоит в том, что для любой точки пространства вычисляют (или задают) ее декартовы координаты, которые затем пересчитывают в перспективные координаты для различных картинных поверхностей: вертикальной или наклонной плоскости, цилиндрической или конической поверхности. Декартову систему координат ориентируют таким образом, чтобы главный луч совпадал с осью проекций P_1P_2 (рис. 19.22). При этом картинная плоскость P' располагается перпендикулярно главному лучу на расстоянии x от точки зрения S . Аналитическая связь между фактическими координатами точки местности и ее перспективными координатами имеет вид:

$$y = \frac{Y}{X} xK; \quad z = \frac{Z}{X} xK,$$

где X, Y, Z — декартовы координаты точки A ; x — расстояние от точки зрения до картинной плоскости по главному лучу; y, z — перспективные координаты той же точки на картинной плоскости; K — масштабный множитель.

При построении перспективного изображения дороги и прилегающей местности используют панорамный метод, когда картинную плоскость заменяют цилиндрической поверхностью, а в горных усло-

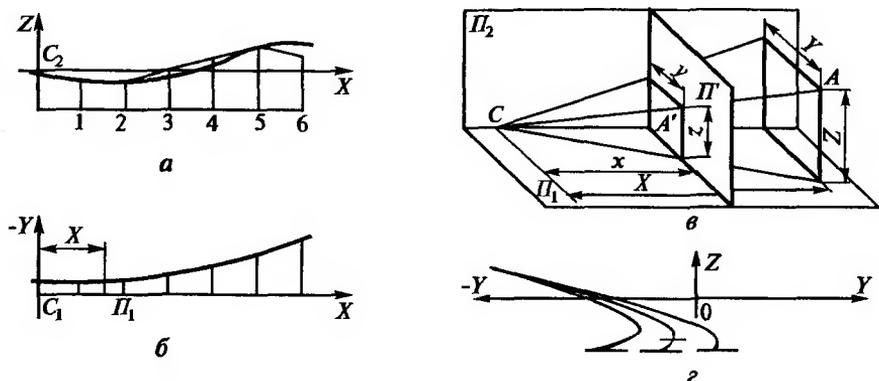


Рис. 19.22. Схема построения проекций для перспективных изображений:

a — продольный профиль; *б* — план; *в* — расположение картинной плоскости в декартовой системе координат; *г* — перспективное изображение участка дороги

виях — конической поверхностью. В остальном техника построения перспективных изображений остается прежней.

На основе уже накопленного опыта построения перспективных изображений участков автомобильных дорог выработаны следующие правила:

местоположение наблюдателя устанавливают на границах архитектурно-ландшафтных бассейнов вблизи переломов продольного профиля в конце вертикальной выпуклой кривой со смещением точки зрения в сторону вершины кривой на 100—200 м, а также на участках дорог перед местами с ограниченной видимостью на расстоянии, равном расчетному расстоянию видимости при обгоне. При этом точку зрения размещают в 2,0 м от правой кромки проезжей части на высоте 1,2 м над поверхностью дороги;

расстояние от точки зрения до картинной плоскости принимают $x = 100$ см, а главный луч принимают горизонтальным при небольших продольных уклонах и параллельным среднему уклону на затяжных подъемах (спусках);

при наличии поворота дороги главный луч смещают в сторону центра закругления, при этом положение главного луча устанавливают согласно схеме, представленной на рис. 19.23. Положение точки 2 устанавливают по расстоянию до зоны концентрации внимания водителя, определяемому по эмпирической формуле:

$$L_{\text{KB}} = 4v, \quad (19.2)$$

где v — скорость движения автомобиля, км/ч.

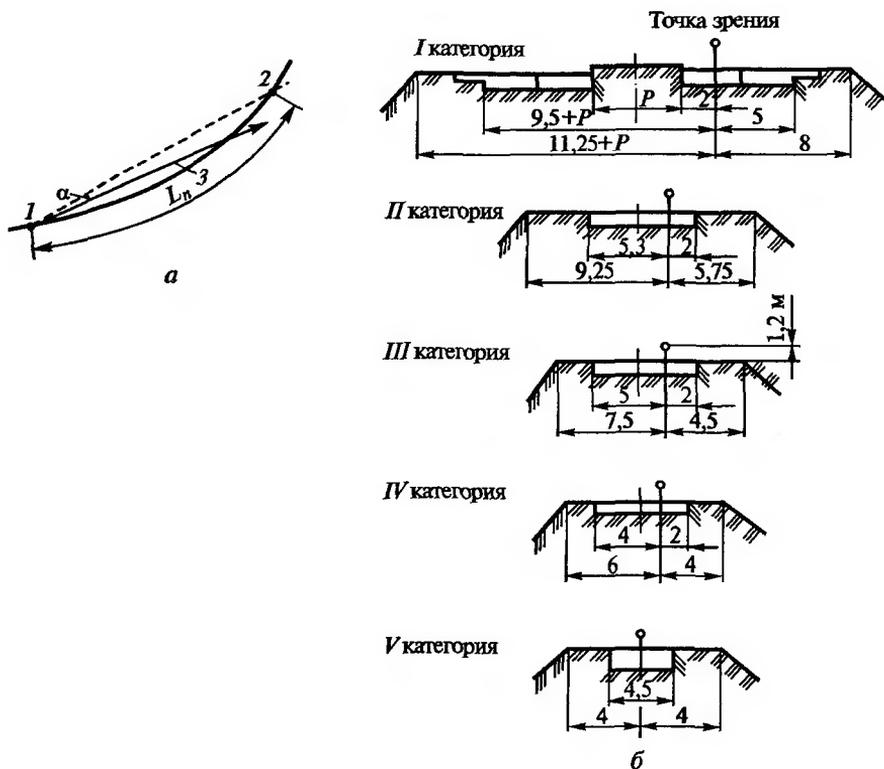


Рис. 19.23. Схема к определению положения главного луча и точки зрения водителя:

a — на закруглении в плане; *b* — в поперечном профиле

Следует иметь в виду, что формула (19.2) действительна при $v \geq 60$ км/ч.

Главный луч *З* в плане делит пополам угол острого зрения, т.е. расположен на 10° в сторону от хорды 1—2 (см. рис. 19.23, *a*).

В ряде программных комплексов для автоматизированного проектирования автомобильных дорог, например «Credo», «IndorCAD/Road», предусмотрена возможность получения перспективного изображения участка дороги как в статическом, так и в динамическом режиме просмотра.

В статическом режиме проектировщик может вызвать на экран монитора или вычертить на плоттере перспективное изображение участка дороги при расположении наблюдателя в определенном зада-

ваемым створе дороги. Динамический режим просмотра заключается в создании фильма, имитирующего картину, которую видит водитель в процессе проезда автомобиля по запроектированной дороге. Для этого создают серию перспективных изображений с определенными интервалами между точками зрения наблюдателя, т.е. получают набор слайдов, показываемых с частотой, зависящей от скорости движения автомобиля.

Исходными данными для построения перспективных изображений дороги являются результаты выполненных в САПР-АД проектных решений: цифровая модель местности; план трассы; продольный профиль; поперечные профили земляного полотна; ширина проезжей части, обочин и разделительной полосы.

Эти данные при расчете координат перспективных изображений не требуют дополнительной обработки и ввода, так как выбираются автоматически из файлов, созданных на предыдущих этапах проектирования.

Однако необходим ввод дополнительной информации: местоположение наблюдателя (ПК +), направление просмотра (вперед по ходу пикетажа или назад), высота глаза наблюдателя (водителя) h_b над поверхностью проезжей части (в некоторых программах по умолчанию этот параметр принят равным $h_b = 1,2$ м). Для этого проектировщик может использовать функциональные клавиши, описание которых отображается на экране монитора вместе со схематическими изображениями плана и продольного профиля дороги.

В результате расчетов на экран выдаются перспективные изображения участка дороги по ведущим линиям (ось дороги, кромки проезжей части, бровки земляного полотна, подошва насыпи, внешние бровки выемок или боковых канав), поверхностей откосов и прилегающих элементов рельефа. На экране также указывается пикетажное положение створа, в котором находится наблюдатель, высота точки зрения наблюдателя над поверхностью проезжей части и расстояние видимости поверхности дороги.

В программном комплексе «IndorCAD/Road» в состав перспективного изображения могут также входить изображения расположенных рядом с дорогой зданий и элементов обустройства дороги.

При просмотре фильма, моделирующего движения автомобиля по дороге на экране дополнительно на совмещенных схемах плана и продольного профиля дороги, указывается положение автомобиля в данный момент времени.

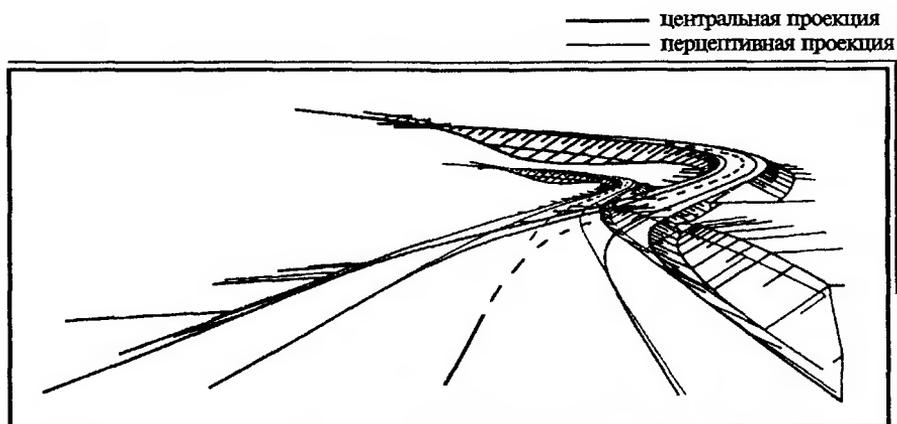
В результате просмотра перспективных изображений дороги могут быть выявлены участки с необеспеченной видимостью, плавностью и ясностью трассы, оптическими искажениями вида дороги, излишней волнистостью, требующие корректировки проектных решений. После внесения необходимых изменений в план трассы, продольный профиль, конструкцию земляного полотна для получения новых перспективных изображений нет необходимости во вводе дополнительных данных.

19.7. Перцептивные изображения автомобильных дорог

Теоретический анализ пространственной плавности трассы дает возможность с достаточной степенью точности оценить ее соответствие принятым критериям. Однако приемы увязки дороги с ландшафтом установлены пока лишь в общих формулировках, а качество размещения дороги на местности во многом зависит от опыта и эстетического вкуса проектировщика. Для получения наглядного представления о виде дороги после ее постройки прибегают к построениям методами начертательной геометрии перспективных изображений отдельных участков при взгляде с характерных точек местности, а также изготовлению моделей участков дороги. При анализе удовлетворения дорогой требованиям ландшафтной архитектуры прибегают также к фотомонтажу — помещению на фотографию местности, снятую с места стоянки наблюдателя, построенного в масштабе фотоснимка перспективного изображения дороги.

К недостаткам анализа перспективных изображений, построенных по законам «центральной проекции» (к которым, кстати, относится и фотография), является несоответствие перспективных изображений и информации, получаемой при непосредственном зрительном восприятии человека. Поэтому возникла необходимость внесения корректив в пространственные параметры «центральных проекций» с учетом психофизических критериев восприятия человеком окружающей местности. При очевидных достоинствах компьютерных перспектив (и киноперспектив), построенных по законам центральной проекции, они не могут дать полного представления о будущем объекте без учета его психофизиологического («перцептивного») восприятия.

В работах российских и зарубежных ученых и прежде всего в работах академика Б.В. Раушенбаха на основе анализа живописных полотен классиков живописи и физических экспериментов по психологии зрительного восприятия и математических исследований разработа-



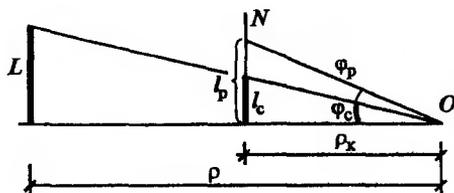
Р и с. 19.24. Совмещенные изображения участка автомобильной дороги Минск—Брест, выполненные в «центральной» и «перцептивной» проекциях

на научная теория «*перцептивной проекции*» (лат. *percept* — воспринимать), а также получены методы построения плоских перцептивных изображений. Результаты исследований академика Б.В. Раушенбаха учитывают сложные процессы зрительного восприятия, основанные на согласованной работе мозга человека и глаз. Сетчатка глаза человека фиксирует классическую «центральную проекцию» местности и находящихся на ней объектов (в том числе и автомобильных дорог), однако мозг преобразует эту информацию таким образом, что наблюдатель воспринимает ее совсем не такой, как это представлял себе проектировщик. «Перцептивная проекция», хотя и не полностью совпадает по своим геометрическим параметрам с наблюдаемым пространством, но с большей степенью достоверности передает на плоскости то, что воспринимает наблюдатель на местности.

Использованию «перцептивных проекций» при ландшафтном проектировании автомобильных дорог посвящены исследования проф. А.И. Метелкина и канд. техн. наук С.Д. Шерстикова, выполненные в Воронежском инженерно-строительном институте.

Степень несоответствия изображения автомобильной дороги в «центральной проекции» зрительному восприятию наблюдателя можно оценить при анализе изображения проектируемого участка автомобильной дороги Минск—Брест, полученные в проектном институте «Белремдорпроект» (рис. 19.24). Одно изображение получено в «центральной проекции» (тонкие линии), другое — в «перцептивной» (толстые линии). Как видно, объекты среднего и дальнего плана наблюдатель воспринимает на местности увеличенными и приподня-

Рис. 19.25. Схема к выводу расчетных формул для построения «перцептивной» проекции



тыми по сравнению с классической «центральной проекцией» или фотографией. Результаты анализа зрительной плавности и ясности автомобильных дорог по ведущим линиям с использованием «центральной» и «перцептивной» проекций существенно расходятся. Так, представленные на рис 19.24 изображения дают значения видимого радиуса кривизны R_α и видимой ширины B_α в экстремальной точке соответственно для «центральной» и «перцептивной» проекций: $R_\alpha = 3$, $B_\alpha = 2,06$ и $R_{\text{оп}} = 67$, $B_{\text{оп}} = 4,8$.

Математические формулы для расчета «перцептивных» проекций могут быть получены в соответствии с рис. 19.25. На расстоянии ρ от наблюдателя перпендикулярно главному лучу зрения расположен отрезок L , а на расстоянии ρ_k перед наблюдателем — картинная плоскость N , тогда l_c и l_p будут соответственно величины «центральной» и «перцептивной» проекций отрезка L на картинную плоскость, а φ_c и φ_p — их угловые величины.

Обычно «перцептивные» изображения участков автомобильных дорог лежат в пределах конуса четкого видения с $\varphi_c \leq 3^\circ$, для которого механизм возникновения «перцептивного» изображения характеризуется величинами L , l_c , l_p , φ_c , φ_p , связанными соотношениями:

$$l_p = R_{(\rho)} l_c; \quad R_{(\rho)} = R_0 f(\rho),$$

где R_0 — коэффициент преобразования на расстоянии ρ_0 ; $R_{(\rho)}$ — коэффициент «перцептивного» искажения; $f(\rho)$ — функция Б.В. Раушенбаха, определяемая на основе экспериментальных данных:

$$f(\rho) = \frac{\rho}{\rho_0} (1 - (az + bz)^n), \quad z = 1 - \frac{\rho}{\rho_0},$$

где a , b , n — коэффициенты, определяемые экспериментально, а расстояние ρ_0 зависит от дальности «четкого зрения». При $\rho_0 = 20$ м; $a = 0,25$; $b = 0,7$; $n = 5$.

Для отрезков, выходящих за пределы конуса «четкого видения» при $3^\circ < \varphi_c \leq 30^\circ$, их разбивают на более мелкие части и переходят к пределу интегральных сумм.

Глава 20

ПЕРЕСЕЧЕНИЯ И ПРИМЫКАНИЯ АВТОМОБИЛЬНЫХ ДОРОГ¹

20.1. Общие положения по проектированию пересечений и примыканий автомобильных дорог в одном уровне

Обязательными элементами автомобильных дорог являются пересечения и примыкания в разных (на дорогах I—II категорий) и в одном уровне (на дорогах III—V категорий).

Отличительной особенностью пересечений и примыканий автомобильных дорог в одном уровне является наличие в их пределах значительного числа конфликтных точек (точек разветвления, слияния и пересечения транспортных потоков). Как свидетельствует статистика, наличие большого числа конфликтных точек на сравнительно небольших площадях нерегулируемых транспортных узлов в одном уровне определяет большое число дорожно-транспортных происшествий (ДТП).

Общее количество конфликтных точек оказывается тем больше, чем больше полос движения на пересекающихся дорогах в каждом направлении. Планировочные решения пересечений и примыканий дорог принимают такими, при которых общее число конфликтных точек оказывается наименьшим, особенно это относится к наиболее опасным конфликтным точкам — пересечениям транспортных потоков. Лучшим решением, обеспечивающим существенное повышение уровней удобства и безопасности движения на пересечениях, является строительство развязок движения в разных уровнях. Однако, учитывая высокую стоимость их строительства, такие решения оказываются экономически оправданными на пересечениях и примыканиях автомобильных дорог I—II категорий. На дорогах III—V категорий для сокращения аварийности на пересечениях и примыканиях в одном уровне предусматривают: канализированные пересечения, островки безопасности для разделения транспортных потоков по направлениям, переходно-скоростные полосы с устройством соответствующей горизонтальной разметки или бордюров, возвышающихся над проезжей частью (рис. 20.1).

¹ Глава 20 подготовлена с использованием материалов канд. техн. наук В.А. Федотова из «Справочника инженера-дорожника. Проектирование автомобильных дорог»/Под ред. д-ра техн. наук Г.А. Федотова. М.: Транспорт, 1989.

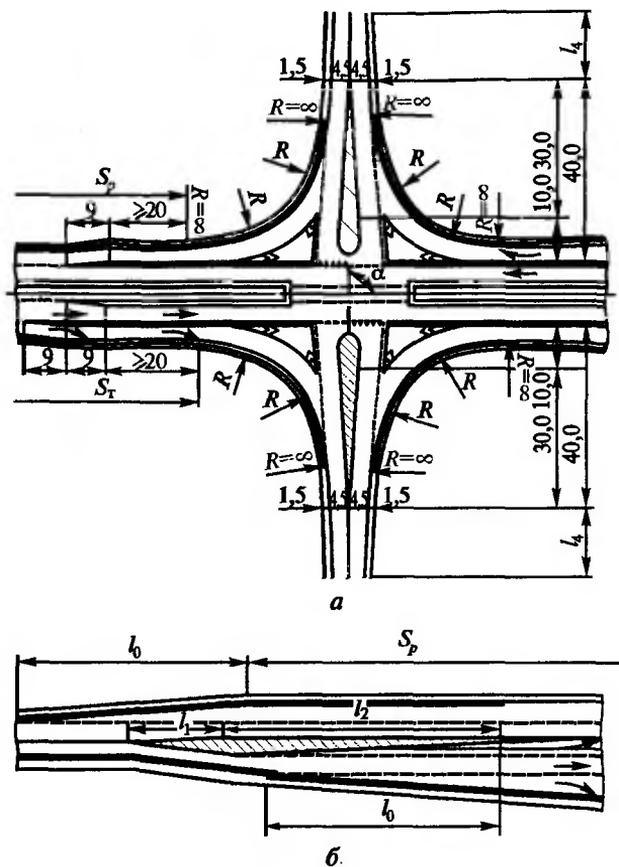


Рис. 20.1. Принципиальное решение в плане пересечения дорог III—V категорий:

a — план пересечения; *b* — переходно-скоростная полоса

Принципиальные схемы пересечений в одном уровне в зависимости от интенсивностей движения по главной и второстепенной дорогам и их категорий осуществляют с использованием действующих типовых проектов (табл. 20.1).

При разработке проектов развязок движения автомобильных дорог планировочные решения принимают с учетом ожидаемых перспективных интенсивностей движения на пересекающихся дорогах по соответствующим направлениям. При этом учитывают следующее: планово-высотное положение транспортного узла, его роль в общей системе существующей и перспективной дорожно-транспорт-

ной сети, согласованность с другими типами развязок и организацией движения на них, ее видимость, наглядность и понятность водителю условий движения по направлениям. При проектировании пересечений и примыканий автомобильных дорог нового строительства и реконструируемых дорог руководствуются в первую очередь требованиями обеспечения комфортабельности и безопасности движения.

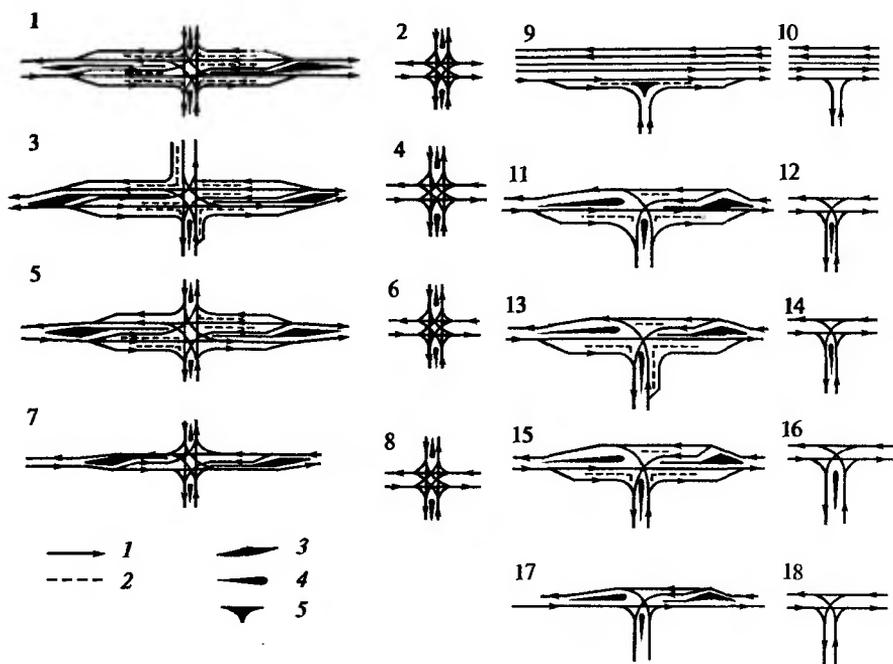
Т а б л и ц а 20.1. Схемы пересечений и примыканий автомобильных дорог в одном уровне

Категория главной дороги	Интенсивность движения по главной дороге, авт/сут	Интенсивность движения автомобилей между главной и второстепенной дорогами, авт/сут							
		Пересечение				Примыкание			
		Категория второстепенной дороги							
		III		IV, V		III		IV, V	
I	$\frac{—*}{7000*}$	—		—		—		25 и более (схема 9)	Менее 5 (схема 10)
II	$\frac{8000*}{3000}$	—		50 и более (схема 1)	Менее 50 (схема 2)	—		50 и более (схема 11)	Менее 50 (схема 12)
III	1000	100 и более (схема 3)	Менее 100 (схема 4)	100 и более (схема 5)	Менее 100 (схема 6)	100 и более (схема 13)	Менее 100 (схема 14)	100 и более (схема 15)	Менее 100 (схема 16)
IV	200	—		1000** и более (схема 7)	Менее 1000** (схема 8)			1000** и более (схема 17)	Менее 1000** (схема 18)

*Интенсивность движения в числителе относится к пересечению, в знаменателе — к примыканию.

**Указана суммарная интенсивность движения, авт/сут, по обеим дорогам.

Примечание. Условные обозначения на схемах 1—18 к табл. 20.1: 1 — полосы движения; 2 — разделительная полоса на дорогах II и III категорий; 3, 4, 5 — направляющие островки с зоной безопасности: ромбовидной, треугольной и каплевидной форм соответственно.



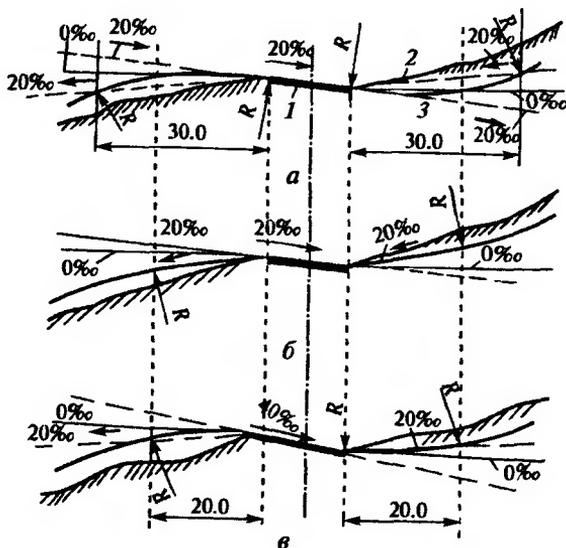
При проектировании узлов пересечений и примыканий автомобильных дорог принимают принципиальные инженерные решения с учетом следующего:

по трассе вновь проектируемой дороги устанавливают рациональные места пересечений и примыканий, ограничиваясь минимальным их числом. Наименьшие расстояния между пересечениями и примыканиями в зависимости от категорий дорог принимают в соответствии с требованиями СНиП 2.05.02—85*;

на каждом пересечении и примыкании по согласованию с ГИБДД устанавливают главную и второстепенную дороги для расстановки соответствующих указателей и знаков;

по трассе вновь проектируемой дороги предусматривают, как правило, однотипные планировочные решения транспортных узлов;

при проектировании плана и продольного профиля автомобильных дорог на участках пересечений и примыканий стремятся обеспечить максимальные расстояния прямой и боковой видимости и предельную простоту и наглядность транспортных узлов. Всегда стремятся обеспечивать углы пересечений, близкие к 90° , устраивая их по возможности на прямолинейных участках в плане и на вогнутых вер-



Р и с. 20.2. Принципиальные решения проектной линии продольного профиля второстепенной дороги на ее пересечении с главной дорогой:

a — сопряжение второстепенной дороги вертикальной кривой с проезжей частью главной дороги; *б* — сопряжение второстепенной дороги прямолинейным участком с проезжей частью главной дороги; *в* — сопряжение второстепенной дороги вертикальной кривой с проезжей частью главной дороги; 1 — проезжая часть главной дороги; 2 — продольный профиль земли; 3 — проектная линия продольного профиля второстепенной дороги

тикальных кривых — в продольном профиле, на участках с продольными уклонами пересекающихся дорог не более 20‰;

пересечения второстепенных дорог целесообразно устраивать в пониженных местах с устранением препятствий из зоны боковой видимости. При отсутствии непосредственной видимости пересекаемых дорог предусматривают создание зрительных ориентиров в виде «обозначающих» посадок, указывающих водителям места пересечений и примыканий второстепенных дорог;

в пределах пересечений не допускают использования предельно допустимых значений параметров плана и продольного профиля;

продольный профиль второстепенной дороги подчиняют поперечному уклону проезжей части главной дороги. Возможные решения проектной линии продольного профиля второстепенной дороги на пересечениях показаны на рис. 20.2.

Минимальные радиусы вертикальных кривых на пересечениях принимают: для выпуклых кривых — 500 м, для вогнутых — 200 м,

при условии обязательного обеспечения необходимых расстояний видимости.

Для создания благоприятных условий поворотных маневров большегрузных автомобилей и автопоездов минимальные радиусы закруглений в плане назначают не менее 30 м. Для исключения ошибочных действий водителей в пределах пересечений направления движения по ним должны быть предельно понятными водителю.

Расстановку дорожных знаков и указателей на пересечениях производят в соответствии с действующими нормативными документами.

20.2. Классификация пересечений автомобильных дорог в разных уровнях

Развязки в разных уровнях — наиболее сложные узлы автомагистралей и автомобильных дорог высоких категорий, с точки зрения проектирования, строительства и последующей их эксплуатации. Учитывая высокую строительную стоимость этих сооружений, вопрос создания современной технологии и методов проектирования пересечений и примыканий автомобильных дорог в разных уровнях является весьма актуальным, а реализация современной технологии и методов их проектирования на базе использования компьютерной техники и необходимых периферийных устройств позволяет получать наилучшие проектные решения в фиксированные сроки и с минимальными трудозатратами.

В соответствии с действующими нормами и правилами на проектирование необходимость строительства пересечений и примыканий автомобильных дорог в разных уровнях возникает в следующих случаях:

при пересечениях автомобильных дорог I категории с дорогами остальных категорий;

при пересечениях дорог II категории с дорогами II и III категорий;

при пересечениях и примыканиях дорог III категории между собой при суммарной перспективной расчетной интенсивности движений более 8000 прив.ед/сут.

К разработке проектов пересечений автомобильных дорог предъявляют следующие требования:

развязки движения в разных уровнях на автомобильных дорогах I—II категорий проектируют таким образом, чтобы были исключены пересечения левоповоротного движения в одном уровне с транспортными потоками основных направлений;

пересечения и примыкания на дорогах I—II категорий предусматривают не чаще, чем через 5 км, а на дорогах III категории — не чаще, чем через 2 км;

элементы ответвлений и примыканий съездов развязок в целях обеспечения комфортабельности и безопасности движения разветвляющихся и сливающихся транспортных потоков, а также в целях сокращения площадей, занимаемых транспортными узлами, проектируют исходя из условия движения автомобилей с переменными скоростями. При этом минимальные радиусы кривых на правоповоротных съездах дорог I—II категорий определяют исходя из скорости не менее 80 км/ч, а для дорог III категории — не менее 60 км/ч. Минимальные радиусы на левоповоротных съездах дорог I—II категорий устанавливают исходя из обеспечения скорости 50 км/ч, а на дорогах III категории — не менее 40 км/ч;

съезды с дорог I—III категорий и въезды на них осуществляют с устройством переходно-скоростных полос;

ширину проезжей части на всем протяжении левоповоротных съездов принимают 5,5 м, а на правоповоротных — 5,0 м. Ширину обочин с внутренней стороны закруглений на съездах принимают не менее 1,5 м, а с внешней стороны — 3,0 м;

продольные уклоны на соединительных съездах развязок принимают не более 40%. Радиусы вертикальных выпуклых и вогнутых кривых устанавливают в зависимости от величины расчетной скорости.

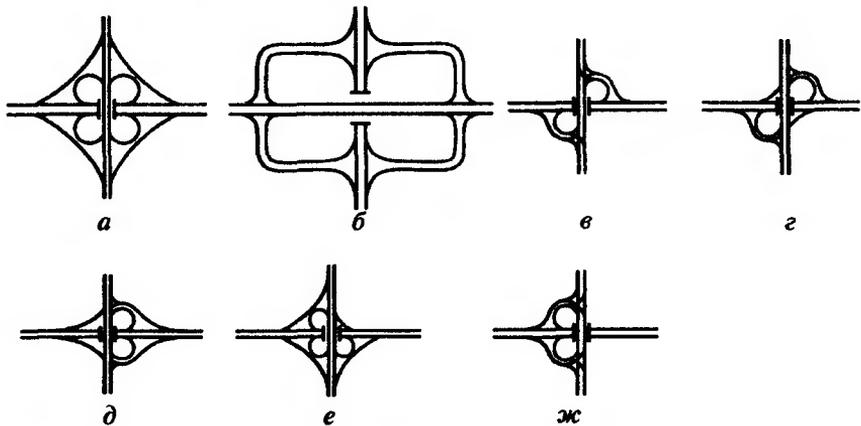
К развязкам движения в разных уровнях предъявляют обязательное требование обеспечения непрерывного, безопасного и комфортабельного движения транспортных потоков с расчетными скоростями. В отечественной практике проектирования автомагистралей и дорог высоких категорий получили распространение в основном транспортные пересечения в двух и значительно реже в трех и четырех уровнях. Наиболее часто устраивают развязки в двух уровнях как наиболее дешевые и в большинстве случаев радикально решающие проблему непрерывного и безопасного движения транспортных потоков.

Многообразие местных условий на пересечениях и примыканиях (особенности плана и профиля пересекающихся автомобильных дорог, углы пересечений или примыканий, ситуационные особенности мест пересечений, категории пересекающихся дорог, характер распределения перспективных интенсивностей движения по направлениям, топографические, инженерно-геологические, гидрогеологические условия и т.д.) предопределяет большое разнообразие возможных типов транспортных узлов в разных уровнях. В настоящее время

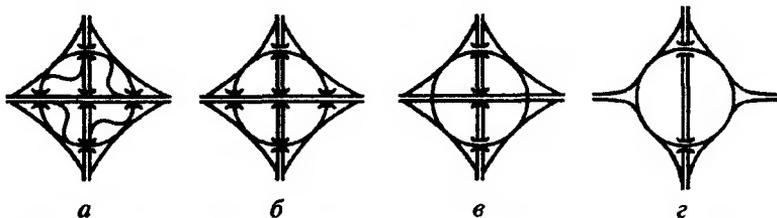
известно около 200 схем развязок автомобильных дорог в разных уровнях.

Пересечения и примыкания в разных уровнях по начертанию в плане и способам организации движения на них делят на следующие группы:

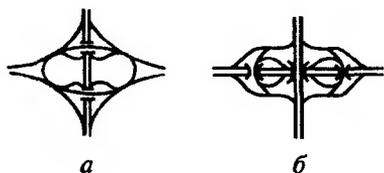
- клеверообразные (рис. 20.3);
- кольцевые (рис. 20.4);
- петлеобразные (рис. 20.5);
- крестообразные (рис. 20.6);
- ромбовидные (рис. 20.7);
- сложные пересечения с полупрямыми и прямыми (директивно-направленными) левоповоротными съездами (рис. 20.8);
- примыкания (рис. 20.9).



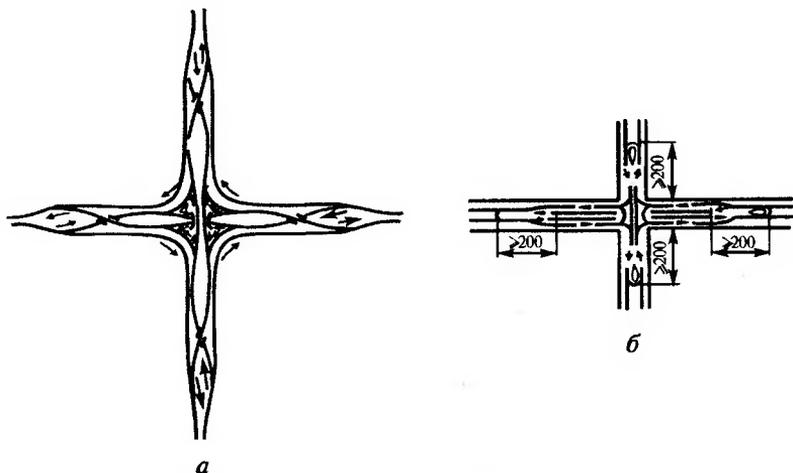
Р и с. 20.3. Схема клеверообразных транспортных пересечений в двух уровнях:
a — «полный клеверный лист»; *б* — «обжатый клеверный лист»; *в, г, д, е, ж* — «неполный клеверный лист»



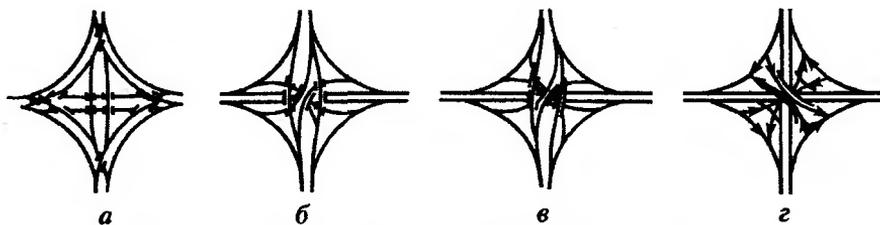
Р и с. 20.4. Схемы кольцевых транспортных пересечений в двух уровнях:
a — турбинный тип; *б* — распределительное кольцо с пятью путепроводами; *в* — распределительное кольцо с тремя путепроводами; *г* — распределительное кольцо с двумя путепроводами



Р и с. 20.5. Схемы петлеобразных транспортных пересечений в двух уровнях:
a — «двойная петля»; *б* — «улучшенная двойная петля»

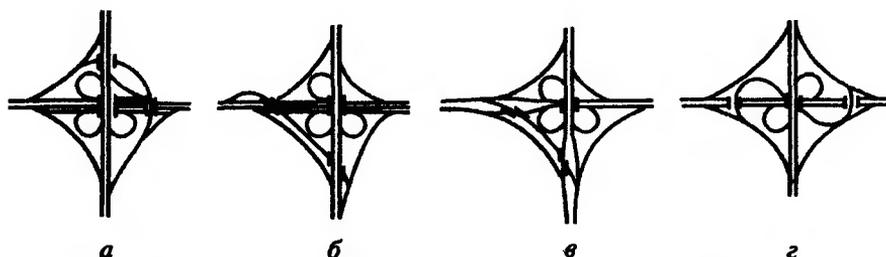


Р и с. 20.6. Схема крестообразных транспортных пересечений в двух уровнях:
a — пересечение с пятью путепроводами типа «крест»; *б* — пересечение с отнесенными левыми поворотами



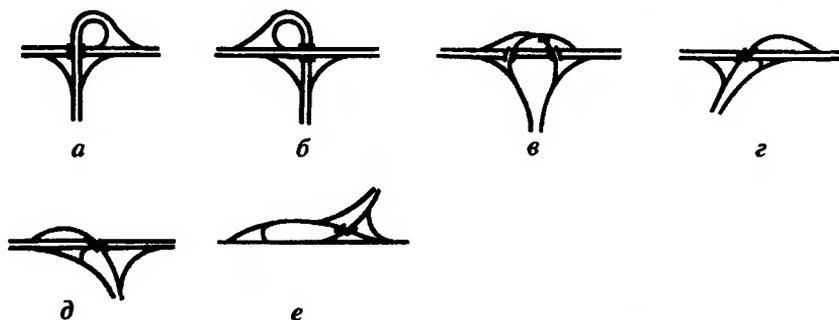
Р и с. 20.7. Ромбовидные транспортные пересечения в разных уровнях:
a — с прямыми левыми поворотами; *б*, *в* — с полупрямыми левыми поворотами; *г* — в четырех уровнях

В практике отечественного автодорожного строительства наибольшее распространение получили клеверообразные пересечения автомобильных дорог в разных уровнях. При этом различают развязки типа «полный клеверный лист», обеспечивающие полную развязку движения по всем направлениям (см. рис. 20.3, *a*), «обжатый кле-



Р и с. 20.8. Схема сложных транспортных пересечений в двух уровнях:

a — с одним полупрямым левоповоротным съездом; *б, в* — с одним прямым левоповоротным съездом; *г* — с двумя полупрямыми левоповоротными съездами



Р и с. 20.9. Схемы транспортных примыканий в двух уровнях:

a, б — полные примыкания типа «труба»; *в* — полное примыкание с двумя полупрямыми левоповоротными съездами; *г, д, е* — неполные примыкания

верный лист», устраиваемые в стесненных условиях городской застройки (см. рис. 20.3, *б*), и «неполный клеверный лист», допускающие пересечения в одном уровне левоповоротных транспортных потоков на второстепенных направлениях (см. рис. 20.3, *в—ж*).

К достоинствам клеверообразных пересечений относят: исключение конфликтных точек пересечения транспортных потоков по всем либо по основным направлениям при двух пересекающихся магистралях; обеспечение относительной безопасности движения; сравнительно невысокую стоимость строительства одного путепровода и соединительных съездов.

Однако клеверообразным пересечениям автомобильных дорог свойственны и некоторые недостатки, ограничивающие сферу их применения: большие площади, занимаемые развязками; значительные перепробеги левоповоротных транспортных потоков и потоков,

осуществляющих разворот; необходимость дополнительных инженерных мероприятий для обеспечения безопасного движения пешеходов.

Кольцевые пересечения автомобильных дорог (см. рис. 20.4) характеризуются наибольшей простотой организации движения, однако требуют строительства от двух до пяти путепроводов, а также большой площади отчуждения земель.

Петлеобразные пересечения, например «двойная петля» (рис. 20.5, *а*) или «улучшенная двойная петля» (рис. 20.5, *б*), устраивают на пересечениях автомагистралей или магистральных улиц с дорогами второстепенного значения. К недостаткам этого типа развязок относят: необходимость строительства двух путепроводов, повышенную аварийность, связанную с тем, что транспортные потоки с главной магистрали вливаются в потоки второстепенного направления не с правой, а с левой стороны.

В стесненных условиях городской застройки применяют крестообразные пересечения в разных уровнях, типа «крест» (рис. 20.6, *а*), пересечения в двух уровнях с отнесенными левыми поворотами (рис. 20.6, *б*) и т.д. Пересечения типа «крест» с пятью путепроводами применяют в стесненных условиях при пересечении равнозначных магистралей с мощными транспортными потоками. Кроме малых площадей занимаемых земель, пересечения такого типа обеспечивают и минимальные перепробеги лево- и правоповоротного движения, однако требуют сооружения пяти путепроводов (правда, меньшей ширины, чем для развязок типа «клеверный лист») и не обеспечивают возможности разворотов в пределах транспортного узла. Пересечение в двух уровнях с отнесенными левыми поворотами нередко применяют в условиях сложившейся городской застройки на главных магистралях с относительно небольшими размерами левоповоротного движения.

Ромбовидные развязки (см. рис. 20.7) устраивают, как правило, на пересечениях равнозначных городских магистралей со значительными размерами движения по всем направлениям. Занимая умеренную площадь, такие развязки практически исключают перепробеги для лево- и правоповоротных транспортных потоков, однако требуют строительства большого числа путепроводов, что определяет их весьма высокую стоимость.

Сложные пересечения с полупрямыми и директивно-направленными левоповоротными съездами устраивают на пересечениях автомагистралей при наличии одного (см. рис. 20.8, *а*, *б*, *в*) или нескольких (см. рис. 20.8, *г*) мощных левоповоротных транспортных потоков, когда строительство обычного левоповоротного съезда (см. рис. 20.3,

а) приводит к неоправданным потерям, связанным с перепробегами автомобилей. Сокращение или исключение перепробегов достигается путем устройства соответственно полупрямых либо директивно-направленных левоповоротных съездов. Однако это определяет заметное увеличение строительной стоимости транспортной развязки в связи с необходимостью строительства двух дополнительных путей-путеводов.

Примыкания автомобильных дорог в разных уровнях различают полные (см. рис. 20.9, а, б, в), обеспечивающие развязку движения по всем направлениям, и неполные, имеющие или зоны пересечения транспортных потоков в одном уровне (см. рис. 20.9, г, д), или зоны переплетения (рис. 20.9, е). В практике отечественного дорожного строительства наибольшее распространение получили примыкания в разных уровнях типа «труба» (см. рис. 20.9, а, б). Этот тип примыкания обеспечивает развязку движения по всем направлениям при необходимости отчуждения сравнительно небольших площадей земель и имеет относительно невысокую строительную стоимость. Однако примыкание типа «труба» не обеспечивает возможности разворота.

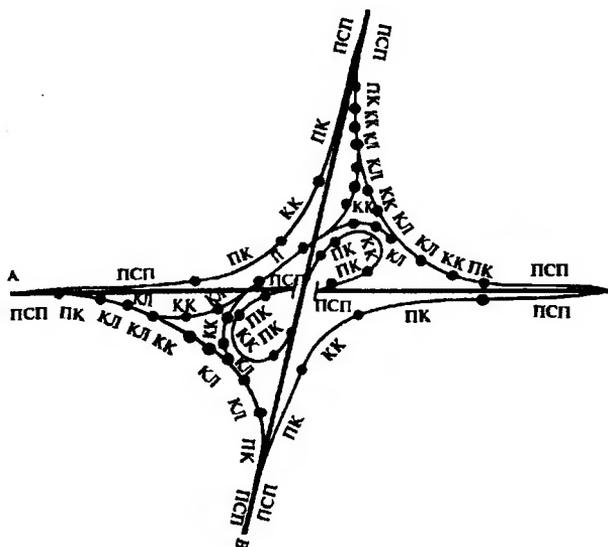
20.3. Элементы пересечений автомобильных дорог в разных уровнях

Любое пересечение автомобильных дорог сколь угодно сложного очертания в плане может быть представлено сочетанием ограниченного числа геометрических элементов (рис. 20.10), классификация которых разработана в Союздорпроекте.

Переходно-скоростная полоса (ПСП). Элементы пересечений рассчитывают на меньшие скорости движения автомобилей (см. § 20.1), чем на самих пересекающихся дорогах. Для осуществления безопасного въезда автомобилей на пересечение, а также для выезда с пересечения на дорогу устраивают дополнительную полосу, называемую *переходно-скоростной*, на длине которой происходит торможение автомобилей до безопасной скорости въезда на пересечение либо ускорение автомобилей до скорости транспортного потока на дороге при выезде с пересечения. Длины переходно-скоростных полос определяют из условия торможения (или разгона) от скорости v_1 , на автомагистрали до скорости v_2 , входа на пересечение:

$$L = \frac{v_1^2 - v_2^2}{26a},$$

где v_1, v_2 — скорости на автомагистрали и на входе на пересечение при торможении или на выходе с пересечения при разгоне соответствен-



Р и с. 20.10. Геометрические элементы пересечений автомобильных дорог в разных уровнях:

ПСП — переходно-скоростная полоса; ПК — переходная кривая; КЛ — клотоида; КК — круговая кривая; П — прямая

но, км/ч; a — ускорение автомобилей, принимаемое в пределах $0,8—1,2 \text{ м/с}^2$ при разгоне и $1,75—2,5 \text{ м/с}^2$ при торможении.

Согласно действующим строительным нормам и правилам, длину переходно-скоростных полос полной ширины (при нулевом продольном уклоне) принимают:

на дорогах I и II категорий для разгона — 180 м; для торможения — 100 м; отгон уширения — 80 м;

на дорогах III категории для разгона — 130 м; для торможения — 75 м; отгон уширения — 60 м.

Переходная кривая (ПК). Для обеспечения плавного перехода автомобиля от прямого участка переходно-скоростной полосы ($R = \infty$) к участку соединительного съезда с максимальной кривизной ($R = R_k$) и, наоборот, от участка соединительного съезда до переходно-скоростной полосы, для постепенного изменения центростремительного ускорения применяют переходные кривые. В отличие от закруглений основных участков автомагистралей, где в качестве переходных кривых, как правило, используют клотоиду, характеризуемую линейным законом изменения кривизны и нарастания центростремительного ускорения и отвечающую условиям движения по ней автомобилей с постоянными (расчетными) скоростями, на участках ответвлений и примыка-

ний развязок движения в разных уровнях применяют особые типы переходных кривых, законы изменения кривизны которых наилучшим образом отвечают условиям движения по ним автомобилей с переменными скоростями. Эти типы переходных кривых будут подробно рассмотрены далее.

Клотоида (КЛ) также находит применение при проектировании соединительных съездов транспортных развязок, главным образом правоповоротных и директивно-направленных.

Круговая кривая (КК). Участки соединительных съездов с максимальной кривизной описывают в плане по круговым кривым. При этом автомобили в пределах этих участков движутся с минимальной постоянной скоростью.

Прямая (П). Как и при проектировании плана основных участков автомобильных дорог, при трассировании правоповоротных и директивно-направленных соединительных съездов прямые также нередко используют как самостоятельный элемент трассы. При этом прямая сопрягается со смежными круговыми кривыми обычно посредством клотоид.

Наиболее сложными и ответственными местами развязок движения в разных уровнях являются зоны ответвлений и примыканий право- и левоповоротных соединительных съездов между пересекающимися автомагистралями (рис. 20.11). Конструктивные решения участков ответвлений и примыканий во многом определяют комфортабельность и безопасность движения, пропускную способность и генеральные размеры всей развязки в целом.

Зона транспортной развязки (ЗТР) определяется положением створов начала отгона уширения.

Зона ответвления (ЗО) — участок на съезде с автомагистральной от створа начала отгона уширения переходной скорости до створа разделения кромок проезжих частей.

Зона примыкания (ЗП) — участок въезда на автомагистраль от створа конца разделения кромок до створа начала отгона уширения переходной скорости.

Участок ответвления (УО) — участок на съезде с автомагистральной от створа начала отгона уширения переходной скорости до створа начала разделения кромок проезжих частей.

Участок примыкания (УП) — участок на въезде на автомагистраль от створа начала разделения кромок до створа начала отгона уширения переходной скорости.

Отгон уширения (ОУ) — участок перехода от неуширенной проезжей части автомагистрали до начала переходной скорости полной ширины.

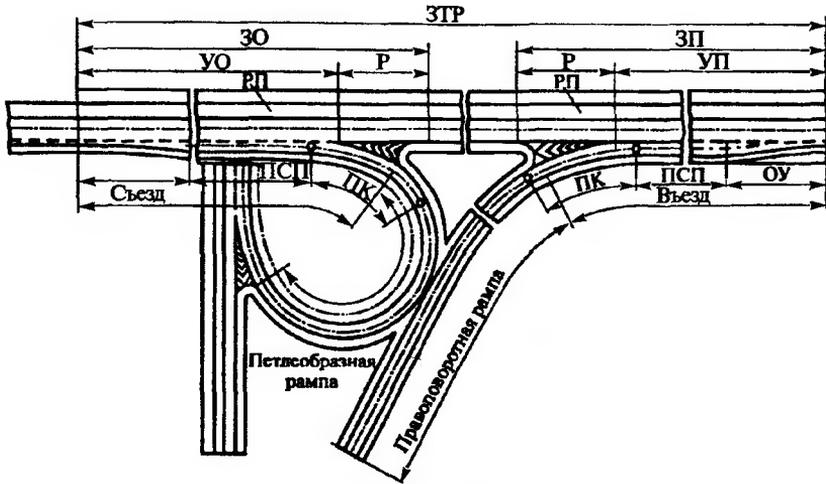


Рис. 20.11. Элементы пересечений на ответвлениях и примыканиях:

ЗТР — зона транспортной развязки; ЗО — зона отвлечения; ЗП — зона примыкания; УП — участок примыкания; РП — разделительная полоса; ОУ — отгон уширения; Р — участок разделения кромок и бровок

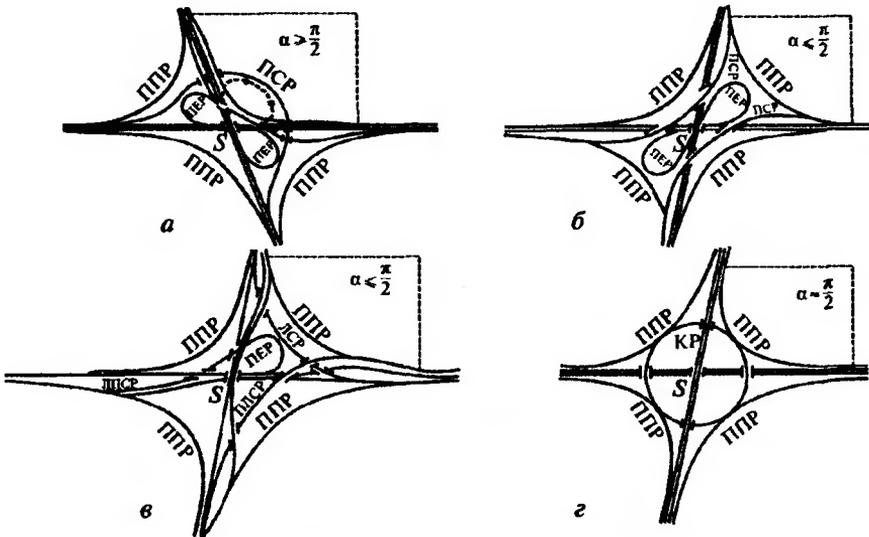


Рис. 20.12. Соединительные съезды сложных транспортных узлов

Участок разделения кромок и бровок (Р) — участки съездов и въездов, в пределах которых осуществляется разделение кромок и бровок автомагистрали и соединительного съезда.

Планировочные решения развязок движения в разных уровнях включают определенный набор соединительных съездов между пересекающимися автомобильными дорогами. По В.А.Федотову, в зависимости от вида осуществляемых маневров и характера очертания в плане различают следующие виды соединительных съездов (рис. 20.12):

для движения при смене направлений направо — правоповоротные съезды (рампы) — ППР;

для движения при смене направлений налево — петлеобразные съезды (ПЕР); правосторонние съезды (ПСР); левосторонние съезды (ЛСР); право-левосторонние съезды (ПЛСР); лево-правосторонние съезды (ЛПСР); кольцевые съезды (КР).

Использование перечисленных типов соединительных съездов (рамп) дает возможность построения развязки практически любой плановой конфигурации. Например, применение четырех съездов типа ППР и четырех съездов типа ПЕР приводит к классической схеме «клеверного листа» и т.д.

20.4. Анализ условий пересечений при проектировании транспортных развязок

В соответствии с технологической последовательностью комплексного проектирования пересечений и примыканий автомобильных дорог в разных уровнях решают следующие основные задачи:

сопряжение геометрических элементов плана транспортных узлов в осях и кромках проезжих частей;

установление положения проектной линии продольного профиля по соединительным съездам;

решение вертикальной планировки;

вычисление объемов земляных и укрепительных работ, работ по строительству дорожной одежды и искусственных сооружений;

определение сметной стоимости строительства;

определение транспортно-эксплуатационных расходов и дисконтных затрат;

графическое, табличное и текстовое оформления проектных материалов.

При выборе типа развязки обычно используют следующие данные:

категории пересекающихся дорог;

картограмму интенсивностей и состава движения по направлениям на первую очередь строительства и на перспективу;

план прилегающей к пересечению территории в координатах и соответствующие ему цифровую и математическую модели местности;

материалы, характеризующие геологические и гидрогеологические условия прилегающей к пересечению местности, а также соответствующие цифровые и математические модели геологического и гидрогеологического строений местности;

данные по плану, глубинам проложения и техническим характеристикам подземных коммуникаций;

данные о пространственной геометрии пересекающихся дорог (план, продольные и поперечные профили);

данные о конструкции дорожной одежды на пересекающихся дорогах;

данные об условиях и размерах движения пешеходов;

прочие требования, вытекающие из особенностей местных условий.

На основе перечисленных данных проектируют схему организации движения на транспортном пересечении с учетом наилучших уровней удобства и безопасности движения, обеспечения необходимой пропускной способности, а также минимальной стоимости строительства и транспортно-эксплуатационных расходов. Важные требования к выбору типа развязок предъявляют со стороны архитектурно-композиционной увязки сооружения с прилегающей к узлу застройкой и окружающим ландшафтом.

На выбор типа развязок, планировочные и конструктивные решения их элементов оказывают существенное влияние следующие основные факторы.

Категория пересекающихся дорог. При выборе схемы транспортного узла стремятся прежде всего обеспечить непрерывность движения по направлениям пересекающихся дорог более высоких категорий.

С категориями пересекающихся дорог связаны расчетные скорости движения на соединительных съездах, которые определяют допустимые радиусы закруглений в плане левоповоротных и правоповоротных соединительных съездов, а также допустимые радиусы вертикальных кривых продольных профилей по соединительным съездам. В зависимости от категорий пересекающихся дорог назначают длину переходно-скоростных полос на съездах и въездах, а также длину отгона уширений.

И наконец, связанные с категориями пересекающихся дорог соотношения скоростей на дорогах и на участках соединительных съездов с максимальной кривизной в плане требуют таких планировочных и конструктивных решений, при которых были бы обеспечены необходимые уровни удобства и безопасности движения.

Таким образом, только лишь изменение категорий пересекающихся дорог при равных прочих условиях может существенно повлиять на планировочные решения транспортного узла и привести к иным конструктивным решениям.

Интенсивность и состав движения. Интенсивность движения, распределение ее по направлениям и состав движения оказывают определяющее влияние на выбор типа пересечения или примыкания в разных уровнях, а также на планировочные и конструктивные решения его элементов. Одно из основных требований, предъявляемых к развязкам движения в разных уровнях, — бесперебойность работы в любые периоды года, месяца, дня недели и часа суток. Поэтому в транспортных расчетах принимают максимальные размеры движения по всем направлениям в час «пик» для наиболее напряженного сезона года и дня недели.

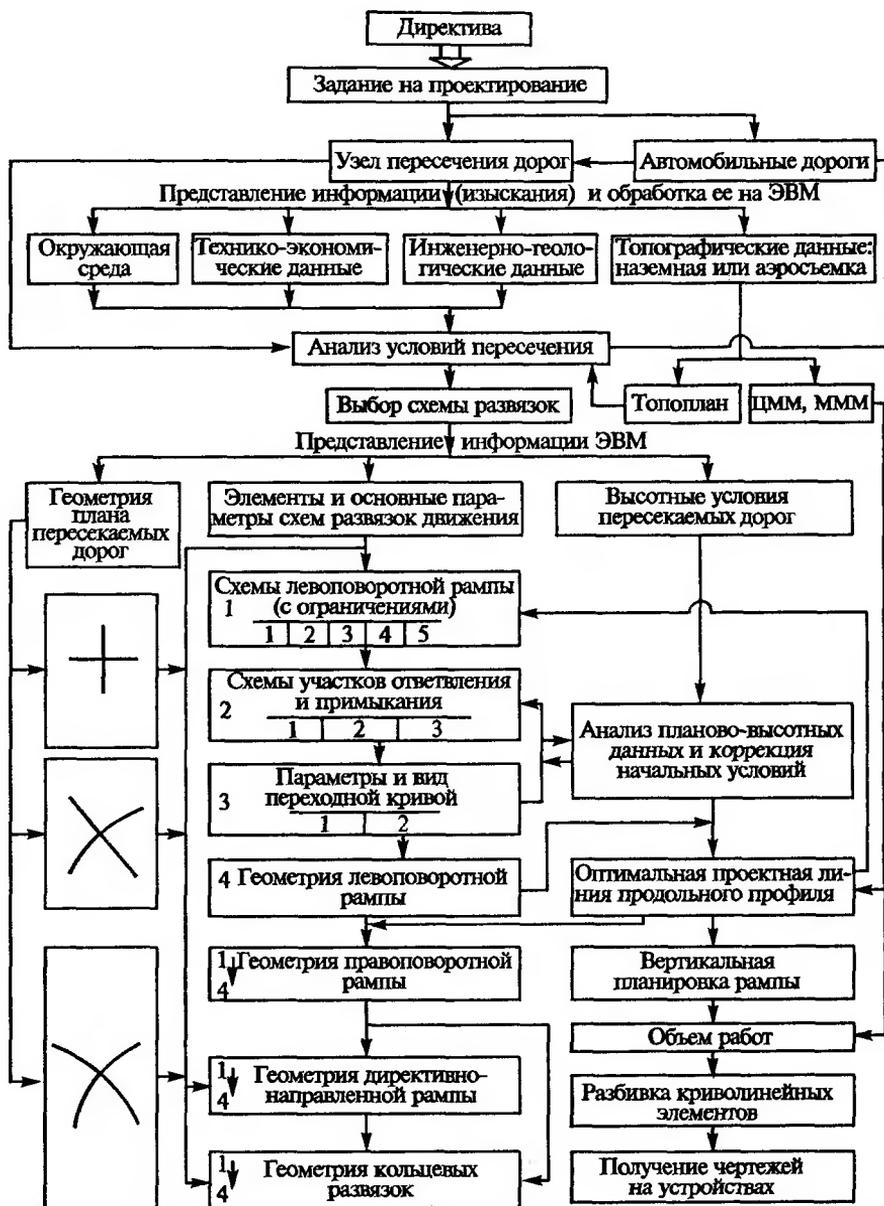
Для выбора схемы пересечения или примыкания удобно пользоваться графическими изображениями интенсивности движения в виде картограмм транспортных потоков с указанием их размеров в приведенных единицах (рис. 20.13). Для этой цели фактическую интенсивность движения в физических единицах приводят к интенсивности однородного транспортного потока, представленного лишь легковыми автомобилями:

$$N_{\text{пр}} = \sum_{i=1}^n a_i N_i,$$

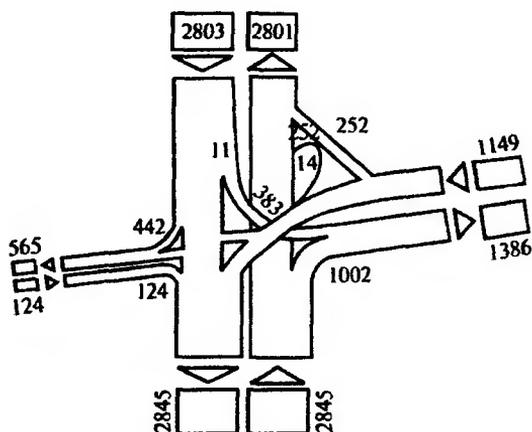
где N_i — интенсивность движения автомобиля i -й марки, авт/ч; a_i — коэффициент приведения, определяемый для каждого вида транспортных средств соответственно (см. § 1.5, табл. 1.1).

Картограммы интенсивности движения, построенные на различные расчетные годы, позволяют решать вопросы стадийности строительства, когда по мере роста интенсивности предусматривают возможность превращения развязок неполного типа в узлы пересечений, обеспечивающие полную развязку движения по всем направлениям без конфликтных точек (рис. 20.14).

План прилегающей территории. Ситуационные особенности прилегающей к транспортному узлу территории (сложившаяся городская застройка, железные дороги, территории народно-хозяйственных объектов, ценные сельскохозяйственные угодья и т.д.) могут сильно



Р и с. 20.13. Технологическая схема комплексного автоматизированного проектирования развязок движения на пересечениях и примыканиях автомобильных дорог в разных уровнях



Р и с. 20.14. Картограмма интенсивности движения на транспортном пересечении автомобильных дорог в час «пик»

деформировать конфигурацию соединительных съездов в плане при соответствующем ухудшении физических параметров движения транспортных потоков и связанных с ними уровней удобства и безопасности движения. Если эти параметры выходят за пределы допустимых значений, требуется изменение типа развязки с использованием решений, приемлемых в рамках комплекса конкретных ситуационных ограничений.

Рельеф прилегающей к пересечению местности не только во многом определяет объемы земляных работ, но и в ряде случаев может оказать влияние на выбор типа главного искусственного сооружения развязки (путепровод, тоннель).

Геологические и гидрогеологические условия. Геологические и гидрогеологические особенности местности, прилегающей к транспортному узлу, нередко предопределяют выбор типа искусственного сооружения и подходов к нему (путепровод или тоннель, насыпь или эстакада и т.д.). Геологические и гидрогеологические условия оказывают влияние на глубину фундирования опор путепроводов, на выбор типа пролетных строений (разрезное, неразрезное), конструкцию подпорных стенок, определяют необходимость организации водоотвода в тоннелях и т.д. Все это в конечном итоге влияет на сметную стоимость строительства развязки в целом.

Подземные коммуникации. Учет расположения подземных коммуникаций приобретает особое значение при проектировании развязок движения в разных уровнях в условиях сложившихся городских застроек, характеризуемых густой сетью магистральных трубопрово-

дов, кабелей, воздушных коммуникаций и т.д. В этих условиях во многих случаях вариант строительства путепровода оказывается предпочтительнее тоннеля.

Пространственная геометрия пересекающихся дорог оказывает в ряде случаев определяющее влияние на выбор схемы развязки и основные планировочные и конструктивные решения ее элементов. Углы пересечения автомобильных дорог, условия пересечения (когда одна или обе пересекающиеся магистрали расположены на кривых в плане), продольные и поперечные профили автомагистралей являются жесткими техническими ограничениями, в рамках которых требуется находить решения, отвечающие всем действующим техническим нормам. Эта задача часто оказывается неразрешимой при традиционной технологии проектирования. Программные обеспечения современных САПР-АД, как правило, дают возможность строгого аналитического решения развязок движения практически при любых сочетаниях плана и профиля пересекающихся дорог.

Пешеходное движение. Проблема учета при проектировании пересечений и примыканий в разных уровнях безопасного движения пешеходов обычно возникает в городах. При наличии на транспортном узле пешеходных переходов в одном уровне исключается непрерывность движения транспортных потоков и заметно снижается эффективность работы развязок движения в целом. В таких случаях предусматривают дополнительные инженерные мероприятия, заключающиеся в устройстве внеуличных пешеходных переходов.

На выбор того или иного типа пересечения или примыкания в разных уровнях оказывает влияние также много других факторов, таких как размеры инвестиций, транспортно-эксплуатационные расходы, дисконтные затраты, эффективность инвестиций, соображения возможности стадийного строительства без бросовых затрат, пропускная способность узла, скорости транспортных потоков, уровни удобства и безопасность движения, перепробеги левоповоротного движения и т.д.

20.5. Пропускная способность развязок в разных уровнях и оценка безопасности движения

Одним из важнейших критериев, предопределяющих выбор того или иного типа пересечения в разных уровнях, является пропускная способность транспортного узла. Под *пропускной способностью пересечения* понимают максимально возможное количество автомобилей, поступающее на транспортный узел и выходящее за его пределы по всем направлениям в единицу времени. Пропускная способность

развязок в целом определяется пропускной способностью их отдельных участков и элементов. Основными элементами, определяющими пропускную способность транспортного узла в целом, являются: участки слияния транспортных потоков при въезде с соединительных съездов на основные полосы движения; участки совмещенного транзитного и левоповоротного движения перед выездом на съезд и левоповоротного после выезда с соединительного съезда на пересечениях типа «клеверный лист»; участки автомагистралей за примыканием правоповоротных соединительных съездов; участки выхода с основных полос на правоповоротные соединительные съезды.

Наиболее узкими местами транспортных узлов в разных уровнях являются участки выезда с соединительных съездов на основные полосы пересекающихся автомагистралей, которые определяют не только пропускную способность пересечений, но также и уровни удобства и безопасность движения. При интенсивности по правой внешней полосе автомагистрали, близкой к максимальной пропускной способности, условия движения на съезде заметно осложняются, возникают очереди автомобилей, создающие заторы на дороге.

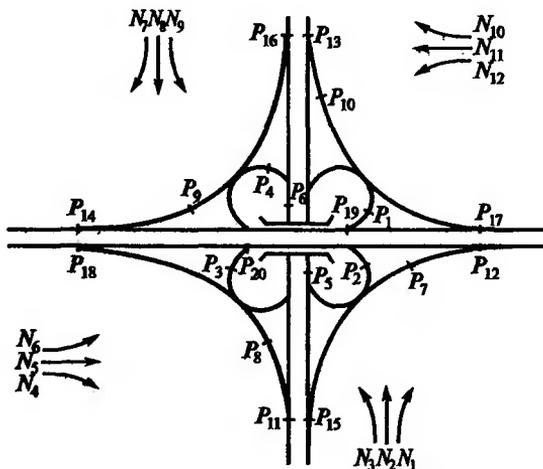
Выезд на основную полосу движения может происходить при четырех режимах движения транспортных потоков: вливание с ходу (уровень удобства А); вливание с притормаживанием (уровень удобства Б); вливание автомобилей отдельными пачками с задержками на ожидание (уровень удобства В); вливание автомобилей в условиях образования очередей и заторов на съезде (уровень удобства Г).

По данным наблюдений А.П. Шевякова, значения пропускной способности въездов для среднестатистического состава движения, характерного для дорог России, представлены в табл. 20.2.

Т а б л и ц а 20.2. Пропускная способность въездов развязок движения

Уровень удобства	Интенсивность движения по правой полосе главной дороги, авт/ч	Пропускная способность въезда, авт/ч	
		при наличии переходно-скоростной полосы	без переходно-скоростной полосы
А	100	300	850
	300	330	625
Б	500	790	500
	700	740	425
В	900	700	325
Г	1000	610	220

Для оценки характеристик движения на транспортных пересечениях при различном распределении интенсивностей по направлени-



Р и с. 20.15. Схема к расчету пропускной способности пересечений в разных уровнях (на примере «клеверного листа»)

ям проф. В.В. Сильянов использовал метод математического компьютерного имитационного моделирования транспортных потоков, в основе которого лежат характерные расчетные схемы слияния транспортных потоков. Задаваясь различной плановой конфигурацией съездов, различными параметрами переходно-скоростных полос, можно всесторонне оценить их влияние на условия движения транспортных потоков на участках съездов.

При оценке пропускной способности всего пересечения в целом решают экстремальную задачу линейного программирования. При этом функцию цели представляют в следующем виде (рис. 20.15):

$$P = N_1 + N_2 + \dots + N_{12} \Rightarrow \max, \quad (20.1)$$

при выполнении следующих ограничений:

$$\begin{aligned} N_3 &\leq P_1; \quad N_2 + N_3 + N_6 \leq P_5; \quad N_7 \leq P_9; \\ N_6 &\leq P_2; \quad N_8 + N_9 + N_{12} \leq P_6; \quad N_{10} \leq P_{10}; \\ N_9 &\leq P_3; \quad N_1 \leq P_7; \quad N_8 + N_4 + N_{12} \leq P_{11}; \\ N_{12} &\leq P_4; \quad N_4 \leq P_8; \quad N_1 + N_5 + N_6 \leq P_{13}; \quad N_7 + N_{11} \leq P_{14}; \\ N_1 + N_2 + N_3 &\leq P_{15}; \quad N_4 + N_5 + N_6 \leq P_{18}; \\ N_7 + N_8 + N_9 &\leq P_{16}; \quad N_3 + N_{11} \leq P_{19}; \\ N_{10} + N_{11} + N_{12} &\leq P_{17}; \quad N_9 + N_5 \leq P_{20}, \end{aligned}$$

где P — пропускная способность пересечения в целом; N_1, \dots, N_{12} — интенсивности движения по соответствующим направлениям; $P_1, \dots,$

P_{20} — пропускные способности соответствующих элементов пересечения.

Задача расчета пропускной способности развязок движения в разных уровнях сводится к отысканию максимума функции (20.1) в рамках перечисленных ограничений на основе решения задачи линейного программирования (симплекс-метод). Пропускную способность при этом вычисляют для многих вариантов планировки развязки и вариантов конструктивных решений отдельных ее элементов.

Одним из важнейших показателей, предопределяющих выбор той или иной схемы развязок в разных уровнях (в частности, полной и неполной), является безопасность движения на транспортном пересечении.

Основными факторами, влияющими на безопасность движения на пересечениях как в одном, так и в разных уровнях, являются:

интенсивность движения на пересекающихся направлениях. Это один из главных факторов, определяющих вероятность появления аварийной ситуации на пересечении. При этом аварийность оказывается тем более высокой, чем больше суммарная интенсивность движения на пересекающихся направлениях;

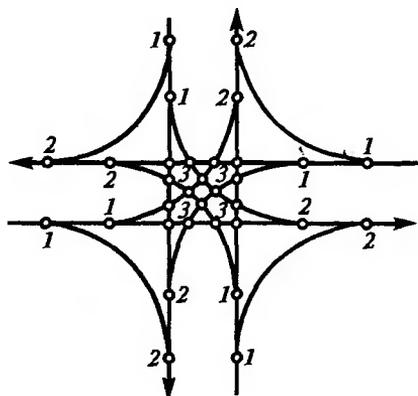
состав движения. Чем более неоднороден по составу транспортный поток, тем больше аварийность на транспортном пересечении;

углы пересечения дорог, создающие различные условия движения для разных направлений на пересечении, определяя одно наиболее опасное направление движения;

планировочное решение пересечений. Значения радиусов закруглений лево- и правоповоротного движения, наличие или отсутствие переходно-скоростных полос в значительной степени влияют на условия и безопасность движения на пересечении;

количество и тип конфликтных точек. В общем случае на пересечении в одном уровне можно выделить 32 конфликтные точки (рис. 20.16): 8 конфликтных точек разделения потоков (1), 8 точек слияния (2) и 16 конфликтных точек пересечения транспортных потоков (3). Из них наиболее опасными являются конфликтные точки пересечения (3), меньшей степенью опасности характеризуются точки разделения потоков (1) и наименьшей опасностью создания аварийных ситуаций характеризуются точки слияния (2).

Строительство пересечения в разных уровнях, например, по типу полного «клеверного листа» сразу же исключает 16 наиболее опасных конфликтных точек (3), резко снижая вероятность возникновения аварийных ситуаций на пересечении. С другой стороны, строительство неполной транспортной развязки, допускающей пересечения



Р и с. 20.16. Схема расположения конфликтных точек на пересечении в одном уровне:

1 — точки разветвления; 2 — точки слияния;
3 — точки пересечения

транспортных потоков в одном уровне на второстепенных направлениях, приводит к появлению конфликтных точек пересечения (3).

Общее количество дорожно-транспортных происшествий на транспортное пересечение за один год может быть оценено по формуле проф. Е.М. Лобанова:

$$G = \sum_{i=1}^n K_i M_i N_i \frac{25}{K_r} 10^{-7}, \quad (20.2)$$

где n — число конфликтных точек; K_i — относительная аварийность (количество дорожно-транспортных происшествий на 10 млн прошедших автомобилей) в i -й конфликтной точке транспортной развязки в разных уровнях, определяемая по табл. 20.3) а на второстепенных направлениях неполных транспортных развязок — по табл. 20.4; M_i , N_i — интенсивности движения взаимодействующих в i -й конфликтной точке транспортных потоков, авт/сут; K_r — коэффициент годовой неравномерности движения:

Месяцы года	I	II	III	IV	V	VI
K_r	0,025	0,03	0,045	0,07	0,10	0,15
Месяцы года	VII	VIII	IX	X	XI	XII
K_r	0,165	0,14	0,12	0,10	0,035	0,02

Для вновь проектируемых дорог при заданных размерах среднегодовой среднесуточной интенсивности движения принимают $K_r = 0,0834$.

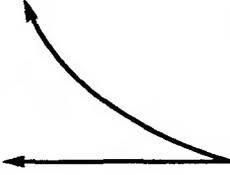
Степень опасности различных типов развязок движения в разных уровнях оценивают по формуле:

$$K_a = \frac{GK_r 10^{-7}}{(M + N)25}$$

где G — количество дорожно-транспортных происшествий на пересечении данного типа за год, определяемое по формуле (20.2); M — суммарная интенсивность движения автомобилей по главной дороге, авт/сут; N — то же, для второстепенной дороги, авт/сут.

Для вновь проектируемых дорог выбирают такой тип пересечения в разных уровнях и предусматривают такие планировочные и конструктивные решения его элементов, при которых значение K будет меньше или равно 5, т.е. число дорожно-транспортных происшествий на транспортном узле не должно превышать 5 на 10 млн прошедших автомобилей.

Таблица 20.3. Относительная аварийность в конфликтных точках развязок движения

Тип съезда	Направление движения	Характеристика съезда	Относительная аварийность	
			Переходно-скоростные полосы отсутствуют	Переходно-скоростные полосы имеются
Левоповоротные съезды пересечений типа «клеверный лист»		$R = 30-45$ м. Переходная кривая* $R = 45-60$ м. Переходная кривая* R более 60 м. Переходная кривая	0,00065 0,0003 0,0002	0,00035 0,0002 0,0001
		$R = 30-45$ м. Переходная кривая* $R = 45-60$ м. Переходная кривая рассчитана на постоянную скорость. Съезд на спуске R более 60 м. Переходная кривая ПЕРС***. Съезд на спуске	0,0019 0,0009 0,0006**	0,0001 0,0001 0,0005**
Правоповоротные и полупрямые левоповоротные съезды		$R = 45-60$ м. Переходная кривая* R более 60 м. Переходная кривая	0,00025 0,0002	0,00015 0,0001

Тип съезда	Направление движения	Характеристика съезда	Относительная аварийность	
			Переходно-скоростные полосы отсутствуют	Переходно-скоростные полосы имеются
Правоповоротные и полупрямые левоповоротные съезды		$R = 45-60$ м. Переходная кривая, рассчитанная на постоянную скорость	0,0005	0,0003
		$R = 60-120$ м. Переходная кривая ПЕРС***	0,00035	0,0002
		R более 120 м. Переходная кривая, рассчитанная на постоянную скорость	0,00025	0,00015
Полупрямые левоповоротные съезды		Разделение двух второстепенных поворачивающих потоков в процессе движения по съезду	0,0002	0,00015
		Слияние двух второстепенных поворачивающих потоков в процессе движения по съезду	0,00015	0,0001

*При отсутствии переходной кривой аварийность принимается в 5 раз больше.

**Для съездов с $R = 45-60$ м, рассчитанных на постоянную скорость, но расположенных на подъеме, берется это же значение относительной аварийности.

***ПЕРС — переходная кривая, рассчитанная на переменную скорость движения.

Таблица 20.4. Относительная аварийность в конфликтных точках на второстепенных направлениях неполных транспортных развязок

Взаимодействие потоков	Необорудованное пересечение	Канализированное пересечение
	Относительная аварийность	
Разделение двух потоков	0,0015	0,0010
Пересечение двух левоповоротных потоков	0,0020	0,0005
Слияние двух поворачивающих потоков	0,0025	0,0012

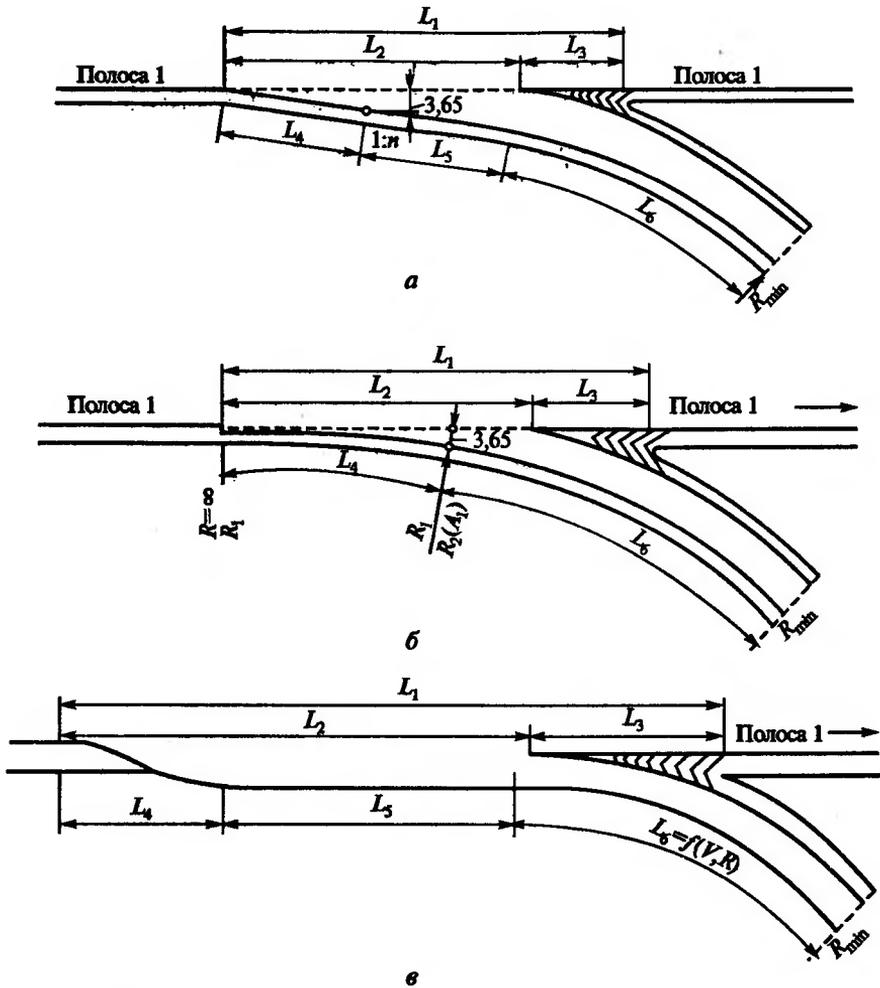
20.6. Принципы конструктивного решения участков ответвлений и примыканий на съездах развязок движения

Наиболее сложными и ответственными элементами развязок движения в разных уровнях являются участки ответвлений и примыканий право- и левоповоротных соединительных съездов между пересекающимися дорогами, во многом определяющие уровни удобства и безопасность движения, генеральные размеры транспортных узлов в целом и их пропускную способность.

Планировочные решения участков ответвлений или примыканий соединительных съездов включают переходно-скоростные полосы и последующие переходные кривые. Несмотря на значительный опыт эксплуатации съездов различной конфигурации, до сих пор не установлены единые требования по их наилучшему конструктивному решению. В довоенной практике строительства развязок движения в разных уровнях находили широкое применение съезды клиновидной формы (США, Австрия, Норвегия, Германия, Бельгия, Франция, Великобритания) (рис. 20.17, *а*). Впоследствии, например, в Германии в результате теоретико-экспериментальных работ доктора В. Блашке получили распространение съезды криволинейной формы (рис. 20.17, *б*).

Опыт эксплуатации многочисленных транспортных развязок и широко поставленные экспериментальные наблюдения показали, что для съездов клиновидной и криволинейной форм без устройства переходно-скоростных полос характерны существенные недостатки, главными из которых являются: необходимость резкого снижения скоростей для поворотного транспорта в пределах основной полосы движения при съезде с автомобильной магистралью и возникающие затруднения вливания транспортных средств в основной поток при въезде на автомобильную магистраль вследствие большой разницы в скоростях съезжающих и основных транспортных потоков.

В 50-х гг. XX в. в США, а позже в Германии и других странах при проектировании развязок стали предусматривать конструкцию въездов и съездов с переходно-скоростной полосой длиной не менее 120 м при длине отгона уширения 80 м (рис. 20.17, *в*). Этот тип конструктивного решения съезда на ответвлениях и примыканиях соединительных рамп оказался наиболее удачным. В РФ действующими техническими нормами также установлено применение переходно-скоростных полос на ответвлениях и примыканиях соединительных съездов развязок движения в разных уровнях.



Р и с. 20.17. Принципиальные схемы планировочных решений съездов на транспортных развязках:

a — клиновидная; *б* — криволинейная; *в* — с переходно-скоростной полосой; соответственно длины: L_1 — зоны ответвления; L_2 — участка ответвления; L_3 — участка разделения кромок и бровок; L_4 — отгона уширения; L_5 — переходно-скоростной полосы; L_6 — переходной кривой

В.А. Федотовым в результате изучения и обобщения опыта проектирования и эксплуатации развязок движения в разных странах были сформулированы основные принципы конструктивного решения участков ответвлений и примыканий соединительных съездов:

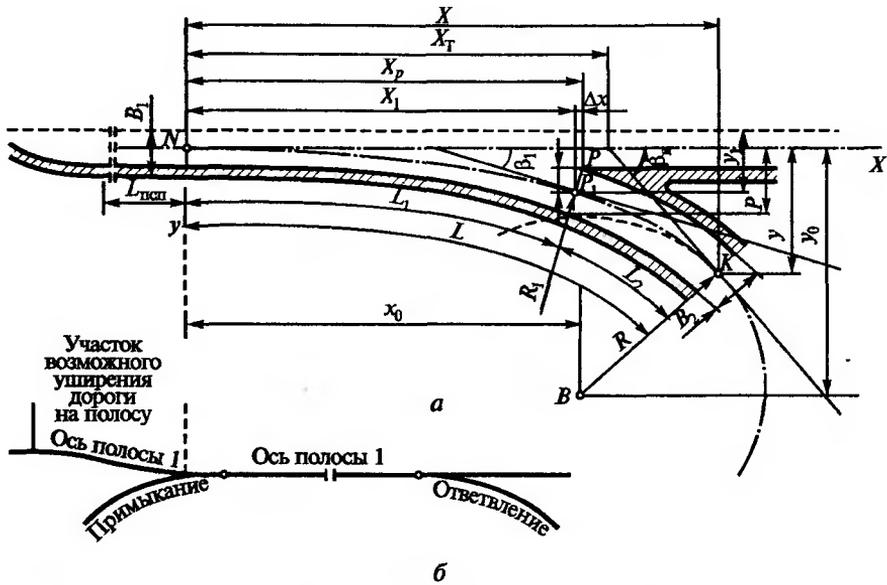
основу конструктивного решения участков ответвлений и примыканий составляют тип и геометрические параметры переходных кривых, отгон уширений и поперечного уклона по длине, вертикальная планировка поверхности, обеспечивающая контроль за характером изменения физических параметров движения и водоотвод с проезжей части и земляного полотна;

поскольку участки въездов и съездов являются узкими местами транспортных узлов, то качество их функционирования в значительной мере зависит от обоснованного назначения типа и параметров переходных кривых и, прежде всего, от угла примыкания. Под *углом примыкания* понимают угол, образуемый касательной к переходной кривой в сечении разделения кромок проезжих частей с автомагистралью. Для оценки влияния угла примыкания доктором Д. Дрю была предложена математическая модель, на основе которой устанавливают минимальный интервал между движущимися в основном потоке автомобилями, необходимый для безопасного вливания въезжающих автомобилей. При этом допустимый интервал (а следовательно, и вероятное время ожидания) оказывается тем больше, чем больше угол примыкания;

решение геометрических характеристик съездов (въездов) считают хорошим, если обеспечивается скорость транспортных средств на ответвлениях или примыканиях, близкая к скорости основного транспортного потока;

тип переходных кривых на участках ответвлений и примыканий соединительных съездов должен, как правило, отвечать условию движения по ним автомобилей с переменной скоростью. Недопустимо формальное применение в качестве переходных кривых клотоид, характеризующихся линейным законом изменения кривизны и отвечающих условию движения по ним автомобилей с постоянными скоростями, а также заимствование их параметров и длин из технических норм для проектирования основных участков автомобильных дорог, так как на участках ответвлений и примыканий движение автомобилей происходит с переменными скоростями (замедленно или ускоренно), а также вследствие их недостаточной длины для отгона виража;

длины переходных кривых на участках ответвлений и примыканий соединительных съездов должны удовлетворять условиям разделения кромок проезжих частей дороги и съезда, бровок земляного полотна и последующего отгона виража в их пределах. При этом углы касательных в сечении разделения кромок должны иметь наименьшие значения.

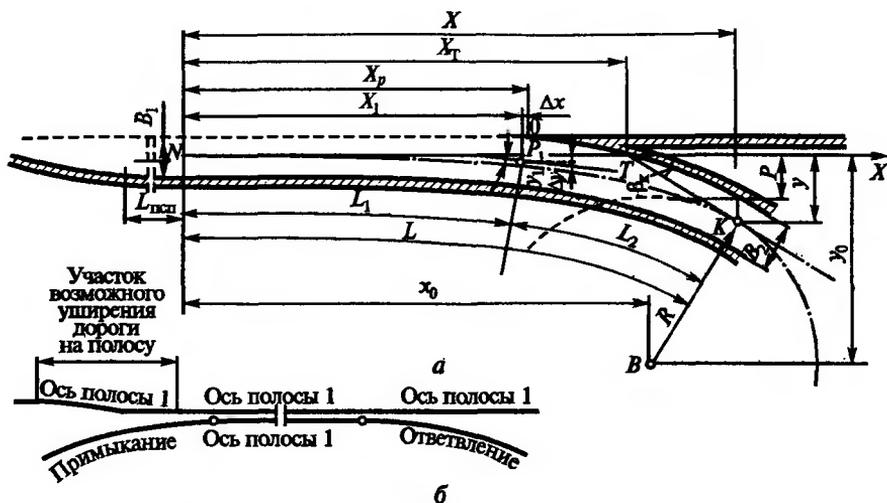


Р и с. 20.18. Схема участка ответвления или примыкания с переходно-скоростной полосой без введения на межпетлевом участке дополнительной полосы движения (схема 1):

a — геометрические элементы, полученные расчетным путем; *б* — общая схема примыкания или ответвления

Выбор необходимой схемы участков ответвлений или примыканий зависит от конкретных условий. На участке между смежными левоповоротными съездами развязок типа «клеверный лист» ответвления и примыкания с переходно-скоростной полосы осуществляют по схеме 1 (рис. 20.18). Эту схему также нередко применяют на участках ответвлений правоповоротных съездов с продолжением переходно-скоростной полосы за место разделения кромок с целью обеспечения возможности водителю, принявшему неправильное решение маневра съезда, вновь вернуться на автомагистраль.

В случае, если на межпетлевом участке вводят дополнительную полосу движения для создания благоприятных условий переплетения съезжающих и въезжающих транспортных потоков, ответвления и примыкания осуществляют по схеме 2 (рис. 20.19). Такое решение, позволяющее увеличить пропускную способность наиболее распространенных в нашей стране развязок типа «клеверный лист» (до 1,5 раз), получило широкое распространение также и в странах Западной Европы (например, в Германии). Эта же схема превалирует на примыканиях правоповоротных соединительных рамп.



Р и с. 20.19. Схема участка ответвления или примыкания с переходно-скоростной полосой с введением на межпетлевом участке дополнительной полосы движения (схема 2):

a — геометрические элементы, получаемые расчетным путем; *б* — общая схема ответвления или примыкания

20.7. Переходные кривые на развязках движения, требования к ним и методы их расчета

Комплексная задача установления наилучших с точки зрения условий движения транспортных потоков пространственной геометрии участков ответвлений и примыканий соединительных съездов состоит в решении поверхности виража, или вертикальной планировки, обусловливаемой:

- типом и параметрами переходной кривой;
- закономерностями изменения поперечного уклона виража и уширения проезжей части;
- продольным профилем дороги;
- продольным профилем съезда (въезда).

При проектировании участков ответвлений и примыканий соединительных рамп между пересекающимися дорогами долгое время формально применяли кривые типа клотоиды без анализа физических параметров движения автомобилей с переменными скоростями, характерными для транспортных потоков в пределах пересечений в разных уровнях.

Накопленный опыт эксплуатации развязок движения в разных уровнях, а также ряд фундаментальных теоретико-экспериментальных исследований позволили установить тот факт, что основным видом движения транспортных средств на участках ответвлений и примыканий соединительных рам развязок является движение с переменными скоростями: замедленное — на съездах и ускоренное — на въездах. При этом линейный закон изменения кривизны клотоиды и, соответственно, поперечного уклона виража, как правило, не соответствует физическим параметрам движения автомобилей с переменной скоростью. По этой причине, начиная с конца 50-х гг. XX в., было сделано много предложений по использованию на участках ответвлений и примыканий соединительных съездов переходных кривых особого типа — кривых переменной скорости (В. Блашке, Б.И. Шапиро, Б.Г. Корнеев, В.М. Визгалов, В.А. Федотов).

Теоретико-экспериментальные исследования переходных кривых различных типов на участках ответвлений и примыканий соединительных съездов были выполнены в 70-х гг. в Союздорпроекте и, в частности, сформулированы основные требования, предъявляемые к ним:

обеспечение плавного изменения положения передних колес относительно продольной оси автомобиля плавным вращением рулевого колеса;

обеспечение постепенного изменения центробежного ускорения в соответствии с увеличением или уменьшением кривизны;

обеспечение возможности устройства отгона поперечного уклона проезжей части между крайними его значениями;

обеспечение соответствия пространственной геометрии съездов физическим параметрам движения автомобилей с переменными скоростями при замедлении и ускорении;

обеспечение плавного изменения бокового крена автомобилей при наличии большой разности поперечных уклонов;

удовлетворение эстетическим требованиям пространственной ясности и плавности.

Требуемый характер изменения центробежной силы, действующей на автомобиль при движении по закруглению съезда (въезда), может быть достигнут лишь при одинаковом изменении кривизны земляного полотна и отгона поперечного уклона. При этом идеальная переходная кривая должна соответствовать всем перечисленным выше требованиям и обеспечивать наилучший характер изменения диаграмм центробежной силы, кривизны и поперечного уклона в виде плавной линии без переломов на концах.

Переходная кривая типа клотоиды лишь тогда полностью отвечает своему назначению, если движение транспортных средств в ее пределах осуществляется с постоянной скоростью ($v = \text{const}$) и отгон виража происходит на всем протяжении по линейному закону, т. е. без размещения вертикальных вогнутых и выпуклых кривых в образующиеся изломы продольного профиля. Оба эти требования при проектировании соединительных съездов развязок (особенно левоповоротных) оказываются невыполнимыми. Движение автомобилей с переменными скоростями приводит к существенному увеличению использования коэффициента сцепления колеса с дорогой, что заметно снижает безопасность движения.

Однако при радиусах закругления в плане более 100—200 м снижение (или увеличение) скоростей движения на участках ответвлений и примыканий развязок в разных уровнях столь незначительно, что негативное влияние линейных законов изменения кривизны и поперечного уклона клотоиды мало сказывается на ухудшении условий движения автомобилей. В связи с этим клотоиду весьма часто применяют при проектировании ответвлений и примыканий правоповоротных и директивно-направленных соединительных съездов.

Характер изменения угла наклона касательной к кривой, центростремительного ускорения и величины нарастания центростремительного ускорения, свойственный клотоиде, представлен на рис. 20.20, б, в. Клотоида характеризуется параболическим законом изменения тангенса угла наклона касательной, линейным законом изменения центростремительного ускорения и постоянным значением нарастания центростремительного ускорения.

В декартовых координатах значения абсциссы x и ординаты y точки, находящейся на расстоянии l от начала клотоиды параметра A , определяют по выражениям:

$$x = \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^{(n+1)} \frac{l^{(4n-3)}}{2^{(2n-2)} (4n-3)(2n-2)! A^{(4n-4)}}; \quad (20.3)$$

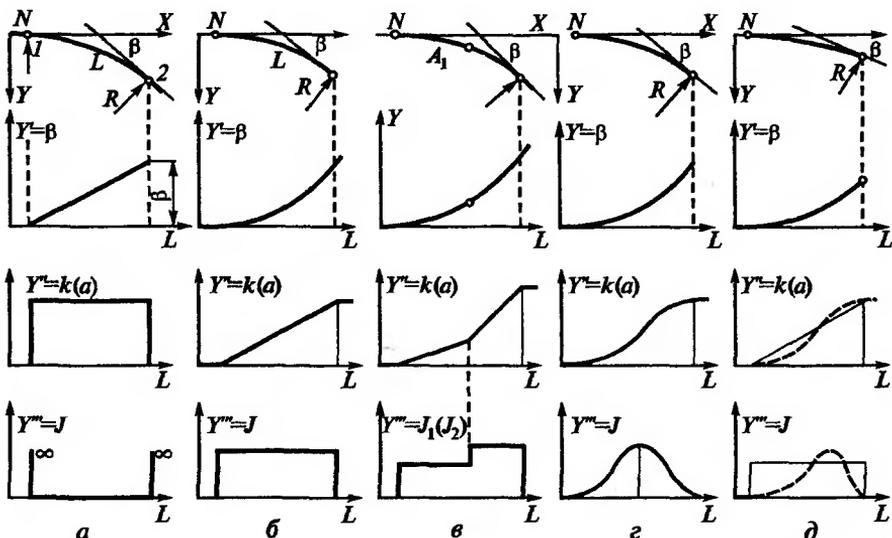
$$y = \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^{(n+1)} \frac{l^{(4n-1)}}{2^{(2n-1)} (4n-1)(2n-1)! A^{(4n-2)}}, \quad (20.4)$$

где n — число членов ряда, обеспечивающее вычисление значений x и y с заданной точностью (10^{-3} м).

При этом угол наклона касательной в конце кривой (в радианах):

$$\beta = L/2R,$$

где $R = A^2/L$ — радиус кривизны клотоиды на расстоянии L от ее начала, м.



Р и с. 20.20. Характер изменения угла наклона касательной к кривой (Y'), центростремительного ускорения (Y'') и нарастания центростремительного ускорения (Y''') по длине различных типов кривых:

a — круговой; b — клотоиды; c — коробовой клотоиды; d, e — переходных кривых переменной скорости (ПЕРС)

Скорость движения автомобиля при заданном нарастании центростремительного ускорения:

$$V = \sqrt[3]{A^2 J} = \text{const},$$

где J — изменение центростремительного ускорения, м/с^3 ; A — параметр клотоиды, м.

Свойственный клотоиде неблагоприятный характер изменения кривизны и центростремительного ускорения с резким переломом функций в начале и конце кривой характерен и для отгона виража на переходной кривой. С целью исключения существенных недостатков клотоиды в Союздорпроекте были разработаны новые типы переходных кривых с идеализацией законов изменения кривизны различными методами: по параболическому закону, сопряженно-параболическому, тригонометрическому, оптимальному и т.д.

Заметного улучшения характера изменения кривизны достигают при задании закона изменения кривизны в виде параболической функции:

$$K = \frac{1}{RL^2} l^2,$$

где l — текущая координата, м.

Как было установлено, геометрические параметры переходной кривой данного типа обеспечивают приемлемые условия движения по ней автомобилей с переменной скоростью, допускают движение с постоянной скоростью и обеспечивают возможность отгона виража, поскольку изменение поперечного уклона повторяет S -образный график центробежного ускорения (рис. 20.20, д). Переходная кривая этого типа представляет собой одну из разновидностей переходных кривых переменной скорости (ПЕРС).

В декартовых координатах значения абсциссы x и ординаты y точки, находящейся на расстоянии l от начала кривой, определяют по выражениям:

$$x = -\frac{l^7}{126B^6} + \frac{l^{13}}{25272B^{12}} - \frac{l^{19}}{9972720B^{18}} + \dots; \quad (20.5)$$

$$y = \frac{l^4}{12B^3} - \frac{l^{10}}{1620B^9} + \frac{l^{16}}{466560B^{15}} - \dots, \quad (20.6)$$

где B — параметр кривой ПЕРС, м.

Угол наклона касательной в конце кривой (в радианах) длиной L :

$$\beta = L/3R,$$

где $R = B^3/L^2$ — радиус кривизны в конце кривой ПЕРС параметра B и длиной L .

Скорость автомобиля в любой точке кривой при заданном ускорении автомобиля по длине b и скорости в начале кривой v_0 :

$$v_R = b \frac{v^2}{JR} - v_0,$$

где J — изменение центробежного ускорения, м/с^3 ; v — скорость движения в точке с максимальной кривизной, м/с .

Длина переходной кривой:

$$L = \frac{v_0^2 - v_R^2}{2b}.$$

Кривая ПЕРС с параболическим законом изменения кривизны является наиболее экономичной, удовлетворяет большинству требований, предъявляемых к переходным кривым на участках ответвле-

ний и примыканий соединительных съездов, и имеет в конце кривой угол наклона касательной в 1,5 раза меньший, чем клотоида и другие типы переходных кривых.

Для проектирования участков ответвлений и примыканий с учетом движения автомобилей с переменными скоростями и установления месторасположения кромок проезжих частей в Союздорпроекте разработана программа «Съезд-2».

Идеальная переходная кривая получена из условий движения автомобилей с постоянной скоростью и плавного S -образного изменения поперечного уклона по длине. Применение такого типа кривой приводит к устранению скачка угловой скорости вращения автомобиля вокруг продольной оси, характерный для клотоиды. Характер изменения угла наклона касательной к идеальной кривой, центростремительного ускорения и нарастания центростремительного ускорения представлен на рис. 20.20, z .

В декартовых координатах значение абсциссы и ординаты любой i -й точки кривой вычисляют:

$$x_i = x_{i-1} + R_i (\sin \beta_i - \sin \beta_{i-1});$$

$$y_i = y_{i-1} + R_i (\cos \beta_{i-1} - \cos \beta_i),$$

где $R_i = \frac{v^2}{g \left(\frac{\varphi_2}{L} l + \operatorname{tg} \theta + i_{B1} \right)}$ — радиус кривизны в i -й точке кривой;

v — скорость движения автомобиля, м/с; g — ускорение свободного падения, м/с²; φ_2 — коэффициент поперечного сцепления колеса с дорогой; L — длина кривой, м; l — текущая координата, м; $\theta = \operatorname{arctg} i_{B2} - \operatorname{arctg} i_{B1}$ — максимальный угол наклона виража; i_{B1} , i_{B2} — соответственно поперечный уклон в начале и конце переходной кривой; β_i — угол наклона касательной к кривой в i -й точке:

$$\beta_i = \sum_{i=1}^n \frac{\Delta l}{R_i},$$

где $n = L/\Delta l + 1$ — число шагов разбивки; $\Delta l = 0,01$ м — шаг разбивки.

Длина переходной кривой:

$$L = v^3 \sqrt{\frac{32\theta}{\lambda}},$$

где λ — изменение углового ускорения, рад/с³.

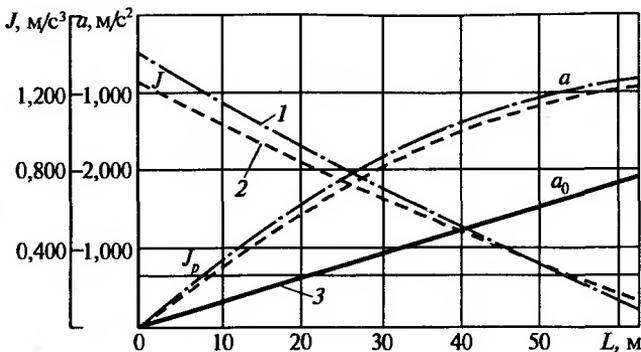


Рис. 20.21. Изменение центробежного ускорения (a) и его нарастания (J) по длине кротоиды:

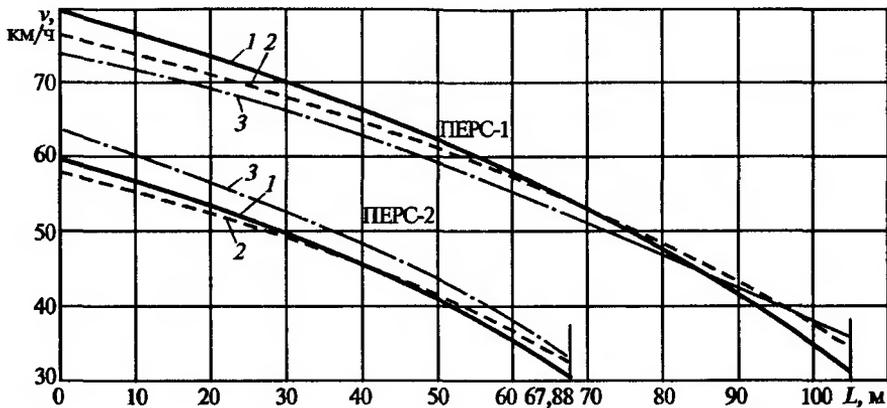
1 — теоретическое; 2 — экспериментальное на пл. Репина; 3 — экспериментальное на МКАД

Для проектирования участков ответвлений и примыканий развязок движений с использованием идеальной переходной кривой в Союздорпроекте разработана программа «Съезд-3».

При автоматизированном проектировании развязок движения в разных уровнях используют непосредственно программы «Съезд-2» и «Съезд-3». Однако для того чтобы дать возможность и при ручной технологии использовать методы современного проектирования участков ответвлений и примыканий соединительных съездов, в Союздорпроекте посредством табулирования на компьютере разработаны таблицы для определения параметров переходных кривых.

Проведенные Союздорпроектом (В.А. Федотов) совместно с СоюздорНИИ экспериментальные исследования по измерению физических параметров движения по переходным кривым различных типов при разных режимах движения автомобиля позволили установить, что движение с переменными скоростями по кротоиде происходит с существенными отклонениями от закономерностей, свойственных движению по кротоиде с постоянной скоростью (рис. 20.21): центробежное ускорение изменяется по длине по криволинейному закону вместо линейного, степень нарастания центробежного ускорения не остается постоянной, а меняется практически по линейному закону с максимальным значением в начале кривой и близкой нулю в конце ее. В то же время при движении автомобиля по кривой ПЕРС характер изменения скоростей весьма близок к теоретическому (рис. 20.22).

Выполненный В.А. Федотовым в Союздорпроекте всесторонний анализ различных типов переходных кривых позволил дать следующую



Р и с. 20.22. Изменение скоростей автомобилей по длине переходной кривой переменной скорости (ПЕРС):

1 — теоретическое; 2 — экспериментальное на пл. Репина; 3 — экспериментальное на МКАД

щие рекомендации в отношении их применения при проектировании участков ответвлений и примыканий соединительных съездов транспортных развязок:

для съездов (въездов) дорог I, II категорий при радиусах в плане 60—250 м и начальной скорости движения 80 км/ч целесообразно применять переходные кривые ПЕРС со средним замедлением 1,5—2,0 м/с² и ускорением 0,8—1,25 м/с²;

для съездов (въездов) дорог III категории при радиусах в плане 30—60 м можно применять как клотоиду, так и ПЕРС, причем последнюю применяют при начальной скорости 60 км/ч;

для съездов (въездов) дорог с радиусами более 100 м в зависимости от категории дорог, разностей поперечных и увеличения продольного уклонов выбирают наиболее благоприятную в данных условиях по своим геометрическим и физическим параметрам переходную кривую из трех рассмотренных выше.

20.8. Расчеты элементов соединительных съездов

Пакет прикладных программ по проектированию развязок движения в разных уровнях, разработанный в Союздорпроекте (автор В.А. Федотов), охватывает практически все возможные случаи проектирования плана лево- и правоповоротных соединительных съездов развязок. Каждый соединительный съезд рассчитывают самостоятельно в виде последовательно сопрягающихся между собой геомет-

рических элементов, образующих соединительную кривую, сопрягающуюся обоими концами с осями прямолинейных участков дорог на пересечении или с касательными к криволинейным участкам.

В пакете прикладных программ предусмотрены все представляющие практический интерес случаи сопряжения геометрических элементов между собой. Для замкнутого аналитического описания всей соединительной кривой каждый ее элемент представляют в локальной системе координат, а прямые и круговые кривые — в общей системе координат (рис. 20.23).

Различают простые и сложные соединительные кривые. К простым соединительным кривым относят кривые, представленные последовательностью следующих элементов: переходная кривая (ПК-1) — круговая кривая (КК) — переходная кривая (ПК-2). Эти элементы образуют петлеобразный левоповоротный соединительный съезд выпуклого очертания (рис. 20.24, а) и правоповоротный соединительный съезд вогнутого очертания (рис. 20.24, б). Простые соединительные кривые характеризуются наличием одного центра постоянной кривизны. К сложным соединительным кривым относят кривые, характеризующиеся наличием двух и более центров постоянной кривизны.

Автоматический расчет простых соединительных съездов выпуклого или вогнутого очертания и аналитическое размещение их между осями пересекающихся прямолинейных участков дорог или касательными к осям криволинейных участков выполняют на основе следующих исходных параметров:

φ — внутренний угол пересечения между прямолинейными участками дорог или касательными к криволинейным участкам, в котором должна быть размещена соединительная кривая;

R — радиус круговой кривой;

ΔR — шаг изменения радиуса. Первоначально заданный радиус автоматически может быть изменен, если в процессе расчета будет установлена невозможность вписывания соединительной кривой в заданный угол при назначенных исходных параметрах;

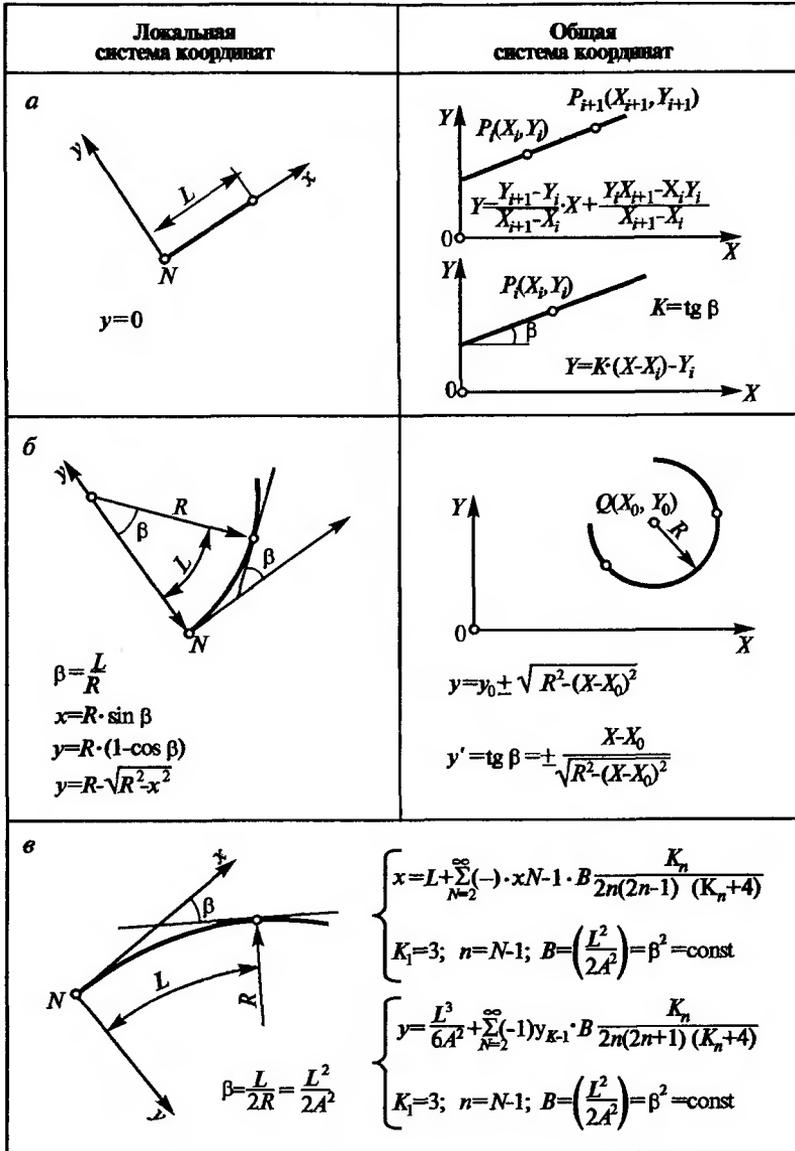
B_1, B_3 — ширины полос проезжих частей, с которых и к которым происходит ответвление и примыкание соединительных съездов;

i_{B1}, i_{B3} — поперечные уклоны проезжей части на соответствующих полосах;

B_2 — ширина проезжей части соединительного съезда;

i_{B2} — поперечный уклон проезжей части (виража) в пределах круговой кривой;

J — изменение центростремительного ускорения;



Р и с. 20.23. Аналитическое выражение основных элементов соединительной кривой:

a — прямая; *б* — круговая кривая; *в* — клотоида

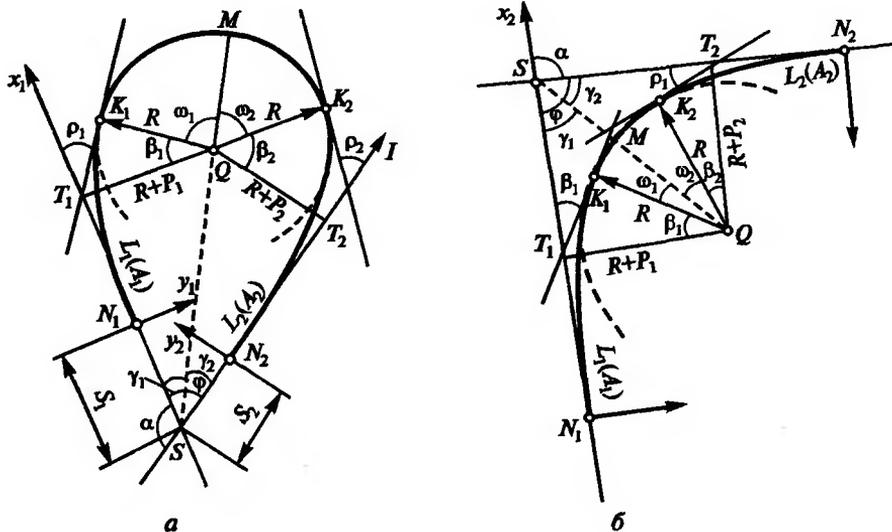


Рис. 20.24. Простая соединительная кривая:

a — выпуклая; *б* — вогнутая

I_d — дополнительное увеличение продольного уклона на переходной кривой при отгоне виража (по внешней кромке проезжей части);

$L_{T1}(A_{T1}), L_{T2}(A_{T2})$ — длины или параметры соответствующих переходных кривых, назначенные из определенных условий на основе первоначальной (эскизной) графической проработки. В случае отсутствия требований к установлению длин или параметров переходных кривых, последние определяются автоматически по условию разделения кромок проезжих частей и возможности отгона виража;

S_1 и S_2 — расстояния от конечных точек N_1 и N_2 соединительной кривой до точки пересечения осей автомагистралей.

В результате автоматического расчета проектировщик получает следующую информацию:

$L_1(A_1), L_2(A_2)$ — расчетные длины и параметры переходных кривых;

γ_1, γ_2 — углы положения центра круговой кривой Q относительно прямолинейных участков автомагистралей и точки их пересечения S ;

$\left. \begin{matrix} x_{10}, y_{10} \\ x_{20}, y_{20} \end{matrix} \right\}$ — координаты центра в локальных системах координат

каждой переходной кривой;

SN_1, SN_2 — расстояния от точки пересечения автомагистралей до точек отклонения и примыкания соединительных кривых;

$$\left. \begin{array}{l} x_{1K_1}, y_{1K_1} \\ x_{2K_1}, y_{2K_1} \end{array} \right\} \text{ — координаты точек начала } K_1 \text{ и конца } K_2 \text{ круговой}$$

кривой в локальной системе координат соответствующей переходной кривой;

S_Q — расстояние от точки пересечения осей автомагистралей до центра круговой кривой Q ;

ω_1, ω_2 — углы, стягивающие части круговой кривой между направлениями SM со стороны каждой переходной кривой.

Одновременно определяют и все другие параметры, необходимые для построения соединительного съезда.

Сложные соединительные кривые, имеющие несколько центров постоянной кривизны, представляют последовательностью сопряженных между собой (т.е. имеющих общую касательную в точке сопряжения) отрезков переходных кривых. При этом в качестве переходных кривых, входящих в состав сложных соединительных кривых, вследствие относительно небольших и практически постоянных скоростей движения обычно используют клотоиду расчетной длины:

$$L = \left[\frac{Rg(\varphi_2 - i_B)}{J R} \right]^{3/2},$$

где R — радиус сопрягающей круговой кривой, м; g — ускорение свободного падения, м/с²; φ_2 — коэффициент поперечного сцепления колеса с дорогой; i_B — уклон виража в пределах круговой части кривой; J — изменение центробежного ускорения, м/с³.

Расчеты сложных соединительных кривых сводятся к решению, как правило, с использованием компьютерной техники, конечного числа частных задач сопряжения элементов, т.е. к решению уравнений, в которых в качестве переменных выступает параметр одной из клотоид A_1 . Математические выражения основных параметров кривых, оформленные в виде отдельных операторов (процедур), представлены в табл. 20.5.

Компьютерная программа расчета сложных соединительных кривых включает решение следующих частных задач сопряжения геометрических элементов.

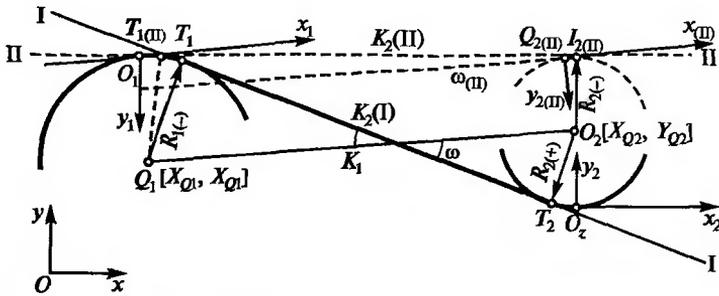
1. Сопряжение двух круговых кривых прямой линией. Комбинация элементов $KK_1 - П - KK_2$ (рис. 20.25). Для расчета задают координаты центров круговых кривых в общей системе координат $Q_1[X_{Q1}, Y_{Q1}]$ и $Q_2[X_{Q2}, Y_{Q2}]$, радиусы R_1 и R_2 с учетом правила знаков. В результате расчета определяют неизвестные коэффициенты уравнения общей касательной к заданным круговым кривым.

Таблица 20.5. Математические выражения основных параметров кривых

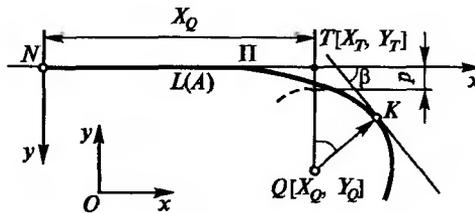
Искомый параметр	Условное обозначение	Математическое выражение	Искомый параметр	Функциональная зависимость для оформления процедуры
Сдвигка	p	$p = y_0 - R$	L, p	$p = f_7(L, R) = f_6(L, R) - R$
Параметр клотоиды	A	$y_0 = R - p = 0$	R, p	$A = f_8(R, p) = f_7(L, R) - p$
Длина от начала до любой точки	L	$x = \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^{n+1} \frac{l^{4n-3}}{2^{2n-2}(4n-3)(2n-2)!A^{4n-4}} = 0$	x, A	$L = f_9(x, A) = x - f_1(l, A)$
		$y = \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^{n+1} \frac{l^{4n-1}}{2^{2n-1}(4n-1)(2n-1)!A^{4n-2}} = 0$	y, A	$L = f_{10}(y, A) = y - f_3(l, A)$
Длина от начала до точки с заданным в ней радиусом кривизны	L_R	$x = \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^{n+1} \frac{l^{2n-1}}{2^{2n-2}(4n-3)(2n-2)!R^{2n-2}} = 0$	x, R	$L_R = f_{11}(x, R) = x - f_2(l, R)$
		$y = \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^{n+1} \frac{l^{2n}}{2^{2n-1}(4n-1)(2n-1)!R^{2n-1}} = 0$	y, R	$L_R = f_{12}(y, R) = y - f_4(l, R)$
Абсцисса любой точки	x	$x = \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^{n+1} \frac{l^{4n-3}}{2^{2n-2}(4n-3)(2n-2)!A^{4n-4}}$	l, A	$x = f_1(l, A)$
Абсцисса точки с заданным в ней радиусом кривизны		$x = \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^{n+1} \frac{l^{2n-1}}{2^{2n-2}(4n-3)(2n-2)!R^{2n-2}}$	l, R	$x = f_2(l, R)$

Окончание табл. 20.5

Искомый параметр	Условное обозначение	Математическое выражение	Искомый параметр	Функциональная зависимость для оформления процедуры
Ордината любой точки	y	$y = \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^{n+1} \frac{l^{4n-1}}{2^{2n-1}(4n-1)(2n-1)! A^{4n-2}}$	l, A	$y = f_3(l, A)$
Ордината точки с заданным в ней радиусом кривизны		$y = \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^{n+1} \frac{l^{2n}}{2^{2n-2}(4n-1)(2n-1)! R^{2n-1}}$	l, R	$y = f_4(l, AR)$
Абсцисса центра круговой кривой	x_0	$x_0 = x_L - R \sin\left(\frac{L}{2R}\right)$	L, R	$x_0 = f_5(L, R) = f_5(L, R) - R \sin\left(\frac{L}{2R}\right)$
Ордината центра круговой кривой	y_0	$y_0 = y_L + R \cos\left(\frac{L}{2R}\right)$	L, R	$y_0 = f_6(L, R) = f_4(L, R) + R \cos\left(\frac{L}{2R}\right)$



Р и с. 20.25. Сопряжение двух круговых кривых прямой



Р и с. 20.26. Сопряжение круговой кривой с прямой посредством клотоиды

2. Сопряжение круговой кривой с прямой посредством клотоиды. Комбинация элементов: КК — КЛ — П (рис. 20.26). В качестве исходных данных задают координаты центра круговой кривой в общей системе $Q[X_Q, Y_Q]$, радиус R и уравнение прямой координатами двух точек или координатами одной точки и углом наклона к оси абсцисс общей системы координат. В результате расчета устанавливают длину или параметр сопрягающей клотоиды $L(A)$.

3. Сопряжение круговой кривой с двумя прямыми посредством клотоид. Комбинация элементов: Π_1 — $КЛ_1$ — $КК$ — $КЛ_2$ — Π_2 (рис. 20.27). Задают уравнения прямых Π_1 и Π_2 , каждое координатами двух точек в общей системе координат или соответствующими координатами одной точки и углом φ между пересекающимися прямыми, а также другие исходные данные, используемые для расчета простых соединительных кривых. В результате расчета получают длины или параметры сопрягающихся клотоид $L_1(A_1)$, $L_2(A_2)$.

4. Сопряжение двух круговых кривых клотоидами, примыкающими к общей прямой. Комбинация элементов: $КК_1$ — $КЛ_1$ — Π — $КЛ_2$ — $КК_2$ (рис. 20.28). В качестве исходной информации задают координаты центров круговых кривых $Q_1[X_{Q1}, Y_{Q1}]$, $Q_2[X_{Q2}, Y_{Q2}]$ и их радиусы со своими знаками R_1 и R_2 , длины переходных кривых или их параметры $L_1(A_1)$, $L_2(A_2)$, или их соотношение $m = A_1/A_2$, а также

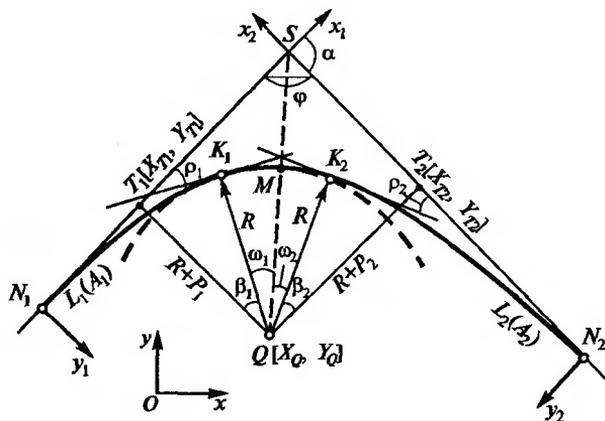


Рис. 20.27. Сопряжение круговой кривой с двумя прямыми посредством клотоид

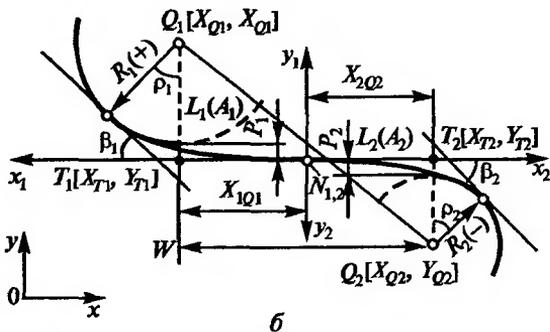
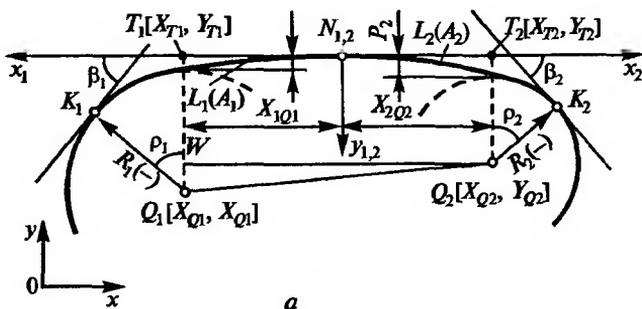
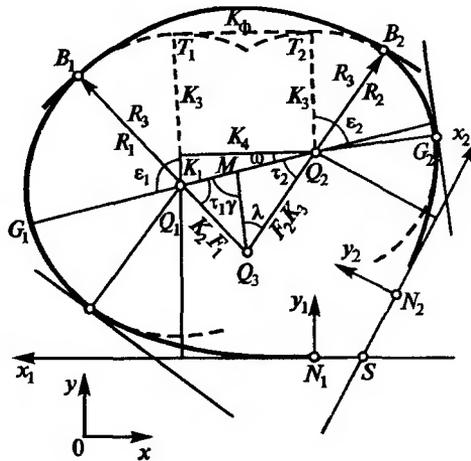


Рис. 20.28. Сопряжение круговых кривых с клотоидами:
 а — односторонние круговые кривые; б — обратные круговые кривые



Р и с. 20.29. Сопряжение двух круговых кривых третьей

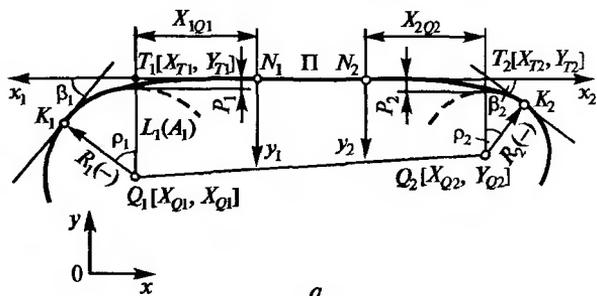
сдвиги p_1 и p_2 . В результате расчета устанавливают параметры уравнения сопрягающей прямой П.

5. Сопряжение двух круговых кривых третьей круговой кривой. Комбинация элементов: $KK_1 - KK_2 - KK_3$ (рис. 20.29). Задают координаты центров круговых кривых $Q_1[X_{Q1}, Y_{Q1}]$ и $Q_2[X_{Q2}, Y_{Q2}]$ в общей системе координат, а также значения их радиусов R_1 и R_2 . В результате расчета определяют координаты центра сопрягающей круговой кривой $Q_3[X_{Q3}, Y_{Q3}]$, ее радиус R_3 , а также координаты точек сопряжения $B_1[X_{B1}, Y_{B1}]$ и $B_2[X_{B2}, Y_{B2}]$.

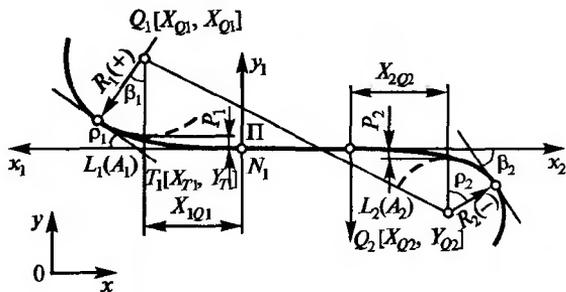
6. Сопряжение двух круговых кривых двумя клотоидами. Комбинация элементов: $KK_1 - KL_1 - KL_2 - KK_2$ (рис. 20.30). В качестве исходной информации задают координаты центров круговых кривых в общей системе координат $Q_1[X_{Q1}, Y_{Q1}]$, $Q_2[X_{Q2}, Y_{Q2}]$ и их радиусы со своими знаками R_1 и R_2 , соотношение параметров $m = A_1/A_2$ сопрягающих клотоид. В результате расчета устанавливают положение локальной системы координат, параметры клотоид $L_1(A_1)$, $L_2(A_2)$, а также координаты главных точек (N_1 , N_2 , K_1 , K_2 , T_1 , T_2).

7. Сопряжение двух круговых кривых двумя отрезками клотоид с круговой вставкой между ними. Комбинация элементов: $KK_1 - KL_1 - KK_3 - KL_2 - KK_2$ (рис. 20.31).

В качестве исходной информации задают координаты центров круговых кривых $Q_1[X_{Q1}, Y_{Q1}]$ и $Q_2[X_{Q2}, Y_{Q2}]$, радиусы R_1 и R_2 со своими знаками, соотношение параметров сопрягающих клотоид m и может быть также задан радиус сопрягающей круговой кривой R_3 . В резуль-



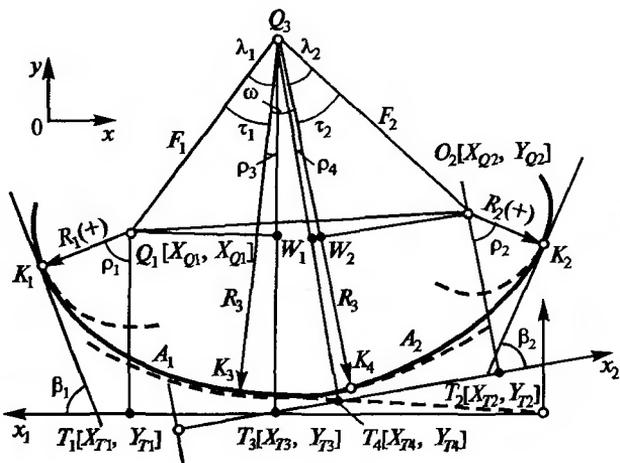
a



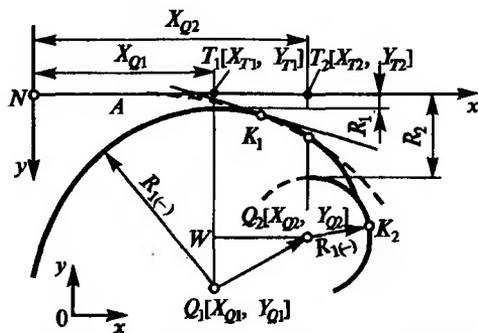
б

Р и с. 20.30. Сопряжение двух круговых кривых соединяющимися клотоидами:

a — односторонние кривые; б — обратные кривые



Р и с. 20.31. Сопряжение двух круговых кривых внешними клотоидами с круговой вставкой между ними



Р и с. 20.32. Сопряжение двух круговых кривых отрезком клотоиды

тате расчета определяют параметры клотоид A_1 и A_2 , радиус сопрягающейся с ними круговой кривой R_3 , положение локальной системы координат и координаты главных точек ($Q_3, K_1, K_2, K_3, K_4, N_1, N_2$).

8. Сопряжение круговых кривых отрезком клотоиды. Комбинация элементов: $KK_1 - KЛ - KK_2$ (рис. 20.32).

Задают координаты центров круговых кривых $Q_1[X_{Q1}, Y_{Q1}]$, $Q_2[X_{Q2}, Y_{Q2}]$, радиусы R_1 и R_2 . В результате расчета определяют параметр сопрягающей клотоиды A , положение локальной системы координат и координаты главных точек (K_1, K_2).

Использование метода сопряжения элементов позволяет весьма эффективно рассчитывать соединительные кривые право- и левоповоротных соединительных съездов практически любого очертания в плане. Однако при проектировании правоповоротных и директивно-направленных левоповоротных соединительных съездов, проектируемых в рамках существенно менее жесткого комплекса ограничений по сравнению с левоповоротными петлеобразными съездами, возможен принципиально новый подход к решению плана соединительных съездов. Этот подход, во многом сходный с решением плана трассы основных дорог, реализован в Союздорпроекте в виде конкретного алгоритма и программы для компьютера.

В основе метода лежат принципы трассирования посредством кубических интерполяционных сплайнов. Суть метода, названного «методом координатного задания оси трассы», состоит в следующем.

1. По плану в общей системе координат прорабатывают от руки или с использованием шаблонов и специальной гибкой линейки-сплайна эскизный вариант сложной соединительной кривой.

2. Трассу задают координатами последовательности точек с шагом 40—60 м, снимаемых (лучше всего с помощью дигитайзера или координметра) с эскизной кривой.

3. Заданную последовательность точек аппроксимируют кубическими сплайнами (отрезками алгебраических полиномов, обычно третьей степени), обладающих высокой степенью гладкости, достигаемой посредством минимизации интеграла квадратов вторых производных по длине кривой:

$$\int_a^b [f''(x)]^2 dx \Rightarrow \min,$$

причем на отрезке $a = x_0, x_1, \dots, x_n = b$ каждому значению абсциссы соответствует значение ординаты y_0, y_1, \dots, y_n .

Задача сводится к нахождению аппроксимирующей функции $S(x)$, называемой сплайном сетки Δ , интерпретирующей значения ординат y_i в узлах сетки. Основное соотношение для кубических сплайнов:

$$S_{\Delta}(x) = m_{i-1} \frac{(x_i - x)^2 (x - x_{i-1})}{h_i^2} - m_i \frac{(x - x_{i-1})^2 (x_i - x)}{h_i^2} + \\ + y_{i-1} \frac{(x_i - x)^2 [2(x - x_{i-1}) + h_i]}{3} + y_i \frac{(x - x_{i-1}) [2(x_i - x) + h_i]}{3}, \quad (20.7)$$

где $m_i = S'_{\Delta}(x_i) = \frac{dy_i}{dx_i}$; $h_i = x_i - x_{i-1}$.

Требование непрерывности второй производной S''_{Δ} в точках x_i ($i = 1, 2, \dots, n - 1$) выполняется при

$$\lambda_i = \frac{h_{i+1}}{h_i + h_{i+1}}, \\ \mu_i = 1 - \lambda_i = \frac{h_i}{h_i + h_{i+1}},$$

откуда следует:

$$C_i = \lambda_i m_{i-1} + 2m_i + \mu_i m_{i+1} = 3\lambda_i \frac{y_i - y_{i-1}}{h_i} + 3\mu_i \frac{y_{i+1} - y_i}{h_{i+1}},$$

где $i = 1, 2, \dots, n - 1$.

Система линейных уравнений имеет вид

$$\begin{vmatrix}
 2 & \mu_0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 \\
 \lambda_1 & 2 & \mu_1 & \dots & 0 & 0 & 0 \\
 0 & \lambda_2 & 2 & \dots & 0 & 0 & 0 \\
 \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\
 \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\
 \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\
 0 & 0 & 0 & \dots & 2 & \mu_{n-2} & 0 \\
 0 & 0 & 0 & \dots & \lambda_{n-1} & 2 & \mu_{n-1} \\
 0 & 0 & 0 & \dots & \dots & \lambda_n & 2
 \end{vmatrix}
 \begin{vmatrix}
 m_0 \\
 m_1 \\
 m_2 \\
 \dots \\
 \dots \\
 \dots \\
 m_{n-2} \\
 m_{n-1} \\
 m_n
 \end{vmatrix}
 =
 \begin{vmatrix}
 C_0 \\
 C_1 \\
 C_2 \\
 \dots \\
 \dots \\
 \dots \\
 C_{n-2} \\
 C_{n-1} \\
 C_n
 \end{vmatrix}.
 \quad (20.8)$$

Система линейных уравнений (20.8) (в левой части предопределена трехдиагональная матрица коэффициентов) решается методом прогонки, в результате чего определяются неизвестные коэффициенты в виде первых производных m_1, m_2, \dots, m_{n-1} , входящих в уравнение (20.7). Поскольку в начале и конце соединительной кривой направления определены касательными в точках ответвления и примыкания к осям пересекающихся автомагистралей, то при $x = a$ и $x = b$ соответственно задают $m_0 = y'_0$; $m_n = y'_n$.

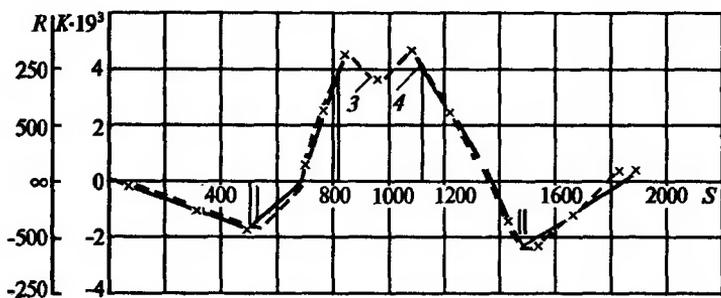
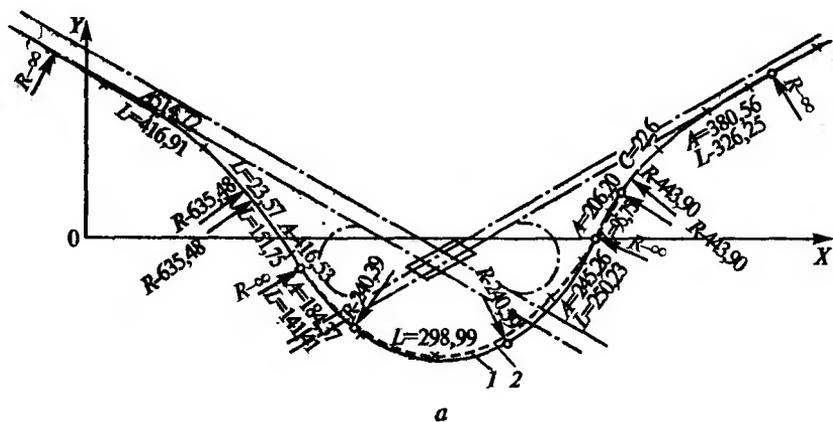
Длина всей кривой определяется как сумма длин отдельных ее участков:

$$L = \sum_{i=1}^n \int_{x_i}^{x_{i+1}} \sqrt{1 + [S'_\Delta(x)]^2} dx. \quad (20.9)$$

Кривизна соединительной кривой в любой точке со своим знаком:

$$K = \frac{S''_\Delta(x)}{[1 + (S'_\Delta(x))^2]^{3/2}} \quad (20.10)$$

4. Строят диаграмму кривизны сплайн-функции (рис. 20.33) и аппроксимируют ее в виде ломаной, представляемой отрезками прямых, параллельных и непараллельных оси абсцисс. Тогда соединительная кривая уже может быть представлена известными элементами клотоидной трассы: прямыми, круговыми кривыми, клотоидами и отрезками клотоид. При этом на диаграмме кривизны этим элементам соответствуют: прямая, совпадающая с осью абсцисс; прямая, па-



Р и с. 20.33. Проектирование плана соединительных рампы по методу «кубических сплайнов»:

a — план соединительной рампы; *b* — диаграмма кривизны; 1 — эскизный план трассы; 2 — расчетный план трассы; 3 — диаграмма кривизны эскизной трассы; 4 — сплайнированная диаграмма кривизны

параллельная оси абсцисс, наклонная прямая, примыкающая одним концом к оси абсцисс; наклонная прямая.

Изложенный «метод координатного задания оси» проектирования соединительной кривой с последующей аппроксимацией кубическими сплайнами является весьма эффективным при проектировании правоповоротных и директивно-направленных левоповоротных соединительных съездов, особенно в случае криволинейного характера плана пересекающихся дорог и при наличии контурных ограничений.

20.9. Проектирование продольного профиля по соединительным съездам

Обязательным элементом технологической последовательности проектирования развязок движения в разных уровнях является установление положения проектной линии продольного профиля по съездам, осуществляемое после планировочных проработок и аналитического расчета элементов плана.

Многообразие соединительных съездов, различная их конфигурация в плане, наличие высотных ограничений (например, прохождение с проектными высотами не ниже минимальных над трубами, условия прохождения путепроводов и т.д.), необходимость соблюдения условий сопряжения с продольным и поперечными профилями пересекающихся дорог на участках ответвлений съездов и въездов, а также выполнение требований действующих технических норм делают задачу проектирования продольного профиля по соединительным съездам весьма непростой. Решение этой задачи является составной частью комплексного проектирования соединительных съездов в пространстве с одновременным решением вертикальной планировки, включая наиболее сложные участки ответвлений и примыканий.

Сложность задачи установления положения проектной линии продольного профиля по соединительным съездам, многовариантный характер проработки пространственных решений, необходимость установления нового положения проектной линии продольного профиля одной из пересекающихся дорог или новой плановой конфигурации съезда при выявлении невозможности увязки вертикального решения с геометрией плана без нарушения требований технических норм делают обязательным применение компьютерной техники для решения задач данного класса.

Для ускорения расчетов и получения увязанной и совершенной проектной линии продольного профиля по соединительным съездам транспортных узлов в Союздорпроекте разработаны пакеты прикладных программ, предназначенных для проектирования простых соединительных съездов выпуклого и вогнутого очертания в плане при небольшой их длине и большом перепаде высот между начальной и конечной точками. Для расчета продольного профиля сложных соединительных съездов большой длины применяют известные программы автоматизированного проектирования продольного профиля автомобильных дорог.

Основные особенности проектирования продольного профиля по соединительным съездам развязок движения, нашедшие отражение в соответствующих компьютерных программах, состоят в следующем:

аналитическое представление вертикальных выпуклых и вогнутых кривых принято по квадратной параболе, получившее повсеместное распространение как в отечественной, так и зарубежной практике;

проектная линия продольного профиля состоит из сопрягающихся между собой выпуклых и вогнутых вертикальных кривых и прямых. Минимальные радиусы вертикальных кривых и предельные продольные уклоны определяют в соответствии со строительными нормами и правилами. Вертикальные переходные кривые не используются вследствие больших значений радиусов вертикальных кривых;

на участках переходных кривых в плане от точек расхождения осей съездов с осями внешних полос пересекающихся дорог до створов расхождения кромок проезжих частей принят постоянный поперечный уклон дороги, обеспечивающий обязательное понижение проектной линии продольного профиля соединительных съездов для пересекающихся дорог соответственно на величины Δh_1 и Δh_2 (рис. 20.34), что обеспечивает исключение поднятия внешней кромки съезда и образование гребня на внешней полосе дороги с неоднократным изменением направления поперечного уклона, неблагоприятно сказывающимся на уровнях удобства и безопасности движения, а также затрудняющим водоотвод с проезжей части;

в программах учтено многообразие продольных профилей пересекающихся дорог и условий сопряжения с ними съездов. Возмож-

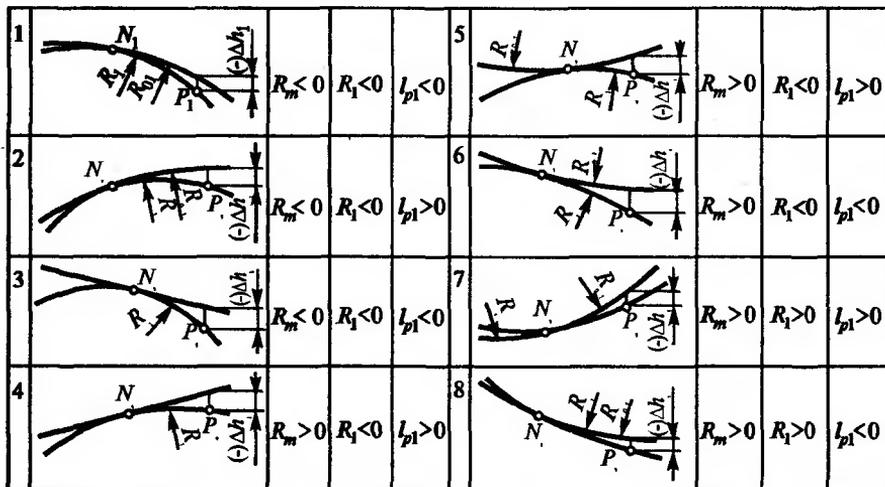


Рис. 20.34. Варианты сопряжения осей съезда и дороги в продольном профиле

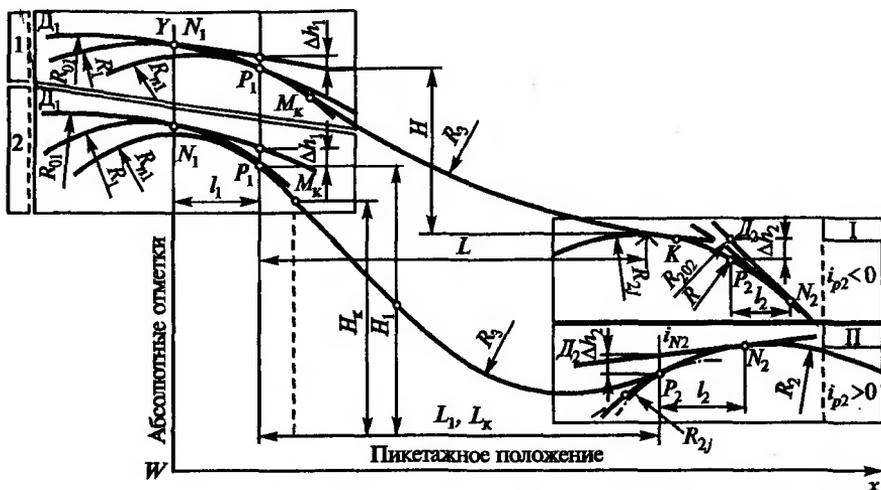


Рис. 20.35. Схема построения проектной линии продольного профиля на съездах с двумя типами сопряжения вертикальных кривых

ные случаи сопряжения вертикальных кривых радиусов R с элементами продольных профилей пересекающихся дорог представлены на рис. 20.35;

обеспечена возможность получения множества решений и выбора наилучшего из них в тех случаях, когда условия размещения соединительных съездов являются относительно свободными. В рамках жестких ограничений получают единственно возможное решение проектной линии продольного профиля при соблюдении всех требований технических норм и правил. При невозможности получения решения проектной линии без нарушения технических норм корректируют продольный профиль одной из пересекающихся дорог либо план соединительного съезда;

для удобства построения и наглядности все пикетажные и характерные точки продольного профиля определяют в системе координат, где абсцисса X — пикетажное положение точки в направлении пикетажа слева направо и ордината Y — абсолютная геодезическая высота точки, взятая в системе высот профилей пересекающихся дорог;

в результате определения округленных значений радиусов R_1 и R_2 на участках ответвлений и примыканий съездов находят положение вершин вертикальных кривых, а также координаты и уклоны в точках P_1 и P_2 . При этом в зависимости от знака уклона i_p в точке P_2 различают две принципиально отличные по технике расчета схемы сопряже-

ния вогнутой кривой R_3 с вертикальными кривыми R_1 и R_2 (см. рис. 20.34).

Использование компьютерной техники при проектировании проектной линии продольного профиля соединительных съездов транспортных узлов обеспечивает возможность направленного поиска наилучшего проектного решения в части снижения строительной стоимости и повышения транспортно-эксплуатационных качеств развязок движения в разных уровнях.

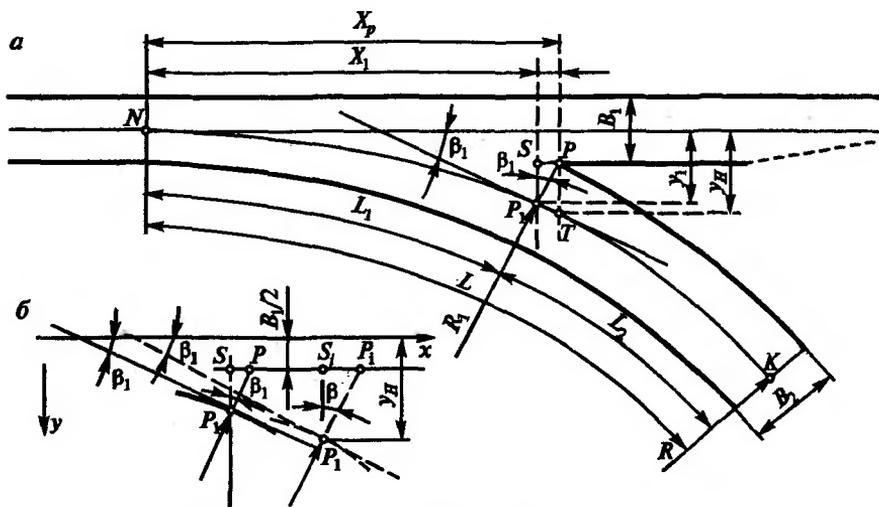
20.10. Планово-высотные решения соединительных съездов

Пространственное положение соединительного съезда между пересекающимися дорогами зависит от его геометрии в плане с соответствующими переходными кривыми рациональной длины, закономерностей изменения поперечного уклона, очертания кромок проезжей части и проектной линии продольного профиля. Планово-высотное положение соединительных съездов определяет совокупность совместно действующих факторов и их рациональное сочетание при условии полной взаимной увязки.

Необходимые длины переходных кривых каждого типа в общем случае могут быть определены на основе соотношений, представленных в § 20.7. Однако на участках ответвлений и примыканий соединительных съездов использование предельных значений параметров переходных кривых определяет такие их длины, которые оказываются недостаточными для разделения кромок проезжих частей дороги и отмыкающего (примыкающего) соединительного съезда и тем более бровок земляного полотна. В этих случаях круговая кривая съезда с максимальным поперечным уклоном может оказаться в пределах полосы дороги, что приводит при отгоне виража вдоль переходной кривой к резкому поднятию внешней кромки с образованием линии перелома в виде гребня. Не обеспечивают разделение кромок проезжих частей и бровок земляного полотна, минимальные длины переходных кривых, нормируемые действующими строительными нормами и правилами (СНиП 2.05.02—85*).

Для обеспечения благоприятных условий отгона виража переходную кривую по длине делят на два участка: L_1 — от ее начала до сечения разделения кромок проезжих частей; L_2 — до начала круговой кривой (рис. 20.36). Длина участка L_1 обеспечивает разделение кромок проезжих частей из условия сохранения в его пределах поперечного уклона дороги, а участок L_2 обеспечивает отгон виража.

Минимальные длины переходных кривых должны обеспечивать расхождение кромок проезжих частей и разделение бровок, а также давать возможность последующего отгона виража до максимального



Р и с. 20.36. Детали участка ответвления съезда:

a — условные обозначения; *б* — принцип итерационного процесса

поперечного уклона в пределах соединительного съезда. Эти длины определяют компьютерным расчетом с использованием соответствующего пакета прикладных программ либо с помощью таблиц Союздорпроекта.

При движении автомобиля по переменному по длине переходной кривой поперечному уклону происходит поворот автомобиля вокруг продольной оси. Законы изменения поперечного уклона выража представляют в следующем виде:

для переходных кривых из условия постоянной скорости автомобиля $v = \text{const}$

$$i_B = \frac{V^2}{g} K - \frac{\varphi_2}{L} l - i_{B1}; \quad (20.11)$$

для переходных кривых из условия движения автомобиля с переменной скоростью $v \neq \text{const}$

$$i_B = \frac{V^2 - 2bl}{g} K - \frac{\varphi_2}{L} l - i_{B1}, \quad (20.12)$$

где i_B — уклон виража в долях единицы; v — скорость движения автомобиля, м/с; g — ускорение свободного падения, м/с²; $K = 1/R$ — кривизна, 1/м; φ_2 — коэффициент поперечного сцепления колеса с дорогой; l — расстояние от начала переходной кривой до расчетного

сечения, м; L — длина переходной кривой, м; b — продольное ускорение автомобиля, м/с²; $i_{В1}$ — поперечный уклон проезжей части в начале виража.

Формулы (20.11) и (20.12) тесно связывают между собой скорость движения автомобиля, характер изменения кривизны и характер изменения поперечного уклона. Нарушение расчетного режима движения приводит к повышенному использованию коэффициента поперечного сцепления φ_2 и соответствующему снижению безопасности движения.

Для расчета геодезических высот вертикальной планировки и получения пространственной поверхности участков отгона виража необходимо знать не только уравнения оси переходной кривой, но и уравнения кромок проезжей части, ее параллельных и непараллельных в случае устройства уширений. Для обеспечения процесса разбивки поперечников при выносе проекта на местность в Союздорпроекте решена задача аналитического представления разбивочных точек кромок проезжей части в системе координат оси соединительного съезда.

С точки зрения обеспечения зрительной плавности и ясности соединительного съезда важным вопросом является аналитическое определение положения кромок проезжей части переменной ширины по длине переходной кривой. Получивший широкое распространение линейный закон отгона уширения приводит к нарушению зрительной плавности проезжей части, проявляющемуся особенно заметно на переходных кривых малой длины, малых радиусах закруглений. С целью улучшения зрительного восприятия проезжих частей соединительных съездов пакетом прикладных программ Союздорпроекта предусмотрены следующие способы отгона уширения:

S -образное изменение кромок по длине переходной кривой по закону тригонометрических функций;

S -образное изменение кромок по длине переходной кривой по закону сопряженных обратных параболических кривых;

применение уравнений кромок на участках с переходными кривыми типа клотоиды с уширением в обе стороны пропорционально длине (рис. 20.37, а);

применение уравнений кромок на участках с переходными кривыми типа краевых клотоид (рис. 20.37, б);

получение координат точек кромок в системе координат оси соединительной ramпы.

После установления закономерностей изменения поперечного уклона по длине переходных кривых различного типа, определения их параметров, определения положения внутренних и внешних кро-

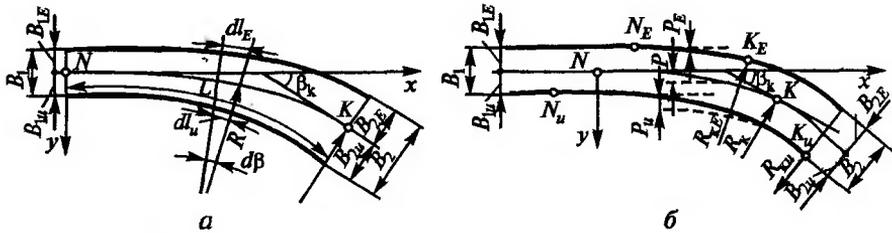


Рис. 20.37. Уширение проезжей части на переходной кривой типа клотоиды:
 а — изменение ширины в обе стороны пропорционально длине; б — посредством краевых клотоид

мок переходят к высотному решению поверхности дороги и съезда в пределах совмещенного участка для обеспечения наиболее благоприятных условий движения и водоотвода с проезжей части. На рис. 20.38 представлены возможные случаи вертикальной планировки на участках ответвлений и примыканий соединительных съездов при конструктивных решениях как по схеме 1 (см. рис. 20.18), так и по схеме 2 (см. рис. 20.19).

Решения, предусматривающие сохранение поперечного уклона в пределах внешней полосы дороги (рис. 20.38 а), применяют при наличии межпетлевых участков с последующими переходно-скоростными полосами и интенсивным движением, а также при организации съездов с полос, предназначенных для местного движения.

Согласно решению, представленному на рис. 20.38, б, поперечный уклон дороги сохраняют неизменным по всей ширине совмещенного участка, а его изменение на съезде происходит на оставшейся части длины переходной кривой. Такое решение применяют при преимущественном движении в прямом направлении.

Решение, представленное на рис. 20.38, в, предусматривает отгон поперечного уклона в соответствии с закономерностью его изменения по длине переходной кривой. Такое решение применяют при преимущественном движении на съезд.

Для схемы 2 ответвления (см. рис. 20.19) применяют решение, представленное на рис. 20.38, г, обеспечивающее возможность отгона выража с закономерностью, свойственной переходной кривой данного типа (см. рис. 20.38, в). Его применяют как для поворотных транспортных потоков, так и для потоков, следующих в прямом направлении, при высокой интенсивности движения в прямом и поворотном направлениях.

В настоящее время пакет прикладных программ Союздорпроекта расширен за счет включения новых программ по расчету сложных правоповоротных соединительных съездов по методу сопряжения элементов и по методу координатного задания оси, программ подсче-

жения (зданий и сооружений дорожной службы по организации ремонта и содержания дорог, зданий и сооружений автотранспортной службы по обслуживанию грузового и организованного пассажирского движения), автостанций и автовокзалов, автобусных остановок и автопавильонов, площадок отдыха, автозаправочных станций — АЗС, станций технического обслуживания автомобилей — СТО, линейных сооружений службы дорожного надзора и безопасности движения — государственной инспекции безопасности дорожного движения ГИБДД); строительства комплекса сооружений *автосервиса* (сооружений общественного питания и торговли, зданий для длительного отдыха — гостиниц, мотелей, кемпингов, санитарно-гигиенических зон, пунктов медицинского обслуживания); создания средств *организации связи* на дорогах — телефонной аварийно-вызывной связи, радиосвязи; установки и применения технических средств *организации и обеспечения безопасности движения* (дорожных знаков и указателей, горизонтальной и вертикальной разметок, направляющих устройств, дорожных ограждений, светофоров, систем автоматизированного управления движением); создания сетей *освещения и озеленения* автомобильных дорог; устройства *защитных сооружений* — снегозадерживающих устройств и насаждений, шумозащитных экранов, ограждений свободных территорий; установки объектов *рекламы и малых архитектурных форм*.

Автобусные остановки и площадки для стоянки автомобилей. При проектировании автобусных остановок предусматривают: остановочные площадки для автобусов, посадочные площадки для пассажиров, автопавильоны, переходно-скоростные полосы для торможения и разгона автобусов с отгонами уширений, тротуары и пешеходные дорожки, туалеты, контейнеры для мусора, а также элементы по организации движения и отделения автобусных остановок от основных полос движения, освещение и архитектурное оформление.

При выборе места для размещения автобусных остановок особое внимание уделяют обеспечению кратчайшего расстояния от «центров тяжести» пассажирообразующих зон и остановочных пунктов других видов транспорта до автобусных остановок.

Автобусные остановки на дорогах I категории (автомагистрали, скоростные дороги) обычно не устанавливают (кроме пересадочных пунктов с междугородными маршрутами, следующих по автомагистралям, на местные автобусные линии, устраиваемых за пределами земляного полотна автомагистрали).

Автобусные остановки вне пределов населенных пунктов располагают на прямых участках дорог или на кривых в плане с радиусами, как правило, не менее 1000 м и продольными уклонами не более

40‰, а в горной местности — на участках, где обеспечена расчетная видимость в плане и продольном профиле.

В пересеченной местности с затяжными продольными уклонами автобусные остановки размещают у вершин выпуклых кривых.

Автобусные остановки не устраивают:

на участках дорог с насыпями высотой более 1,5 м;

в пониженных зонах рельефа местности, где возможны снежные заносы, туманы, гололед;

на вогнутых кривых перед значительными подъемами, в зонах которых водители развивают скорости для их динамичного преодоления;

на участках, для которых расчетный коэффициент безопасности меньше 0,7 или коэффициент относительной аварийности более 20 (см. § 32.5).

Частое расположение автобусных остановок приводит к снижению скоростей транспортных потоков и росту аварийности, тем более существенным, чем выше категория дороги и интенсивность движения. Поэтому минимальные расстояния между автобусными остановками, назначаемые расчетом, устанавливают не менее чем через 3 км на дорогах I—III категорий, в курортных районах и густонаселенной местности не менее чем через 0,6 км и не чаще, чем через 0,5 км на дорогах IV—V категорий.

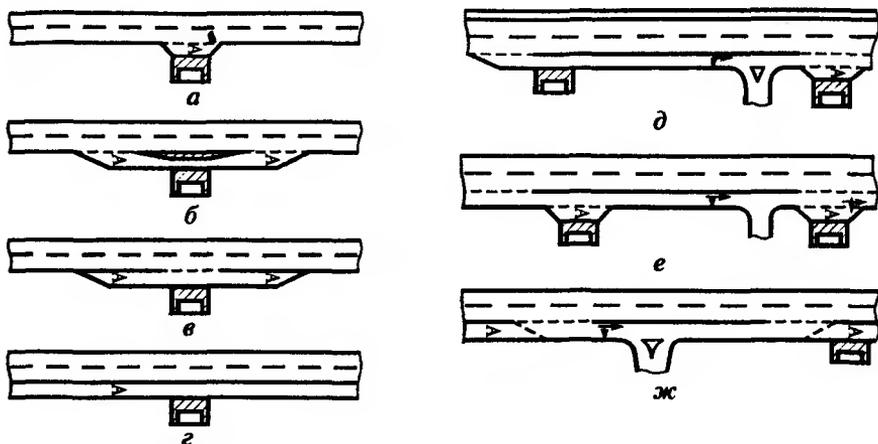
При проектировании автобусных остановок используют различные планировочные решения дополнительных полос в зонах остановок (рис. 21.1) с учетом интенсивностей движения автобусов и других транспортных средств, при этом обычно руководствуются типовыми проектными решениями.

На пересечениях в одном уровне автобусные остановки располагают за пересечениями с совмещением полос разгона для транспортных средств, поворачивающих направо, и обязательным устройством изолированной остановочной площадки для автобусов (кармана).

На пересечениях автомобильных дорог в разных уровнях (для наиболее распространенных «клеверообразных» пересечений) автобусные остановки размещают в соответствии со схемами, приведенными на рис. 21.2 (посадочные площадки заштрихованы).

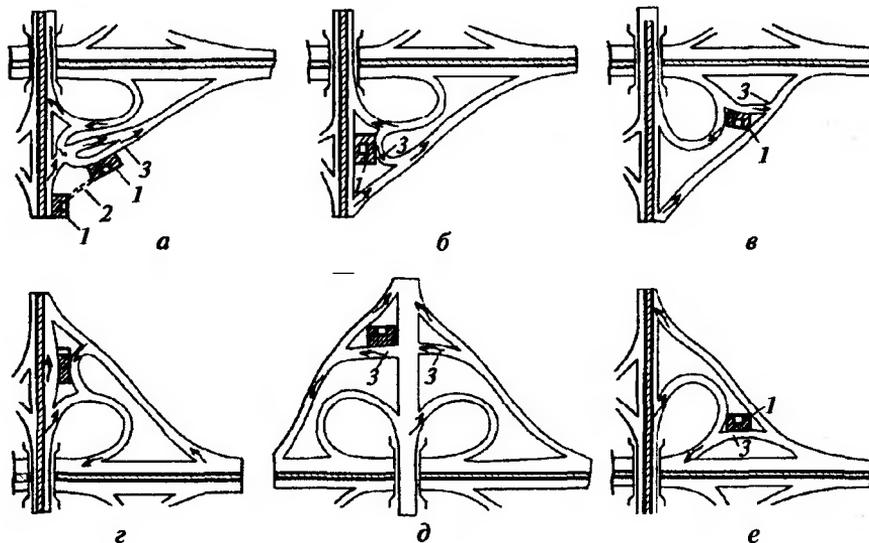
Для обеспечения удобства движения пешеходов в пределах пересечений устраивают пешеходные дорожки и лестничные сходы.

Ширину остановочной площадки и дополнительной полосы принимают равной ширине основных полос проезжей части, но не менее 3 м, а длину площадки — в зависимости от количества одновременно останавливающихся автобусов, но не менее 13 м для одного автобуса, 25 м — для двух и 38 м — для трех.



Р и с. 21.1. Варианты планировочных схем устройства автобусных остановок:

a — изолированная остановочная площадка (карман); *b, в* — дополнительная полоса с разделительным островком (*b*) или без него (*в*); *z* — обособленная дополнительная полоса между соседними автобусными остановками и пересечениями; *d—ж* — дополнительная полоса для совмещения движения автобусов и поворачивающих автомобилей



Р и с. 21.2. Расположение автобусных остановок на пересечениях типа «клеверный лист»:

a—в — с первоначальным заездом автобуса на левоповоротный съезд; *z—e* — то же на правоповоротный съезд; *1* — автобусные остановки; *2* — пешеходные дорожки; *3* — дополнительные съезды

Длину посадочной площадки принимают равной длине остановочной площадки, но не менее 10 м, а ширину — 2 м.

Посадочные площадки приподнимают над проезжей частью на 0,2 м и отделяют от нее бортовым камнем. Покрытия на посадочных площадках принимают такими же, как и на тротуарах. Автопавильоны устанавливают на расстоянии не более 3 м от кромки остановочной площадки.

На дорогах I категории автобусные остановки обычно размещают напротив друг друга с устройством пешеходных переходов в разных уровнях и установкой ограждений на разделительной полосе. На дорогах II—V категорий автобусные остановки смещают по ходу движения (расстояние между ближайшими боковыми сторонами павильонов принимают не менее 30 м) для того, чтобы пассажиры, вышедшие из автобуса и направляющиеся в сторону автобусной остановки на другой стороне дороги, обходили стоящий автобус сзади и некоторое время двигались по тротуару до пешеходного перехода навстречу движению транспортного потока.

При проектировании автобусных остановок особое внимание уделяют их архитектурному оформлению. Планировочные решения автобусных остановок, конструкции автопавильонов, внешняя отделка элементов обстановки, малые архитектурные формы, озеленение и освещение должны композиционно сочетаться с окружающей обстановкой с учетом местных условий, климатических и национальных особенностей.

Площадки отдыха.

Площадки отдыха располагают через 15—20 км на дорогах I—II категорий, через 25—35 км — на дорогах III категории и через 45—55 км — на дорогах IV категории. Размеры площадок устанавливают с учетом ожидаемого количества одновременно стоящих автомобилей, их габаритов и схем установки: параллельно оси проезда площадки, поперек оси проезда площадки или под углом 45° относительно оси проезда площадки.

Вместимость площадок отдыха определяют в зависимости от категории дороги: 20—50 автомобилей на дорогах I категории при интенсивности движения до 30 тыс. авт/сут, 10—15 автомобилей — на дорогах II и III категорий, 5—10 автомобилей — на дорогах IV категории. У пунктов питания, торговли, скорой помощи, источников питьевой воды и в других местах с систематическими остановками транспортных средств устраивают специальные площадки для их кратковременной остановки. Вместимость площадок определяют индивидуально с учетом категории автомобильной дороги, видов оказываемых услуг и частоты их расположения на дороге.

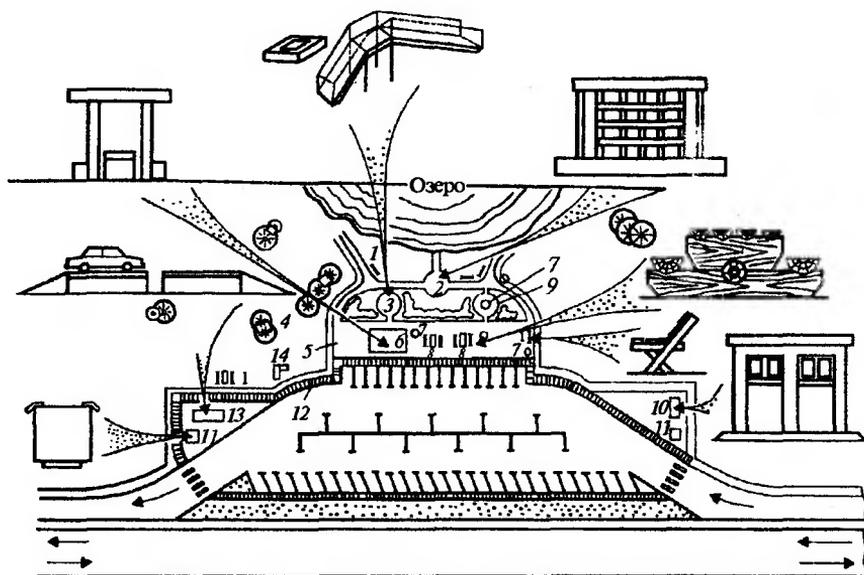


Рис. 21.3. Планировка и оборудование площадки отдыха:

1 — скамейка; 2 — беседка; 3 — детская площадка; 4 — дерево; 5 — пешеходная дорожка; 6 — навес; 7 — урна; 8 — стол со скамейками; 9 — место для курения; 10 — туалет; 11 — мусоросборник; 12 — тротуар; 13 — эстакада; 14 — маршрутная схема

Площадка отдыха обычно состоит из трех планировочных зон, зрительно отделенных друг от друга: зоны стоянки автомобилей с въездами и выездами, зоны отдыха, санитарно-гигиенической зоны (рис. 21.3).

Удаление площадок отдыха от дорог зависит от местных условий. Как правило, их размещают на расстоянии боковой видимости от кромок проезжей части.

Минимальное расстояние от края площадки до кромки основной полосы движения на дорогах II—III категорий принимают не менее 2,7 м.

Площадки отдыха на дорогах I—II категорий устраивают с двух сторон (для обслуживания каждого направления) с размещением одной от другой против направления движения на расстоянии между ними не менее 150 м. На дорогах III—IV категорий площадки обычно устраивают с одной стороны дороги для обслуживания обеих направлений движения.

Площадки отдыха не следует располагать:

на участках дорог с продольными уклонами более 40‰;

на выпуклых кривых в продольном профиле с радиусами менее 10 000 м;

на внутренней стороне кривых в плане с радиусами менее 1000 м;

на участках дорог, проходящих по ценным земельным угодьям.

Автозаправочные станции (АЗС) и дорожные станции технического обслуживания автомобилей (СТО.)

Автозаправочные станции (АЗС) и дорожные станции технического обслуживания автомобилей (СТО) размещают на основе данных обоснований инвестиций (ОИ). Мощность АЗС (число заправок в сутки) принимают по табл. 21.1, а число постов на дорожных станциях технического обслуживания — по табл. 21.2.

Т а б л и ц а 21.1. Мощность и размещение автозаправочных станций

Интенсивность движения, авт/сут	Мощность АЗС, число заправок в сутки	Расстояние между АЗС, км
<i>Одностороннее размещение</i>		
Свыше 1000 до 2000	250	30—40
Свыше 2000 до 3000	500	40—50
Свыше 3000 до 5000	750	40—50
<i>Двустороннее размещение</i>		
Свыше 5000 до 7000	750	50—60
Свыше 7000 до 20 000	1000	40—50

Мощность АЗС, располагаемых в зоне пересечений автомобильных дорог, уточняют в зависимости от протяженности всех обслуживаемых прилегающих участков дорог, интенсивности движения и других расчетных показателей на этих участках.

Т а б л и ц а 21.2. Число постов на станции технического обслуживания автомобилей

Интенсивность движения, авт/сут	Число постов на СТО в зависимости от расстояния между ними, км				
	80	100	150	200	250
<i>Одностороннее размещение</i>					
1000	1	1	1	2	2
2000	1	2	2	3	3
3000	2	2	3	3	5
4000	3	3	2	2	3

Интенсивность движения, авт/сут	Число постов на СТО в зависимости от расстояния между ними, км				
	80	100	150	200	250
<i>Двустороннее размещение</i>					
6000	1	2	3	3	3
8000	2	3	3	3	5
10 000	3	3	3	5	5
20 000	5	5	8	По специальному расчету	
30 000	8	8	По специальному расчету		

АЗС размещают, как правило, вблизи населенных пунктов по возможности в комплексе с другими сооружениями дорожной службы и объектами сервиса в придорожных полосах на участках дорог с уклоном не более 40%, на кривых в плане с радиусами более 1000 м, на выпуклых кривых в продольном профиле с радиусами более 10 000 м и не ближе 250 м от железнодорожных переездов, не ближе 1000 м от мостовых переходов, на участках с насыпями высотой не более 2,0 м. На подъездах к АЗС устраивают переходно-скоростные полосы. На АЗС предусматривают площадку для стоянки 2—3 грузовых и 3—4 легковых автомобилей.

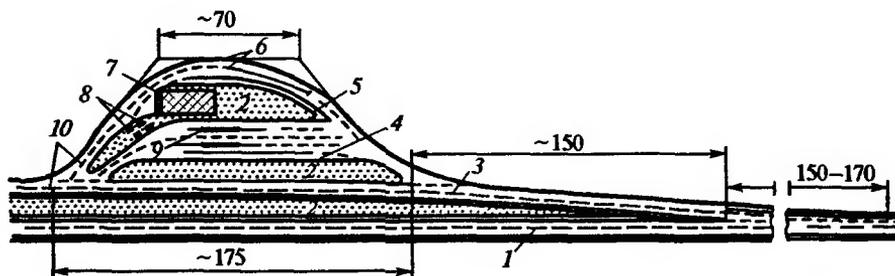
В комплекс АЗС входит здание с помещениями для оператора и торговли смазочными материалами и автозапчастями, а также островки с раздаточными колонками, внутренние проезды и площадки-стоянки с осмотровой эстакадой (рис. 21.4).

При АЗС обычно предусматривают посты мойки и мелкого аварийного ремонта, если в ближайшем населенном пункте отсутствует СТО.

На магистральных дорогах при АЗС, расположенных на подходах к крупным городам, обязательно предусматривают моечные пункты.

При дорожных СТО также предусматривают автозаправочные станции.

Количество необходимых топливораздаточных колонок определяют с учетом перспективной интенсивности и состава транспортного потока, принимая во внимание разную степень использования топливного бака и время обслуживания. При въезде на территорию АЗС устанавливают указатели, информирующие водителей о размещении колонок с разными сортами топлива. Проезжую часть на подходах к колонкам размечают на полосы движения. Длины полос, выделен-



Р и с. 21.4. Схема планировки автозаправочной станции:

1 — проезжая часть автомагистрали; 2 — разделительная полоса или островок; 3 — параллельная проезжая часть; 4 — полоса сквозного проезда; 5 — полоса для бензозаправщиков; 6 — колонка для дизельного топлива; 7 — здание АЗС; 8 — вода и воздух; 9 — колонки для бензина; 10 — линии разметки

ных для ожидания обслуживания, устанавливают достаточными для размещения очереди. На подходах к АЗС обязательно устанавливают знак, информирующий водителей о расстоянии до очередной ближайшей АЗС.

Организация связи.

Организация связи на автомобильных дорогах является необходимым средством управления ремонтно-восстановительными работами и организации дорожного движения: радиосвязь дальнего действия между крупными строительными подразделениями и управлениями строительства и эксплуатации, УКВ-радиосвязь между объектами работ, конторами и транспортными хозяйствами, ультракоротковолновая радиосвязь небольшой мощности для связи с подвижными объектами (автогрейдерами, снегоочистителями, автомобилями службы организации движения), телефонная, а также мобильная телефонная связь.

Технологическую связь для обеспечения работы дорожной службы предусматривают на автомобильных дорогах I категории, а при наличии специальных требований — и на дорогах II и III категорий.

Одной из важнейших функций связи, устраиваемой на автомобильных дорогах, является организация вызова неотложной помощи пострадавшим в случае возникновения экстремальных ситуаций или дорожно-транспортных происшествий, технических неисправностей автомобилей, отсутствия топлива и масел. Системы аварийно-вызывной связи предусматривают на дорогах I категории при соответствующем обосновании и включают в себя переговорные колонки, связанные с диспетчерскими пунктами. Колонки размещают за пределами обочины попеременно с каждой стороны дороги через 4 км или с

одной стороны дороги с интервалом 2 км. Вызов диспетчера осуществляют нажатием кнопки на колонке. Защитный корпус колонки окрашивают в оранжевый цвет и внутри него размещают микрофон и телефон. После нажатия кнопки обеспечивается двусторонняя связь с диспетчером, у которого на табло загорается световой сигнал, указывающий местоположение колонки.

При размещении колонок предусматривают меры по их защите от наезда автомобилей.

21.2. Дорожные знаки

Дорожные знаки, устанавливаемые на дорогах, предназначены для ознакомления водителей с дорожными условиями на пути их следования и предписания им безопасных режимов движения. Дорожные знаки должны соответствовать требованиям ГОСТ Р 52290—2004 «Технические средства организации дорожного движения. Знаки дорожные. Общие технические требования».

Действия дорожных знаков распространяются на проезжую часть, обочины, велосипедные и пешеходные дорожки, у которых или над которыми они установлены.

По назначению дорожные знаки разделяют на восемь групп:

- предупреждающие;
- знаки приоритета;
- запрещающие;
- предписывающие;
- знаки особых предписаний;
- информационные;
- знаки сервиса;
- знаки дополнительной информации (таблички).

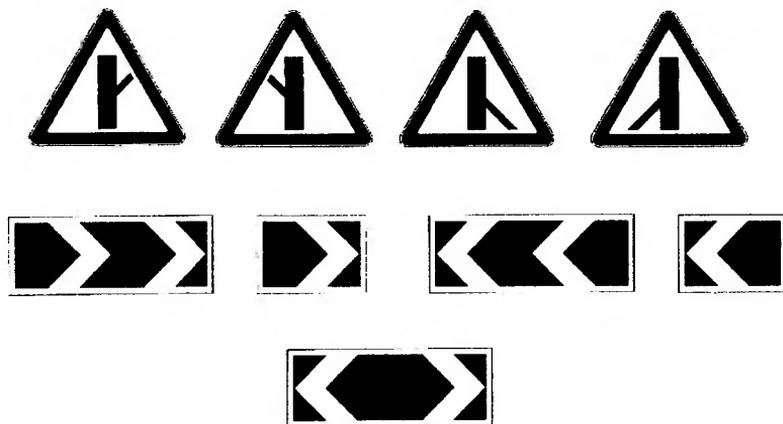
Каждый знак имеет свой номер: первое число номера — номер группы, к которой принадлежит знак; второе — порядковый номер знака в группе. Для знаков, имеющих одинаковое смысловое значение, сохраняют общий порядковый номер, а их разновидности обозначают дополнительными индексами. Каждая группа знаков имеет характерную форму, цвет фона и каймы.

Предупреждающие знаки предназначены для заблаговременного информирования участников движения о характере опасности, месте расположения опасного участка и необходимости принятия мер предосторожности, соответствующих обстановке (рис. 21.5).

Знаки приоритета применяют для указания очередности проезда перекрестков, пересечений отдельных проезжих частей, а также узких участков дорог (рис. 21.6).



Р и с. 21.5. Предупреждающие знаки



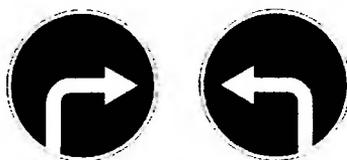
Направление поворота

Р и с. 21.6. Знаки приоритета



Таможня Движение с прицепом
запрещено

Р и с. 21.7. Запрещающие знаки



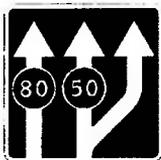
Движение
направо Движение
налево

Р и с. 21.8. Предписывающие знаки

Запрещающие знаки применяют для введения ограничений движения или их отмены, когда необходимая организация движения не может быть обеспечена другими средствами, способами и методами (рис. 21.7).



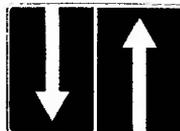
Направления движения по полосе



Начало полосы



Направление движения по полосам

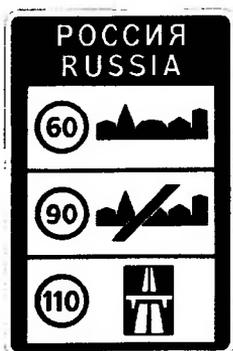


Начало населенного пункта



Конец населенного пункта

Р и с. 21.9. Знаки особых предписаний



Общие ограничения максимальной скорости



Полоса для аварийной остановки

Р и с. 21.10. Информационные знаки

Предписывающие знаки применяют для введения или отмены тех или иных режимов движения как по отдельным направлениям, так и для отдельных видов транспортных средств и пешеходов (рис. 21.8).

Знаки особых предписаний применяют для введения особых режимов движения или их отмены (рис. 21.9).

Информационные знаки применяют для информирования участников движения о расположении на пути следования населенных пунктов и других объектов, а также об установленных режимах движения (рис. 21.10).



Р и с. 21.11. Знаки сервиса

Знаки сервиса применяют для дополнительного информирования водителей о расположении объектов, предназначенных для обслуживания участников движения или оказания им помощи и различных видов услуг, а также о расстоянии до них и направлении движения (рис. 21.11).

Опоры дорожных знаков изготавливают из железобетона, дерева, металлических или асбоцементных труб, обеспечивающих достаточную устойчивость под действием расчетной ветровой нагрузки, при мойке знаков ручным или механизированным способами, а также исключающих возможность преднамеренного их повреждения.

Длину опор знаков определяют в соответствии с ГОСТ 25459—82 с учетом схемы размещения знаков, их количества на одной опоре и типоразмера.

Знаки устанавливают изображением навстречу движению с правой стороны дороги. Их также можно размещать над проезжей частью, устанавливать на разделительной полосе или на левой стороне дороги.

Некоторые знаки могут быть установлены на островках безопасности. При установке знаков обязательно учитывают местные условия, оценивая видимость в светлое и темное время суток, удобство содержания знаков.

В одном поперечном сечении дороги можно устанавливать не более трех знаков, без учета дублирующих знаков и знаков дополни-

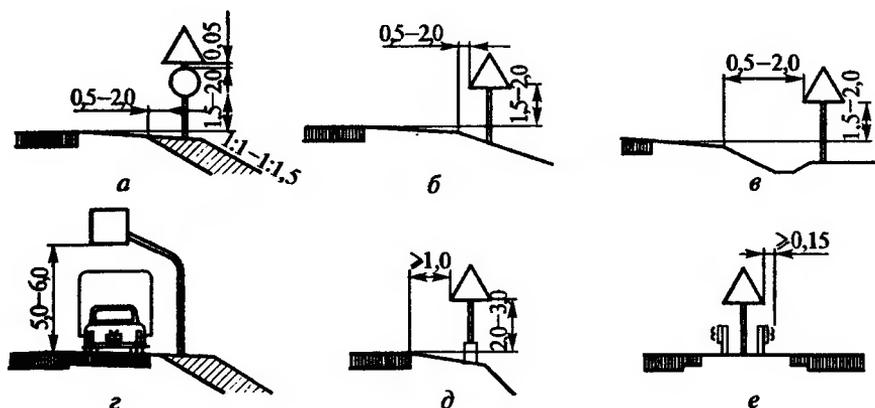


Рис. 21.12. Способы установки знаков вне населенных пунктов

тельной информации (табличек). При этом их необходимо размещать:

на опорах, колонках и стойках (мачтах) или по горизонтали, или по вертикали;

на тросах — растяжках, рамах и кронштейнах, расположенных над проезжей частью — по горизонтали на одном уровне.

Знаки, устанавливаемые на дороге последовательно, располагают вне населенных пунктов на расстоянии не менее 50 м, а в населенных пунктах — не менее 25 м друг от друга.

На автомобильных дорогах опоры знаков следует устанавливать на бермах, присыпанных к обочине (рис. 21.12, а), откосах насыпи (рис. 21.12, б), на полосе отвода за боковой канавой (рис. 21.12, в) или над обочинами (рис. 21.12, г).

Допускается установка опор на обочинах в стесненных условиях (у обрывов, выступов скал, парапетов и т.д.) при условии, что расстояние между кромкой проезжей части и ближайшим к ней краем знака составляет не менее 1 м (рис. 21.12, д). Опоры целесообразно устанавливать за парапетом со стороны откоса, встраивать в блоки парапета или устанавливать между отдельными блоками парапета. На участках, где установлены ограждения, рекомендуется располагать опоры знаков за ограждениями.

Возможна установка знаков на разделительной полосе для дублирования знаков, расположенных с правой стороны дороги или над проезжей частью. Если на разделительной полосе установлены ограждения, то край знака не должен выступать за линию ограждения (рис. 21.12, е).

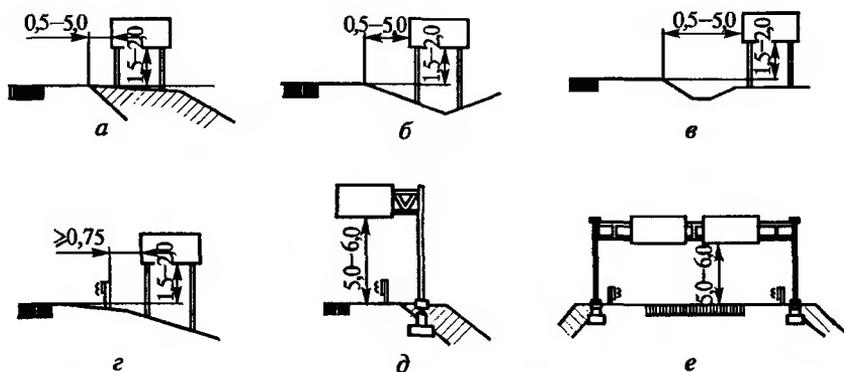


Рис. 21.13. Способы установки предварительных указателей направлений

Большие щиты знаков предварительного указания направлений движения на автомобильных дорогах устанавливают на опорах, расположенных на присыпных к обочине бермах (рис. 21.13, а), откосах насыпей и выемок (рис. 21.13, б) или на полосе отвода за боковой канавой (рис. 21.13, в).

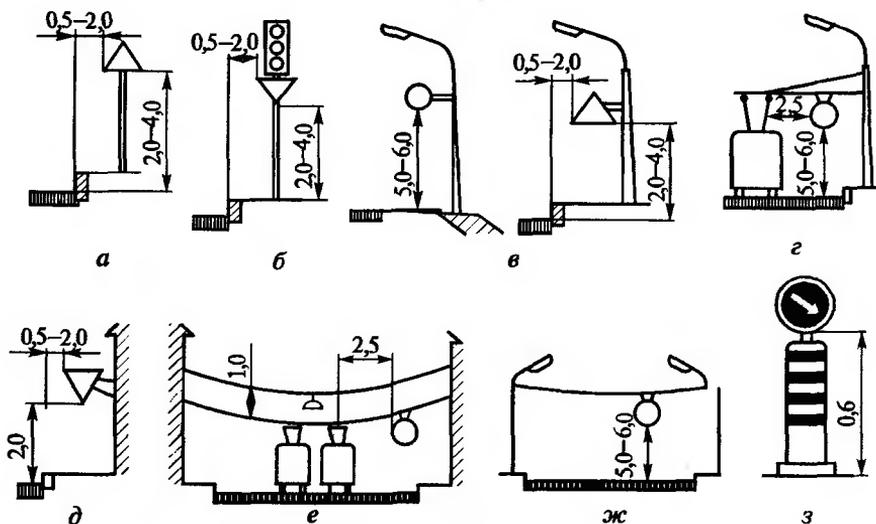
На участках, где установлены ограждения, опоры знаков располагают так, чтобы расстояние между краем знака и опорой было не менее 0,75 м (рис. 21.13, г). Нижний край щита знака должен возвышаться над поверхностью дорожного покрытия на 1,5–2 м.

На участках, где опоры невозможно установить на откосе насыпи или рядом с земляным полотном (на высоких насыпях с крутыми откосами, у водотоков, болот, железнодорожных линий, вблизи застройки и т. д.), щиты знаков размещают над обочинами на консолях, прикрепленных к массивным опорам (рис. 21.13, д). Расстояние от нижнего края щита до поверхности дорожного покрытия должно составлять 5,0–6,0 м.

На дорогах I–II категорий знаки можно устанавливать над проезжей частью на арках, рамах, тросах-растяжках. Опоры несущих конструкций должны располагаться на берме на расстоянии не менее 0,5 м от бровки дороги и по оси разделительной полосы. Расстояние между нижним краем знака и поверхностью дорожного покрытия должно составлять 5,0–6,0 м (рис. 21.13, е).

Допускают установку знаков на пролетных строениях путепроводов и порталах тоннелей при условии, что они не уменьшают габариты этих сооружений.

В населенных пунктах знаки устанавливают: на индивидуальных опорах (рис. 21.14, а), на одной колонке со светофором (рис. 21.14, б),



Р и с. 21.14. Способы установки знаков в населенных пунктах

на кронштейнах, прикрепленных к осветительным мачтам, опорам контактной сети трамваев и троллейбусов (рис. 21.14, в, г) или стенам зданий (рис. 21.14, д), на тросах-растяжках, прикрепленных к зданиям (рис. 21.14, е), или между осветительными мачтами (рис. 21.14, ж). Допускается установка знаков над сигнальными тумбами (рис. 21.14, з).

Знаки, расположенные справа по ходу движения, дублируют на левой стороне дороги, на разделительной полосе или над проезжей частью, если условия движения таковы, что расположенный справа знак может быть не замечен водителем из-за плохой видимости или затенения знаков крупногабаритными транспортными средствами, движущимися по первым полосам проезжей части.

21.3. Дорожная разметка

Разметкой называют надписи и другие обозначения, применяемые как самостоятельно, так и в сочетании с дорожными знаками или светофорами, на проезжей части дорог с усовершенствованными покрытиями, бортовых камнях и бордюрах, элементах инженерных дорожных сооружений и обстановки дороги.

Разметка регламентирует режимы и порядок движения и является средством визуального ориентирования водителей транспортных средств.

Разметку подразделяют на две группы: *горизонтальную* и *вертикальную*. Каждому виду разметки присваивают номер, состоящий из цифр, обозначающих: первое число — номер группы, к которой принадлежит разметка (1 — горизонтальная, 2 — вертикальная); второе — порядковый номер разметки в группе; третье — разновидность разметки.

Разметка, наносимая на усовершенствованные покрытия дорог и элементы дорожных сооружений, должна соответствовать ГОСТ Р 51256—99, а в процессе эксплуатации разметка должна отвечать требованиям ГОСТ Р 50597—93.

К *горизонтальной разметке* относят: линии, надписи, стрелы и другие обозначения, которые наносят на усовершенствованные дорожные покрытия.

В городах горизонтальную разметку применяют на магистральных дорогах и улицах, дорогах и улицах местного значения, а в сельских населенных пунктах — на дорогах и улицах, по которым происходит движение маршрутных транспортных средств. Вне населенных пунктов — на дорогах, имеющих ширину проезжей части 6 м и более при интенсивности движения 1000 авт/сут и более.

Разметку применяют и на других дорогах, когда это необходимо для обеспечения безопасности дорожного движения.

Различные виды горизонтальной разметки (рис. 21.15) применяют для:

разделения транспортных потоков, движущихся в противоположных направлениях (осевая линия);

обозначения границ полос движения на дорогах с двумя и более полосами для движения в одном направлении;

обозначения края проезжей части (краевая линия);

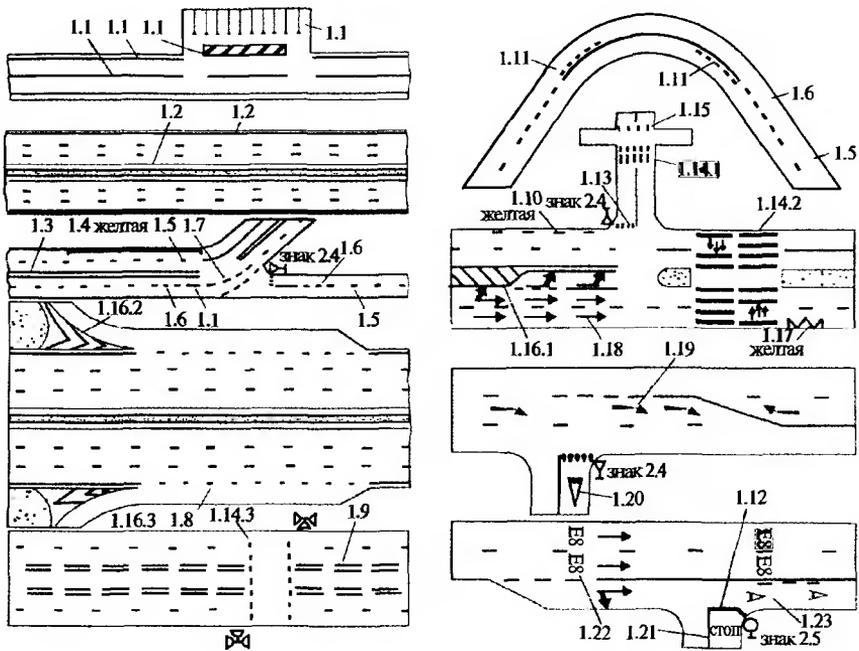
разделения транспортных потоков противоположных направлений (осевая линия) на дорогах, имеющих четыре и более полос движения в обоих направлениях с учетом переходно-скоростных и дополнительных полос;

разделения транспортных потоков попутных направлений;

обозначения границ полос движения в пределах перекрестков;

обозначения границ между переходно-скоростными полосами и основной полосой движения;

обозначения границ полос, на которых движение меняется на противоположное (реверсивные линии);



Р и с. 21.15. Виды горизонтальной разметки

разделения транспортных потоков противоположных или попутных направлений при необходимости запрещения перестроения транспортных средств (барьерные линии);

обозначения линии остановки транспортных средств перед перекрестками (стоп-линии);

выделения мест пересечения проезжей части пешеходами;

выделения мест пересечения проезжей части велосипедистами;

обозначения направляющих островков;

обозначения остановок маршрутных транспортных средств и стоянок легковых такси;

обозначения номера дороги (маршрута);

дублирования дорожных знаков.

Допускается наносить надписи, не предусмотренные ГОСТ Р 51256—99 и являющиеся дополнительным средством информации, не вводящим каких-либо ограничений (названия населенных пунктов, объектов туризма и т.д.).

Временную разметку удаляют одновременно со снятием временных знаков и демонтажем ограждающих и направляющих устройств.

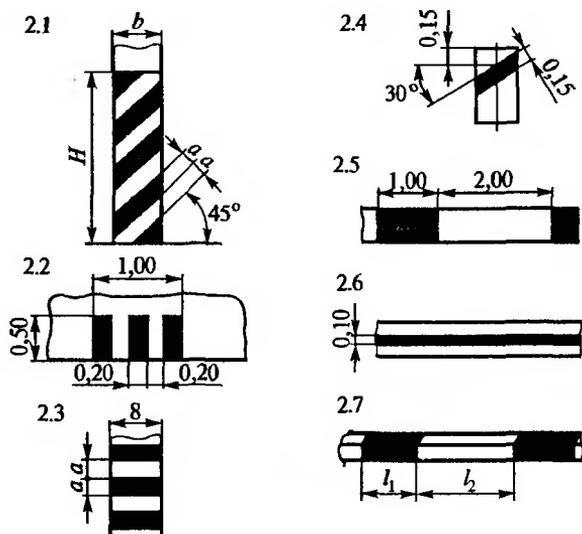


Рис. 21.16. Виды вертикальной разметки

В *вертикальную разметку* входят: линии и обозначения, наносимые на пролетные строения и опоры мостов и путепроводов, торцовые поверхности порталов тоннелей, на парапеты, дорожные ограждения, бортовые камни и другие сооружения и элементы оборудования дорог для улучшения их видимости участниками дорожного движения (рис. 21.16). Вертикальную разметку применяют для:

обозначения вертикальных элементов мостовых сооружений, опор освещения, деревьев, буферных устройств и т.д., препятствий, расположенных в пределах обочины на расстоянии менее 1 м от края проезжей части при отсутствии обочины, а также в других случаях, когда эти элементы представляют опасность для движущихся транспортных средств;

обозначения нижнего края пролетных строений мостовых сооружений и порталов тоннелей, расположенных на высоте менее 5 м;

обозначения круглых тумб в случаях при расположении их на разделительных полосах, приподнятых направляющих островках или приподнятых островках безопасности;

обозначения сигнальных столбиков в соответствии с ГОСТ Р 50970—96, надолб и т.д.;

обозначения боковых поверхностей дорожных ограждений;

обозначения боковых поверхностей бортовых камней бордюров у препятствий.

Для горизонтальной разметки используют два цвета: белый и желтый. Вертикальная разметка представляет собой сочетание полос белого и черного цветов.

Разметку автомобильных дорог, кроме дорог IV категории, выполняют с применением световозвращающих материалов.

При применении различных материалов для устройства разметки автомобильных дорог необходимо, чтобы они обладали определенными технико-эксплуатационными свойствами. К числу таких свойств относятся: хорошая видимость разметки при любых погодных условиях, высокая износоустойчивость, безопасность для движущихся транспортных средств, технологичность материалов при нанесении их на покрытия и минимальная стоимость.

Видимость разметки при любых погодных условиях является одним из важнейших показателей, поскольку около 95% информации о дорожных условиях водитель воспринимает визуально.

Износоустойчивость разметки под действием колес проезжающих автомобилей определяет срок ее службы. Материалы для устройства разметок должны обеспечивать срок службы не менее одного сезона для краски и не менее 3—5 лет для пластика.

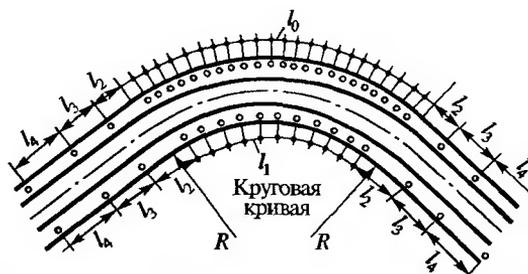
Разметочный материал, нанесенный на покрытие, не должен ухудшать условия безопасности движения транспортных средств за счет изменения величины коэффициента сцепления. С этой целью коэффициент сцепления линий разметки может быть ниже, чем у покрытия, не более чем на 25%.

Технологичность разметочного материала при устройстве разметки определяется временем его высыхания, которое не должно превышать 20—30 мин.

21.4. Направляющие устройства

Направляющие устройства предназначены для указания водителям изменения направления движения, расположения границ проезжих частей и обочин, протяженности и формы опасных участков дороги или дорожных сооружений. К направляющим устройствам относят: сигнальные столбики, тумбы с искусственным освещением, направляющие островки и островки безопасности.

Направляющие сигнальные столбики и тумбы высотой 0,75—0,85 м предназначены для обеспечения видимости внешнего края обочин и опасных препятствий в темное время суток и при неблагоприятных метеорологических условиях.



Р и с. 21.17. Сигнальные столбики на бровке земельного полотна на кривой в плане

Направляющие островки предназначены для разделения движения транспортных потоков по направлениям, островки безопасности — для выделения на проезжей части зон для остановки пешеходов.

Направляющие тумбы (в том числе с искусственным освещением) устанавливают: в начале разделительных полос; перед торцевыми частями подпорных стенок транспортных тоннелей; на приподнятых направляющих островках и островках безопасности; перед любыми препятствиями на дороге, вызывающими изменение траектории движения.

В соответствии с требованиями (ГОСТ Р 52289—2004 «Технические средства организации дорожного движения. Правила применения дорожных знаков, разметки, светофоров, дорожных ограждений и направляющих устройств») сигнальные столбики устанавливают на автомобильных дорогах без искусственного освещения, когда не требуется установка удерживающих ограждений (рис. 21.17):

в пределах кривых в продольном профиле в зависимости от радиуса кривых с шагом от 12 до 50 м и на подходах к ним по три столбика с каждой стороны дороги;

в пределах кривых в плане в зависимости от радиуса кривых с шагом от 10 до 50 м и на подходах к ним по три столбика на подходе с каждой стороны дороги;

на прямолинейных участках дорог при высоте насыпи более 2 м и интенсивности движения более 1000 авт/сут — через 50 м;

на кривых в плане на пересечениях и примыканиях автомобильных дорог в одном уровне, через 3 м;

на железнодорожных переездах с обеих сторон переезда, через каждые 1,5 м;

у мостов и путепроводов перед ограждениями и после них, по три столбика с двух сторон дороги до и после сооружения, через 10 м;

у водопропускных труб — по три столбика с каждой стороны дороги через каждые 10 м и по три столбика с двух сторон дороги до и после трубы;

на дорогах I категории — на всем протяжении, через 50 м.

Сигнальные столбики устанавливают на обочинах на расстоянии 0,35 м от бровки земляного полотна, при этом расстояние от кромки проезжей части до столбиков должно составлять не менее 1,0 м.

Направляющие тумбы (в том числе с искусственным освещением) устанавливают в населенных пунктах.

Приподнятые на высоту 0,15—0,2 м направляющие островки устраивают на дорогах при суммарной интенсивности движения на пересечениях дорог не менее 1000 авт/сут. Приподнятые островки безопасности устраивают на наземных пешеходных переходах при интенсивности движения транспортных средств не менее 400 авт/сут на одну полосу проезжей части.

21.5. Дорожные ограждения

Дорожные ограждения устанавливают для предотвращения неуправляемых съездов транспортных средств с откосов насыпей, падения с мостов, путепроводов, эстакад, переездов разделительных полос, наездов на массивные препятствия, а также для упорядочения движения пешеходов.

В связи с этим ограждения устанавливают:

на обочинах автомобильных дорог;

на газонах, полосах между тротуаром и бровкой земляного полотна, тротуарах городских дорог и улиц;

с обеих сторон проезжей части мостовых сооружений;

на разделительных полосах автомагистралей, скоростных дорог, многополосных автомобильных дорог обычного типа, городских дорогах и улицах, на мостовых сооружениях.

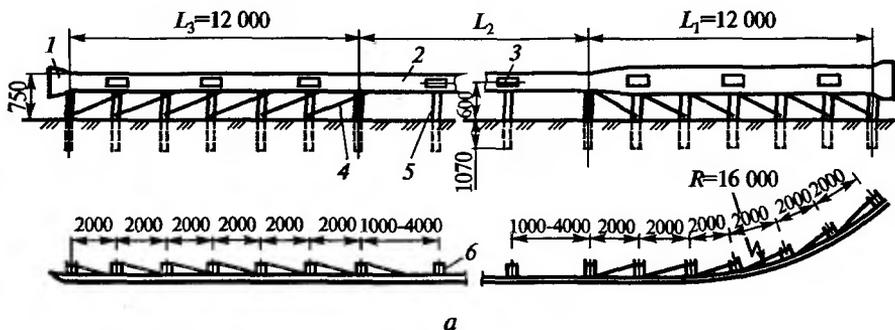
Современные ограждения подразделяют:

на классы: боковые или фронтальные;

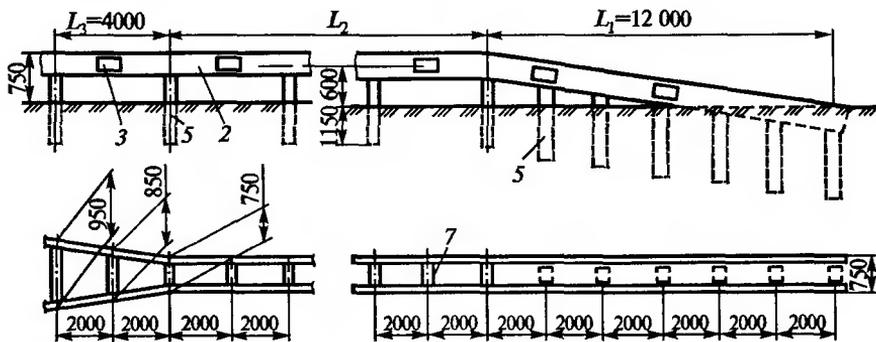
типы: по способу передачи нагрузки от наезжающих транспортных средств на земляное полотно (первого типа при наличии деформируемых стоек, второго типа — «парапет», характеризуемого передачей нагрузок непосредственно на земляное полотно);

группы: по способу соединения ограждений с полотном дороги — дорожные, мостовые.

Вид ограждения определяют признаки его компоновки и исполнения. Например, боковые ограждения могут быть односторонними или двусторонними; могут быть сборным или монолитным и т.д.



а



б

Рис. 21.18. Металлические ограждения барьерного типа:

а — односторонние; б — двусторонние на разделительной полосе; 1 — концевой элемент; 2 — планка; 3 — световозвращающий элемент; 4 — диагональная связь; 5 — стойка; 6 — жесткая консоль; 7 — консоль-распорка

Боковые ограждения рассчитывают на наезд грузового автомобиля под углом 20° со скоростью 50 км/ч (рис. 21.18).

Они должны отвечать следующим основным требованиям:

иметь достаточную податливость для достижения расчетного прогиба ограждения 0,50—1,25 м и ограничения инерционных перегрузок (в долях от ускорения свободного падения), измеренных в центре масс автомобиля (продольная перегрузка — не более 12, поперечная — 9, вертикальная — 10);

плавно корректировать траекторию движения транспортного средства таким образом, чтобы при ударе угол его отхода от ограждения был не более угла наезда и не вызывал потери устойчивости транспортного средства против опрокидывания при его контакте с ограждением.

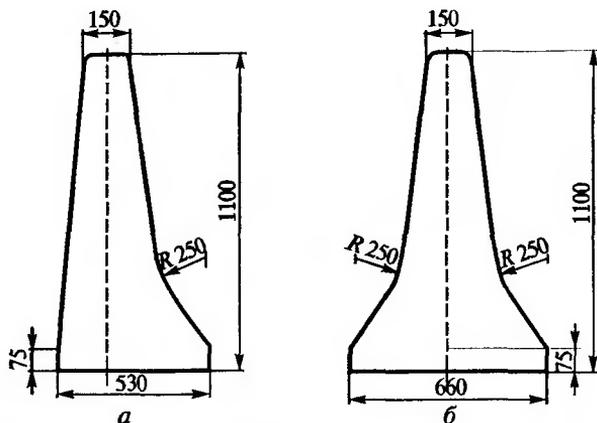


Рис. 21.19. Ограждение железобетонное парапетного типа:
а — одностороннее; *б* — двустороннее на разделительной полосе

В последние годы все большее распространение получают железобетонные ограждения парапетного типа (монолитные и сборные). Монолитные ограждения изготовляют непосредственно на дороге, используя бетонную смесь и специальную бетоноукладочную машину со скользящей опалубкой. Сборные ограждения изготовляют в виде блоков длиной 3, 6 или 9 м (рис. 21.19).

В поперечном сечении парапетные ограждения имеют форму ломаной или криволинейной трапеции и рассчитаны на одностороннее или двустороннее силовое воздействие транспортных средств. Сборные блоки закрепляют к железобетонной плите различными штырями, а монолитные ограждения заглубляют в слой дорожной одежды или грунт на 200—400 мм. Во избежание удара транспортного средства о торец ограждения начальные и конечные блоки изготовляют с наклонной верхней гранью.

На мостах и путепроводах применяют различные конструкции ограждений, отличающиеся материалами, из которых они изготовлены, высотой, способами закрепления к тротуарным блокам и пролетным строениям. Кроме направляющих ограждений, на дорогах все большее распространение получают амортизирующие устройства, рассчитанные на полное рассеивание кинетической энергии транспортного средства при фронтальном ударе.

К числу дорожно-транспортных происшествий с особо тяжелыми последствиями относятся фронтальные столкновения транспортных средств с массивными препятствиями и съезды транспортных средств с дороги.

При фронтальном наезде транспортного средства происходит прогиб торцевой радиусной части балки внутрь ограждения с образованием центральной и двух боковых петель. Центральная петля схватывает переднюю часть транспортного средства и удерживает его за счет сил сопротивления деталей металлических конструкций ограждения и перемещения инерционных модулей, в качестве которых используют изношенные покрышки автомобильных шин.

На обочинах автомобильных дорог барьерное ограждение устанавливают на расстоянии 0,50—0,85 м от бровки земляного полотна до стойки барьерного ограждения, парапетное — на расстоянии 0,50 м от бровки земляного полотна до ближнего края парапетного ограждения и не менее 1 м от кромки проезжей части до лицевой поверхности балки ограждения.

На разделительных полосах автомобильных дорог двусторонние барьерные или парапетные ограждения устанавливают на расстоянии не менее 1 м от кромки проезжей части.

Высоту боковых ограждений принимают от 0,75 до 1,1 м, при этом на разделительных полосах автомобильных дорог двусторонние ограждения барьерного типа выполняют также функции защиты от ослепления фарами встречных автомобилей в ночное время.

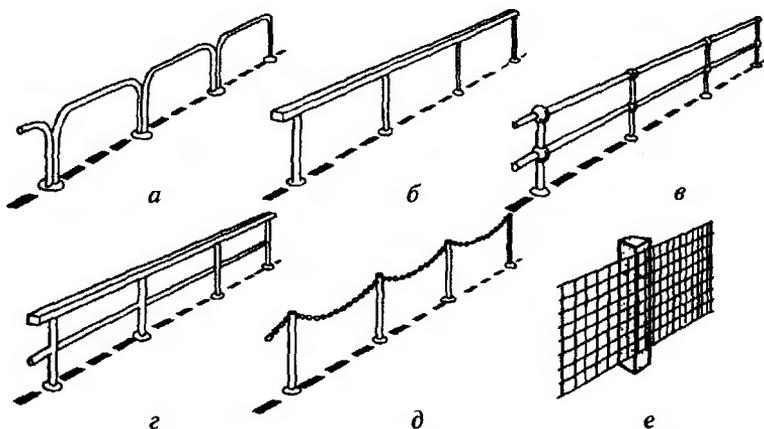
Начальный и концевой участки барьерного и парапетного ограждений, устанавливаемых на обочинах, устраивают с отгоном 1:20 к бровке земляного полотна. При этом балки барьерных ограждений и верхние плоскости парапетных ограждений начальных и концевых участков понижают до поверхности земли.

На начальных и концевых участках балки одно- и двусторонних барьерных ограждений и верхние плоскости парапетных ограждений, устанавливаемых на разделительной полосе, понижают до земли с уклоном 1:15.

Над переходными плитами в местах сопряжения мостового сооружения с насыпями подходов устанавливают такие же ограждения, как и на мостах.

Парапетные ограждения не должны препятствовать отводу воды с поверхности проезжей части, обочин (полос безопасности) дорог и мостовых сооружений.

Для регулирования пешеходного движения применяют конструкции ограждений *перильного* типа (рис. 21.20, а—г) из стальных труб, цепей (рис. 21.20, д) и сетки (рис. 21.20, е).



Р и с. 21.20. Ограждения удерживающие пешеходные (перила)

Удерживающие пешеходные ограждения (перила) устанавливают у внешнего края тротуара, на насыпях на расстоянии не менее 0,3 м от бровки земляного полотна.

Высоту удерживающих пешеходных ограждений (перил) принимают не менее 1,1 м.

21.6. Освещение автомобильных дорог

Для обеспечения безопасности движения транспортных средств, а также повышения пропускной способности автомобильных дорог в темное время суток предусматривают наружное стационарное электрическое освещение:

- на дорогах I категории с расчетной интенсивностью движения 20 000 авт/сут и более;

- на средних и больших мостах и путепроводах;

- на автозаправочных станциях и в зонах расположения комплексов обслуживания движения;

- на пересечениях дорог I и II категорий между собой (в одном и в разных уровнях);

- на соединительных рампах развязок движения в разных уровнях и на подходах к ним на расстоянии не менее 250 м от начала переходно-скоростных полос;

- на железнодорожных переездах;

- в транспортных тоннелях на дорогах I и II категорий и на подходах к ним на расстоянии не менее 150 м от порталов;

в пешеходных тоннелях, на лестничных сходах и площадках перед входами в тоннель;

под путепроводами на дорогах I—III категорий, если длина проезда под ними превышает 30 м;

на автобусных остановках и в других местах сосредоточения пешеходов.

Если расстояние между соседними освещаемыми участками составляет менее 250 м, устраивают непрерывное освещение, исключая чередование освещенных и неосвещенных участков.

При освещении автомобильных дорог руководствуются следующими нормами. Вне населенных пунктов средняя яркость проезжей части дорог, мостов и путепроводов должна составлять: 0,8—1,0 кд/м² на дорогах I категории; 0,6 кд/м² на дорогах II категории; 0,4 кд/м² на соединительных рампах развязок движения в разных уровнях и подходах к пересечениям. Среднюю горизонтальную освещенность тротуаров мостов и путепроводов назначают согласно СНиП 23-05—95.

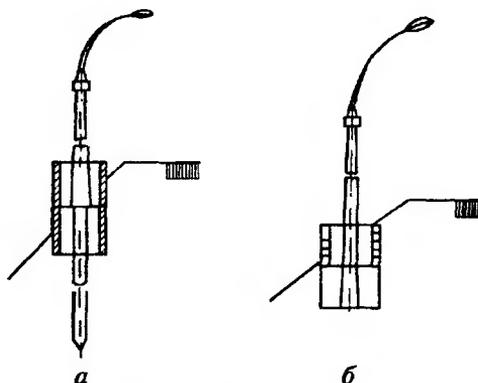
Нормы освещения автодорожных тоннелей и проездов под путепроводами (длиной более 60 м) принимают по СНиП 32-04—97. Электрическое освещение должно иметь все железнодорожные переезды. Подходы к железнодорожным переездам должны быть освещены на протяжении 100 м от крайнего рельса.

Опоры светильников устанавливают, как правило, за бровкой земляного полотна на расстоянии от нее не менее 0,5 м. На насыпях высотой до 3 м для установки опор устраивают присыпные бермы размером 2 × 2 м. При большей высоте насыпи и наличии устойчивых откосов опоры устанавливают на сваях длиной 5—6 м с оголовком (рис. 21.21, а) или на бермах, огражденных деревянными коробами (рис. 21.21, б), засыпая пазухи в верхней части дренирующим грунтом.

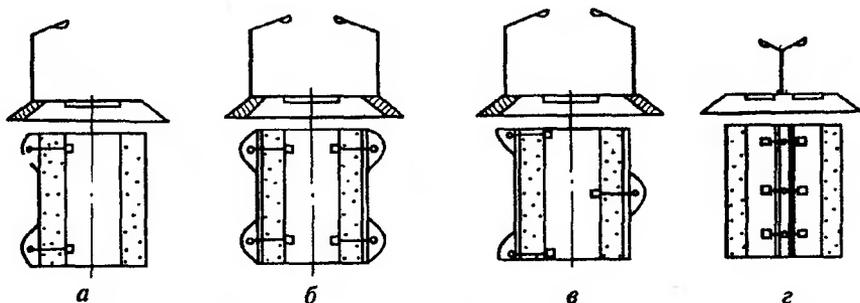
При проектировании осветительных установок учитывают светотехнические характеристики дорожных покрытий, мощность ламп, светораспределение светильников, схему размещения опор. Выбор параметров осветительной установки осуществляют на основе технико-экономических расчетов по дисконтированным затратам.

Для освещения дорог применяют газоразрядные ртутные, металлогалогенные или натриевые лампы высокого давления. Лампы накаливания применяют в основном для освещения пешеходных дорожек и улиц.

Опоры размещают с одной стороны дороги (односторонняя схема), если ширина проезжей части превышает 12 м (рис. 21.22, а). При большей ее ширине опоры устанавливают с двух сторон дороги в прямоугольном (рис. 21.22, б) или шахматном порядке (рис. 21.22, в).



Р и с. 21.21. Способы установки опор светильников на откосах высоких насыпей



Р и с. 21.22. Схемы размещения опор светильников в поперечном профиле дороги

Эти схемы используют и при проектировании осветительных установок на дорогах с разделительной полосой, но в ряде случаев по экономическим соображениям допускают установку опор на разделительной полосе шириной не менее 5 м (рис. 21.22, г) при условии устройства ограждений.

В зависимости от нормируемых значений яркости и освещенности опоры располагают через 25—40 м, а светильники подвешивают на высоте 6—12 м. На закруглениях дорог в плане радиусом менее 600 м опоры устанавливают у обочины на внешней стороне кривой. При этом расстояния между опорами на закруглениях дорог уменьшают по сравнению с расстояниями, принятыми для прямолинейных участков (табл. 21.15).

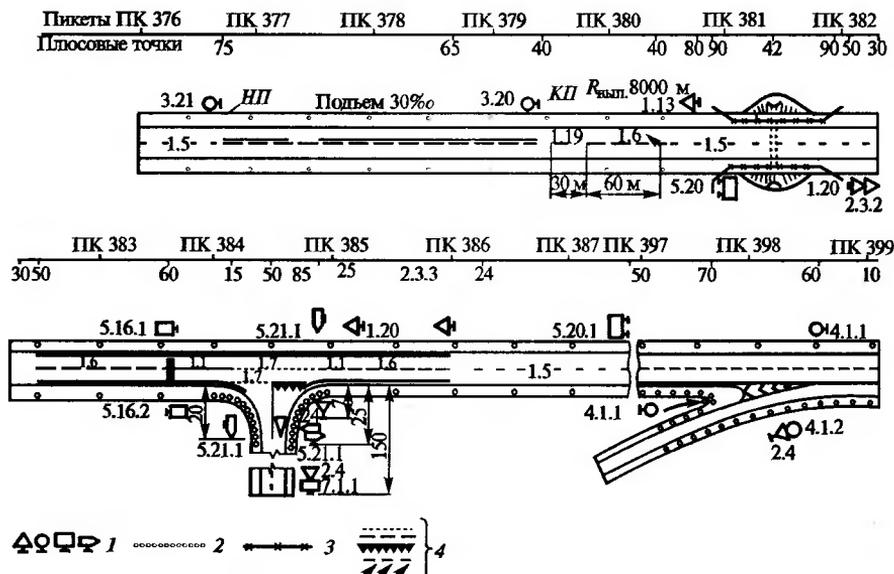
Таблица 23.15. Величины относительных расстояний между опорами
светильников на горизонтальных кривых

Радиус кривой в плане, м	600	400	200	100
Отношение расстояния между опорами на кривой в плане к расстоянию на прямолинейном участке	1,0	0,8	0,5	0,45

Включение освещения участков автомобильных дорог производят при снижении уровня естественной освещенности до 20 лк, а отключение — при его повышении до 10 лк.

Электроснабжение осветительных установок автомобильных дорог, а также технических средств организации дорожного движения надлежит осуществлять от электрических распределительных сетей ближайших населенных пунктов, производственных, сельскохозяйственных предприятий, объектов других организаций и ведомств.

При проектировании автомобильных дорог составляют график обустройства дороги, на котором схематично показывают расположение основных сооружений и технических средств организации движения.



Р и с. 21.23. Схема инженерного обустройства дороги:

1 — дорожные знаки; 2 — направляющие столбики; 3 — дорожные ограждения; 4 — дорожная разметка; НП — начало подъема; КП — конец подъема

На отдельные сложные узлы, а в отдельных случаях и на всю дорогу составляют схему обстановки дороги, на которой указывают расположение дорожных знаков, разметки, ограждений, осветительных установок, направляющих устройств (рис. 21.23).

Схему вычерчивают в масштабе 1:500 (для населенных пунктов 1:200), на ней указывают пикетажное положение мест установки знаков, начала и конца однотипных линий разметки. При составлении схемы обстановки дорог разрабатывают мероприятия в следующем порядке: установка дорожных знаков; устройство дорожной разметки; установка дорожных ограждений и сигнальных столбиков; освещение дороги.

Раздел шестой

ЗЕМЛЯНОЕ ПОЛОТНО И ДОРОЖНЫЕ ОДЕЖДЫ

Глава 22

ПРОЕКТИРОВАНИЕ ЗЕМЛЯНОГО ПОЛОТНА ДОРОГ

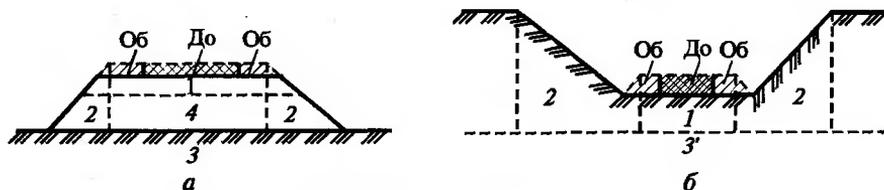
22.1. Элементы земляного полотна и общие требования к нему

Земляное полотно относится к числу наиболее объемных, сложных и разнообразных по своей конструкции элементов автомобильных дорог. От качества проектирования земляного полотна во многом зависят стоимость строительства автомобильных дорог, надежность в эксплуатации, эксплуатационные расходы, эстетические достоинства дорог и безопасность движения.

К одному из основных требований, предъявляемых к земляному полотну, относят обеспечение его прочности в целом и устойчивости отдельных его элементов под многократным воздействием нагрузок от подвижного состава и природных факторов.

Основные элементы земляного полотна представлены на рис. 22.1:

верхняя часть земляного полотна 1 (рабочий слой) — зона, ограниченная по высоте снизу глубиной, равной 2/3 глубины промерзания, но не менее 1,5 м, считая от верха покрытия;



Р и с. 22.1. Элементы земляного полотна:

a — насыпь; *b* — выемка; До — дорожная одежда; Об — обочина

откосная часть 2 — зоны, ограниченные с боков поверхностями откосов и вертикалями, проходящими через бровки насыпей или выемок, а снизу — основанием насыпи или выемки;

основание насыпи 3 — зона, расположенная под насыпью в пределах естественной грунтовой толщи, мощность основания, учитываемая при проектировании, устанавливают в зависимости от инженерно-геологических особенностей грунтового массива, в частности от свойств грунтов, но не менее ширины насыпи понизу;

основание выемки 3' — зона, расположенная ниже нижней границы рабочего слоя; мощность основания, учитываемая при проектировании, устанавливают в зависимости от инженерно-геологических особенностей грунтового массива и может достигать размера, равно-го заложению внешнего откоса;

ядро насыпи 4 — зона, расположенная ниже рабочего слоя и ограниченная снизу основанием насыпи, а с боков — вертикалями, проходящими через бровки насыпи.

Конструкция земляного полотна включает в себя также систему поверхностного водоотвода (лотки, кюветы, боковые резервы, каналы) и различные специальные удерживающие и поддерживающие конструкции, предназначенные для обеспечения устойчивости самого земляного полотна или склонов, на которых оно расположено.

Земляное полотно должно быть прочным, устойчивым и стабильным, т.е. элементы его не должны разрушаться или деформироваться на величины, недопустимые с точки зрения нормальных условий эксплуатации дороги с учетом условий и срока ее службы.

Для обеспечения устойчивости элементов земляного полотна предусматривают инженерные мероприятия в соответствии с механизмом нарушения прочности и устойчивости данного элемента: осуществляют обоснованный выбор соответствующих грунтов для насыпей; обеспечивают правильное расположение и требуемую степень уплотнения грунтов, защиту грунтов от источников увлажнения устройством дренажей, гидроизоляции и т.д., защиту от опасных температурных воздействий, от эрозии, волнобоя; обосновывают геометрические параметры, конструкцию поперечного сечения, а также высоты насыпей и глубины выемок. Указанные мероприятия осуществляют комплексно с учетом местных условий.

Земляное полотно устраивают в виде насыпей или выемок. Высоты насыпей и глубины выемок устанавливают после определения положения проектной линии продольного профиля. Наиболее рациональные решения получают при комплексном проектировании продольного профиля совместно с земляным полотном.

При назначении конструкции земляного полотна учитывают категорию дороги, тип дорожной одежды, высоту насыпи или глубину выемки, свойства грунтов, используемых в земляном полотне, особенности инженерно-геологических и гидрогеологических условий проектируемого участка дороги и другие природные особенности района строительства. Кроме того, учитывают условия производства работ (сезонность, наличие строительной техники, сроки производства работ и т.д.), а также накопленный опыт эксплуатации дорог в данном районе.

При установлении геометрической формы земляного полотна и его конструкции учитывают обеспечение незаносимости дороги снегом, безопасность движения, а также эстетические и экологические требования.

При проектировании применяют либо типовые проектные решения земляного полотна, либо индивидуальные решения. В большинстве случаев используют типовые конструкции с индивидуальной привязкой, при которой уточняют некоторые параметры (например, величина и время осадки основания насыпи, глубина промерзания, коэффициенты заложения устойчивых откосов, размеры пригрузочных берм и т.д.). Для типовых решений используют типовые проекты, учитывающие многолетний опыт строительства и эксплуатации земляного полотна.

Индивидуальные решения или индивидуальную привязку типовых решений осуществляют во всех случаях, когда необходимы: проверка устойчивости откосов или склона, на котором расположено земляное полотно; оценка устойчивости или деформаций основания насыпи; учет возможных осадок за счет доуплотнения во времени слоев грунта самой насыпи; меры по защите земляного полотна от опасных геологических процессов; специальный учет неблагоприятных свойств особых грунтов, а также в случаях применения нетрадиционных конструктивных решений и т.д.

Для насыпей индивидуальное проектирование осуществляют в следующих случаях:

- при высоте насыпи более 12 м;
- на участках временного подтопления, а также при пересечении постоянных водотоков и водоемов;
- при наличии слабых оснований;
- на болотах глубиной более 4 м при применении выторфовывания;
- на болотах при поперечном уклоне минерального дна болота более 1:10;
- при использовании в насыпях грунтов повышенной влажности;

при недостаточном возвышении покрытия над уровнем грунтовых или поверхностных вод;

при применении конструкции земляного полотна со специальными прослойками (термоизолирующими, гидроизолирующими, армирующими и т.д.);

при специальном поперечном профиле (с откосами повышенной крутизны, сложного поперечного профиля и т.д.);

при использовании в насыпи грунтов особых разновидностей.

Индивидуальные решения при проектировании выемок применяют:

при глубине выемки более 12 м в нескальных и 16 м в скальных грунтах при благоприятных инженерно-геологических условиях;

при слоистой толще с наклоном пластов в сторону проезжей части;

в случае наличия водоносных горизонтов в основании выемки или водоносных горизонтов, вскрываемых выемкой;

при глубине выемок более 6 м в глинистых и пылеватых грунтах в районах избыточного увлажнения и сезонного промерзания;

в глинистых и скальных размягчаемых грунтах, теряющих прочность под воздействием погодно-климатических факторов;

в набухающих грунтах при опасности их увлажнения.

Наряду с этим индивидуальные решения применяют также во всех случаях сооружения земляного полотна в сложных инженерно-геологических условиях:

на косогорах круче 1:3;

при наличии или возможности развития опасных геологических процессов (оползни, обвалы, карстообразование, осыпи, сели, снежные лавины, наледи, вечная мерзлота или подземный лед и т.д.).

Индивидуально проектируют также земляное полотно, сооружаемое взрывными методами или средствами гидромеханизации.

22.2. Грунты для возведения земляного полотна

Грунты при проектировании земляного полотна классифицируют в соответствии с общей инженерно-геологической классификацией грунтов согласно ГОСТу 25100—95 «Грунты. Классификация».

При проектировании земляного полотна дорог различают несколько характерных видов грунтов.

Крупнообломочные скальные грунты — обломки скальных пород различных размеров, получаемых искусственным путем при механической разработке или залегающих в естественных условиях в виде аллювиальных и делювиальных отложений.

Крупнообломочные скальные грунты (глыбовые, щебенистые, валунные или галечниковые) являются, как правило, хорошим материалом для возведения земляного полотна, поскольку они практически не впитывают влагу, устойчивы к ветровой и водной эрозии и не теряют своих прочностных характеристик при проникновении воды в промежутки между обломками скальной породы. Однако применение крупнообломочных скальных грунтов вызывает определенные трудности при их разработке и уплотнении.

Близкими по своим физико-механическим свойствам являются отходы металлургической и каменноугольной промышленности, также находящие достаточно широкое применение в дорожном строительстве при возведении земляного полотна и дорожных одежд (металлургические шлаки, породы отвалов каменноугольных шахт).

Гравийные и песчаные грунты обладают хорошей водопроницаемостью, не теряют своей прочности при увлажнении и не склонны к влагонакоплению при зимнем промерзании. Песчаные грунты (за исключением мелкозернистых пылеватых) являются привлекательным материалом для возведения земляного полотна дорог и дренирующих конструктивных слоев дорожных одежд. Однако в связи с невысокой сопротивляемостью размывам текущей водой и ветровой эрозии откосы песчаных насыпей и выемок в песчаных грунтах необходимо укреплять. Особенно надежными должны быть укрепления откосов насыпей на поймах рек в связи с возникающими в паводки продольными течениями и волнобоем.

Супесчаные грунты содержат небольшое количество глинистых частиц, придающих им связность. При увлажнении супесчаные грунты, как правило, сохраняют сопротивляемость нагрузкам, обеспечивая устойчивость земляного полотна. Насыпи дорог из супесчаных грунтов возводят как в засушливых районах, так и в местах избыточного увлажнения.

Супесчаные пылеватые грунты содержат более 50% частиц диаметром менее 0,25 мм, поэтому они в увлажненном состоянии менее устойчивы и склонны к зимнему накоплению влаги при промерзании и пучинообразованию. Водонасыщенные пылеватые супесчаные и песчаные грунты при динамических воздействиях от проходящих транспортных средств и волнобоя приходят в плывунное состояние и полностью теряют свою несущую способность, что часто приводит к потере местной устойчивости откосов.

Пылеватые суглинки и тяжелые пылеватые супеси, содержащие большое количество мелких (до 0,05 мм) фракций, особенно подвержены процессам зимнего влагонакопления и пучинообразования. На откосах земляного полотна эти грунты при увлажнении легко прихо-

дят в текучее состояние и легко размываются. На дорогах I—III категорий верхнюю часть земляного полотна в неблагоприятных гидрогеологических условиях на глубину до 1,2 м отсыпают из непылеватых устойчивых грунтов.

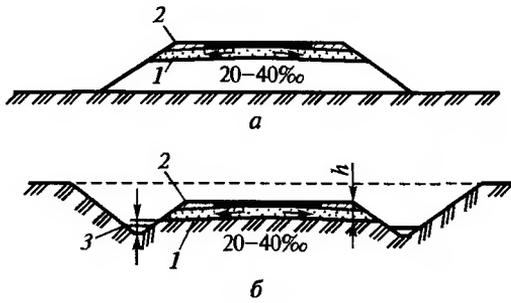
Суглинистые грунты являются весьма приемлемым материалом для возведения земляного полотна дорог. Они достаточно устойчивы в откосах высоких насыпей и глубоких выемок.

Глинистые грунты обладают высокой связанностью и малой водопроницаемостью, они медленно насыщаются влагой и столь же медленно просыхают. Эти грунты часто используют, если их влажность в условиях естественного залегания не превышает *оптимальной* (при которой требуемое уплотнение достигается при минимальной работе на уплотнение) для отсыпки насыпей в сухих местах и в местах краткосрочного увлажнения. В местах длительного увлажнения (например, на поймах рек) глинистые грунты для возведения земляного полотна дорог обычно не используют, поскольку при переувлажнении они переходят в мягкопластичное и текучепластичное состояние и не поддаются уплотнению.

Илистые и торфянистые грунты подвержены значительным объемным изменениям при колебаниях влажности. Илистые грунты при переувлажнении теряют связность и приходят в плавунное состояние с полной потерей несущей способности. Торфянистые грунты под действием собственного веса насыпи и подвижного состава сильно сжимаемы и использование их в конструкциях земляного полотна дорог нежелательно, а в насыпях недопустимо. Поэтому илистые и торфянистые грунты в основаниях земляного полотна и дорожных одежд для исключения просадок часто подлежат полному или частичному удалению с последующей их заменой на прочные (удаление илистых грунтов, полное или частичное выторфовывание на болотах) (рис. 22.2).

При разработке грунтов дорожно-строительными машинами в ходе возведения земляного полотна происходит нарушение естественной структуры и разрыхление, поэтому последующее использование их для сооружения насыпей дорог требует размещения грунтов различного состава и свойств в насыпях с соблюдением определенных правил и тщательного уплотнения (рис. 22.3):

разнородные по составу и физико-механическим свойствам грунты размещают в теле насыпей горизонтальными слоями, используя связные маловодопроницаемые грунты в нижних слоях, а несвязные хорошо дренирующие грунты — в верхних;



Р и с. 22.2. Замена слабых грунтов:

a — в насыпях; *б* — в выемках; *1* — устойчивый грунт; *2* — присыпные обочины из устойчивого грунта; *3* — повышение низа устойчивого морозозащитного слоя над уровнем воды в кювете не менее 0,2 м; *h* — не менее 0,8 м

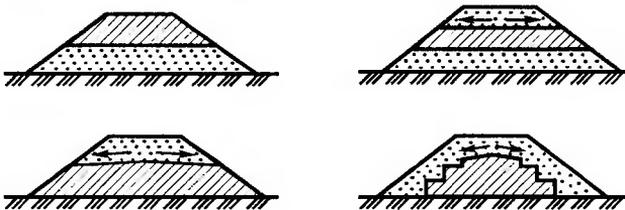
поверхности слоям водонепроницаемых грунтов придают двухскатный поперечный уклон 20—40‰ (от оси дороги) для обеспечения отвода просочившейся воды из тела насыпи на откосы;

устройство насыпей при уширении земляного полотна реконструируемых дорог из другого грунта допускают, как правило, при нарезке ступеней на откосах уширяемой насыпи. Не рекомендуется уширение связным грунтом насыпей из несвязного водопроницаемого грунта;

запрещается бессистемная, случайная отсыпка насыпей дорог из грунтов различных физико-механических свойств и состава.

Надежность, устойчивость земляного полотна и его элементов в эксплуатации во многом зависят от степени и качества уплотнения грунтов. Разрыхленный при разработке дорожно-строительными машинами грунт в теле возводимой насыпи с течением времени самоуплотняется под действием вертикальных сжимающих напряжений от собственного веса и веса проходящего по дороге подвижного состава (рис. 22.4).

Однако необходимая степень самоуплотнения грунта земляного полотна дорог достигается лишь в течение достаточно длительного времени. Поэтому при современных методах скоростного дорожного строительства в ходе отсыпки земляного полотна, во избежание воз-

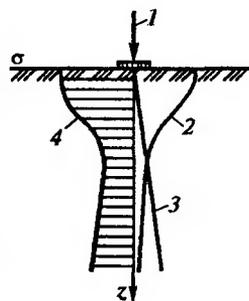


Р и с. 22.3. Размещение в теле насыпи различных по водопроницаемости грунтов:

точками показан несвязный грунт, штриховкой — связный

Р и с. 22.4. Вертикальные сжимающие напряжения в теле насыпи:

1 — внешняя нагрузка; 2 — напряжения от внешней нагрузки; 3 — напряжения от собственного веса грунта; 4 — эпюра суммарных напряжений



никновения неравномерных просадок, грунты его подвергают искусственному механическому уплотнению.

Для того чтобы в теле насыпи не происходило неравномерных просадок от уплотнения, пористость грунта ε_z на глубине z должна соответствовать напряжениям σ_z , возникающим в грунте.

Как следует из рис. 22.4, напряжения от собственного веса грунта возрастают пропорционально глубине рассматриваемого слоя. В то же время наибольшие напряжения от подвижного состава возникают в верхних слоях земляного полотна, резко затухая с глубиной. Для определения необходимой степени уплотнения различных слоев грунта в земляном полотне строят эпюру суммарных напряжений $\sigma = f(z)$, разделяя земляное полотно по глубине на несколько характерных зон.

Для высоких насыпей (высотой более 6 м) в верхнем слое насыпи мощностью до 1,5 м — *рабочем слое* — действуют статические напряжения от собственного веса и динамические от проезжающих транспортных средств, при этом последние превалируют в общей эпюре напряжений. Кроме того, в этой зоне интенсивно развиваются процессы изменения водного режима грунтов (увлажнение, просыхание) в теплый период года и процессы зимнего влагонакопления в период с отрицательными температурами.

В средних слоях насыпей на глубинах от 1,5 до 6 м — *ядре насыпи* — суммарные напряжения от собственного веса и подвижного состава оказываются наименьшими.

И наконец, в нижних слоях на глубинах более 6 м — *основании насыпи* — превалируют напряжения от собственного веса грунта и напряжения вновь возрастают.

При невысоких насыпях до 1,5 м и в выемках напряжения в грунтах земляного полотна от подвижного состава распространяются в естественный подстилающий грунт и в рыхлых пахотных и просадочных грунтах может происходить их уплотнение и просадка. Поэтому в этих случаях до начала земляных работ верхние слои естественного грунта подвергают механическому уплотнению катками.

Для оценки степени уплотнения грунтов используют понятие *коэффициента уплотнения* — отношения величины плотности грунта при заданной степени уплотнения δ_n к максимальной его плотности δ_{\max} , соответствующей стандартному уплотнению, осуществляемому в лабораторных условиях при *оптимальной* влажности грунта, при которой требуемого уплотнения достигают при минимальной работе по сравнению с другими влажностями.

Сообразно эпюре суммарного напряжения в грунте (см. рис. 22.4) необходимый коэффициент уплотнения при возведении насыпей принимают:

- до глубины 1,5 м — 1,0—0,98;
- на глубинах от 1,5 до 6 м — 0,95;
- на глубинах более 6 м — 0,98—0,95.

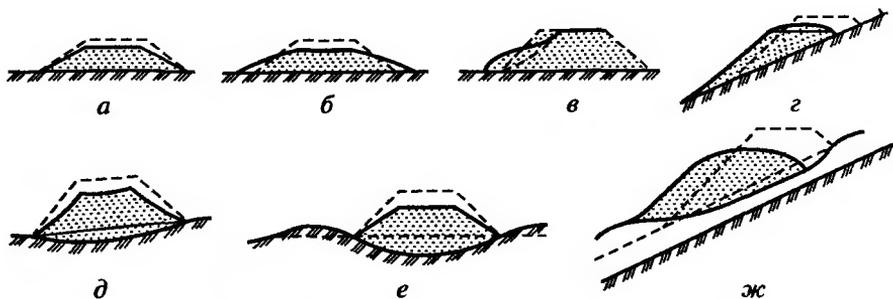
22.3. Виды деформаций земляного полотна и грунтового основания

Перечисленные ранее сложные и особые случаи возведения и работы земляного полотна требуют разработки индивидуальных проектов. Индивидуальное проектирование сопровождается, как правило, различными геотехническими расчетами, связанными как с оценкой устойчивости земляного полотна в целом, так и отдельных его элементов, а также с прогнозом размеров и времени неизбежных деформаций.

Земляное полотно работает в условиях переменного воздействия нагрузок от подвижного состава, увлажнения и погоднo-климатических факторов. При неблагоприятном сочетании этих воздействий могут произойти необратимые деформации земляного полотна (рис. 22.5, 22.6).

Сообразно этому, при индивидуальном проектировании земляного полотна наиболее часто приходится решать следующие задачи:

- расчеты устойчивости насыпей на косогорах;
- оценка устойчивости слабых оснований под земляным полотном;
- расчет осадки высоких насыпей на слабых основаниях;
- оценка скорости осадки насыпей на слабых основаниях;
- инженерные способы ускорения осадки высоких насыпей и оценки их эффективности;
- расчеты общей устойчивости откосов земляного полотна;
- оценка местной устойчивости откосов пойменных насыпей, укрепленных плоскими капитальными конструкциями, под действием волновых нагрузок;



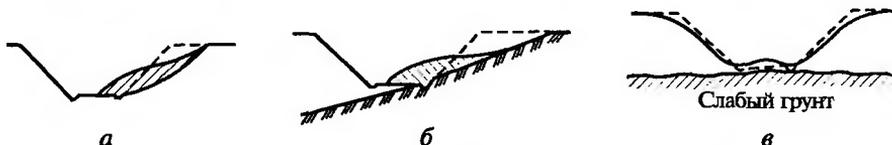
Р и с. 22.5. Виды деформаций насыпей:

a — осадка в результате уплотнения грунта в теле насыпи; *б* — растекание переувлажненного грунта; *в* — оползание откоса насыпи; *г* — сползание насыпи по косогору; *д* — осадка слабого основания; *е* — осадка с выпором слабого грунта; *ж* — смещение в связи с оползанием склона

расчеты устойчивости высоких насыпей от расползания;
 расчеты устойчивости подпорных стенок;
 оценка устойчивости глубоких выемок;
 теплотехнические расчеты при проектировании земляного полотна.

Для оценки устойчивости земляного полотна и отдельных его элементов или оценки ожидаемых неизбежных деформаций земляного полотна и развития их во времени используют расчетные схемы, основанные на анализе часто наблюдающихся в природе разрушений и деформаций. Геотехнические расчеты земляного полотна автомобильных дорог основаны главным образом на законах механики грунтов, изучающей деформации и сопротивления грунтов внешним нагрузкам.

Устойчивость насыпей и откосов земляного полотна оценивают сопоставлением их расчетного коэффициента устойчивости K_p с его нормативным значением K_n , учитывающим степень репрезентативности исходных данных, значение сооружения в части последствий его разрушения и надежность используемых методов расчета.



Р и с. 22.6. Виды деформаций выемок:

a — оползание откоса выемки; *б* — то же, при слоистых напластованиях; *в* — выжимание слабого грунта под действием веса откосов

Устойчивость земляного полотна считают обеспеченной при условии $K_p \geq K_n$. При этом K_p определяют из известных уравнений статики:

$$K_p \sum_{i=1}^n P_{сд_i} - \sum_{i=1}^n P_{уд_i} = 0,$$

или

$$K_p \sum_{i=1}^n M_{сд_i} - \sum_{i=1}^n M_{уд_i} = 0,$$

где $\sum_{i=1}^n P_{сд_i}$ и $\sum_{i=1}^n P_{уд_i}$ — сумма проекций сдвигающих и удерживающих сил на оси координат; $\sum_{i=1}^n M_{сд_i}$ и $\sum_{i=1}^n M_{уд_i}$ — сумма моментов сдвигающих и удерживающих сил; n — количество расчетных отсеков, на которые делится массив обрушающегося грунта земляного полотна.

Нормативный коэффициент устойчивости K_n определяют как:

$$K_n = K_1 K_2 K_3 K_4 K_5 K_m, \quad (22.1)$$

где K_1 — коэффициент, учитывающий степень достоверности данных о характеристиках грунтов, принимают: $K_1 = 1$ при большом количестве испытаний образцов; $K_1 = 1,05$ при испытании не менее 5 образцов; $K_1 = 1,1$ при испытании не менее 3 образцов грунта; K_2 — коэффициент, учитывающий категорию дороги, принимают: $K_2 = 1,03$ для дорог I и II категорий; $K_2 = 1$ для дорог III—V категорий; K_3 — коэффициент, учитывающий степень ущерба для народного хозяйства в случае аварии сооружения, принимают: $K_3 = 1,2$, если разрушение представляет опасность для движения либо вызывает перерыв движения более чем на 1 сут; $K_3 = 1$, если нарушение устойчивости вызывает снижение скоростей движения или нарушает работу водоотводных устройств; K_4 — коэффициент, учитывающий соответствие расчетной схемы естественным инженерно-геологическим условиям, принимают: $K_4 = 1,05$, если расчет ведется методом попыток; $K_4 = 1$, если плоскость ослабления грунтового массива ясно выражена и грунт однороден; K_5 — коэффициент, учитывающий вид грунта и его работу в сооружении, принимают: $K_5 = 1,03$ для песчаных грунтов; $K_5 = 1,05$ для глинистых грунтов; K_m — коэффициент, учитывающий особенности метода расчета, принимают: $K_m = 1$ при расчетах устойчивости откосов методом Терцаги — Крея и Шахунянца; $K_m = 0,8$ при расчетах по методу Маслова — Берера.

В совокупности нормативный коэффициент устойчивости K_n может меняться в пределах от 1 до 1,5.

Многие геотехнические расчеты земляного полотна автомобильных дорог основаны на использовании относительно простых и физически ясных расчетных схем. В связи с этим решение многих расчетных задач проектирования земляного полотна не вызывает существенных затруднений и при обычной ручной технологии. Однако, учитывая, что при автоматизированном проектировании на порядок и более возрастает число прорабатываемых вариантов и подвариантов плана трассы и сообразно этому в еще большее число раз увеличивается рассматриваемое количество вариантов положения проектной линии продольного профиля, вопрос полной автоматизации геотехнических расчетов земляного полотна автомобильных дорог остается актуальным. Кроме того, все более широко внедряемые новые методы математического моделирования при проектировании земляного полотна (методы конечных разностей, конечных элементов МКЭ и конечных объемов МКО), а также математические методы оптимизации требуют уже обязательного использования современной компьютерной техники.

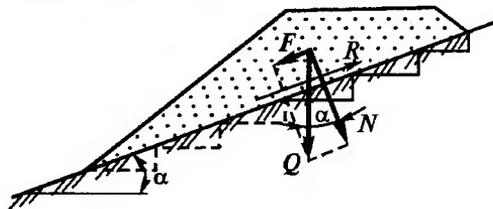
22.4. Устойчивость земляного полотна на косогоре

Насыпи на косогорах, которые часто приходится возводить при строительстве автомобильных дорог в горной и пересеченной местности, могут терять устойчивость в результате сползания, если направленная параллельно поверхности косогора составляющая ее веса окажется больше силы трения, удерживающей насыпь на косогоре (рис. 22.7).

Согласно схеме, представленной на рис. 22.7, удерживающая сила равна:

$$R = fQ \cos \alpha,$$

где Q — вес насыпи; f — коэффициент трения грунта насыпи по поверхности косогора; α — угол наклона поверхности косогора.



Р и с. 22.7. Силы, действующие на насыпь на косогоре

Сила, сдвигающая насыпь:

$$F = Q \sin \alpha.$$

Тогда коэффициент устойчивости насыпи против сдвига:

$$K_p = \frac{R}{F} = \frac{Q f \cos \alpha}{Q \sin \alpha} = \frac{f}{i}, \quad (22.2)$$

где i — поперечный уклон поверхности косогора.

Как следует из выражения (22.2), мероприятия по повышению устойчивости насыпей на косогорах должны сводиться к повышению величины коэффициента трения f , которое осуществляют одним из следующих инженерных мероприятий:

при уклоне косогора от 1:10 до 1:5 осуществляют снятие дерна из-под насыпи;

при поперечном уклоне от 1:5 до 1:3 на поверхности косогора устраивают уступы высотой по 0,5 м, используя для этой цели автогрейдеры, бульдозеры или экскаваторы. Уступам придают уклон в сторону косогора от 10 до 20‰ (см. рис. 22.7).

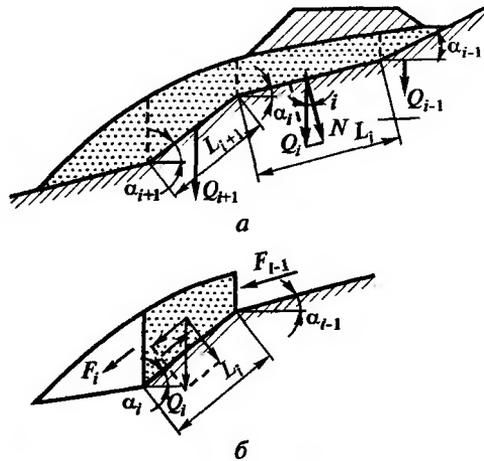
При этом предполагают, что грунт косогора настолько прочен, что срез может произойти только по сечению насыпного грунта. При слабых грунтах косогора устройство уступов не обеспечивает достижения цели. В этом случае, так же как при уклонах поверхности косогора более 1:3, для обеспечения устойчивости насыпи с низовой ее стороны устраивают подпорные стенки или отсыпают контрбанкетты.

Если насыпь возводят на наклонных напластованиях, лежащих на устойчивых коренных породах, то в результате дополнительной нагрузки от веса насыпи склон может оползти по поверхности коренных пород, особенно в неблагоприятный по степени увлажнения период года. Это же может случиться и при подрезании грунтового массива косогора откосом выемки. В таких случаях проверку устойчивости склона производят выделением в оползающей части массива в соответствии с очертанием поверхности скольжения расчетных вертикальных отсеков (предложение проф. Г.М. Шахунянца) и к расчету устойчивости каждого из них под влиянием собственного веса и давления от смежных отсеков (рис 22.8).

Величину давления, передающегося от i -го отсека на нижележащий ($i + 1$), определяют:

$$F_i = F_{i-1} \cos(\alpha_i - \alpha_{i-1}) + Q_i \sin \alpha_i - Q_i \cos \alpha_i \operatorname{tg} \varphi - cL_i,$$

где F_{i-1} — давление, передающееся от отсека, расположенного выше; Q_i — вес i -го отсека (включая вес соответствующей части насыпи);



Р и с. 22.8. Схема определения устойчивости массива грунта против оползания по плотным подстилающим породам:

a — разбивка на расчетные отсеки; *b* — условия равновесия расчетного отсека

L_i — длина поверхности скольжения в пределах i -го отсека; f — угол внутреннего трения сползающего грунта; c — сцепление грунта.

Коэффициент устойчивости каждого расчетного отсека:

$$K_{pi} = \frac{Q_i \cos \alpha_i \operatorname{tg} \varphi + cL_i}{F_{i-1} \cos(\alpha_i - \alpha_{i-1}) + Q_i \sin \alpha_i}.$$

Последовательно рассматривая условия устойчивости грунта расчетных отсеков, можно определить места наиболее вероятного возникновения трещин разрыва, соответствующие границам отсеков с $K_{pi} < 1$, и мест образования бугров выпирания у нижних границ тех же самых расчетных отсеков.

22.5. Расчет осадки земляного полотна на слабом основании

Насыпи автомобильных дорог — это весьма массивные сооружения, под действием веса которых может происходить уплотнение естественного грунтового основания, сопровождаемое осадкой всего сооружения. Особенно актуальной эта задача становится при проектировании насыпей дорог на слабых основаниях (торфы, сапрпели, илы, мокрые солончаки, лёссовые грунты, переувлажненные глинистые грунты, иольдиевые глины и т.д.). Деформированное очертание поперечного профиля земляного полотна в результате осадки основа-

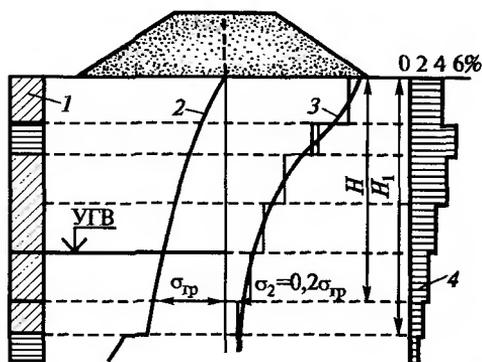


Рис. 22.9. Расчетная схема вычисления осадки от сжатия грунта под насыпью:

1 — геологический разрез; 2 — кривая напряжений от собственного веса грунта; 3 — кривая напряжений от веса насыпи; 4 — эпюра относительного сжатия слоев грунта

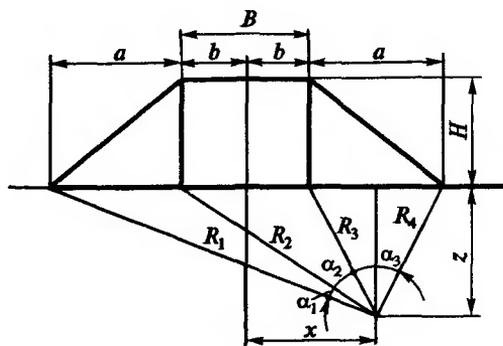
ния необходимо знать для того, чтобы компенсировать эту осадку соответствующим увеличением объемов земляных работ.

Неравномерные осадки земляного полотна, возникающие в ходе эксплуатации автомобильных дорог, являются причиной появления неровностей покрытий дорожных одежд, ухудшающих условия безопасного движения автомобилей и разрушения дорожных одежд — этого самого дорогого элемента автомобильных дорог.

Осадку насыпей дорог определяют на заданных вертикалях поперечного профиля как суммарную деформацию столба грунта до практически несжимаемых плотных слоев. Считают, что мощность «активной зоны», в пределах которой нужно суммировать деформацию грунтовой толщи, необходимо принимать до глубины, на которой напряжения от веса насыпи составляют 0,2 от собственного веса деформируемого грунта для слабосжимаемых (рис. 22.9) и до 0,1 для сильносжимаемых грунтов ($E < 5$ МПа).

В общем случае сжимаемый массив грунта может представлять собой многослойную систему, характеризующуюся различными физико-механическими свойствами слоев и глубиной их залегания на различных вертикалях поперечного сечения земляного полотна. При определении осадок насыпей дорог в практике проектирования наибольшее распространение получил метод послойного суммирования деформаций сжатия отдельных слоев в пределах активной зоны согласно полю напряжений, рассчитанному по формулам теории упругости.

При автоматизированном проектировании каждый слой деформируемой толщи целесообразно делить на значительное количество пластин элементарной толщины, деформации каждой из которых вычисляют в соответствии с действующими в пределах пластины осредненными сжимающими напряжениями. Этот прием позволяет заметно уточнить прогнозы осадок насыпей, отказавшись от традици-



Р и с. 22.10. Схема к расчету сжимающих напряжений в грунтовой толще под дорожной насыпью

онного при обычном проектировании осреднении сжимающих напряжений целиком для каждого геологического слоя.

Поле сжимающих напряжений в грунтовой толще под дорожной насыпью определяют по известной формуле теории упругости (рис. 22.10):

$$\sigma_{\text{нз}} = \frac{p}{\pi a} [a(\alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3) + b(\alpha_1 + \alpha_3) + x(\alpha_1 - \alpha_3)], \quad (22.3)$$

где p — давление на грунт в средней части поперечного профиля; b — $1/2$ ширины земляного полотна ($B/2$); a — заложение откоса насыпи; $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ — углы между лучами, проведенными из точки грунтового массива, для которой отыскивается величина сжимающего напряжения, и проекциями характерных точек поперечного профиля на поверхность земли; x — расстояние от оси дороги до заданной вертикали.

Для удобства применения выражение (22.3) целесообразно представить в декартовых координатах:

$$\sigma_{\text{нз}} = \frac{p}{\pi a} (aA + bB + xC), \quad (22.4)$$

где

$$\alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3 = \arctg \frac{a+b+x}{z} + \arctg \frac{a+b-x}{z} = A;$$

$$\alpha_1 + \alpha_3 = A - \left(\arctg \frac{b+x}{z} - \arctg \frac{x-b}{z} \right) = B;$$

$$\alpha_1 - \alpha_3 = B - 2 \left(\operatorname{arctg} \frac{a+b-x}{z} + \operatorname{arctg} \frac{x-b}{z} \right) = C;$$

где z — ордината (см. рис. 22.10).

Напряжения от собственного веса сжимаемого грунтового основания для каждой вертикали поперечного профиля:

$$\sigma_{6z} = \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^l \gamma_i \Delta h_{ij}, \quad (22.5)$$

где k — число геологических слоев в пределах активной зоны; l — число пластин элементарной толщины, на которые делят каждый геологический слой; Δh_{ij} — толщина j -й пластины i -го геологического слоя.

Границу активной зоны определяют глубиной, на которой для слабосжимаемых грунтов

$$\sigma_{nz} = 0,2\sigma_{6z}; \quad (22.6)$$

для сильносжимаемых грунтов

$$\sigma_{nz} = 0,1\sigma_{6z}. \quad (22.7)$$

Суммарная осадка основания на заданной вертикали:

$$S_m = \sum_{i=1}^k S_i = \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^l \Delta h_{ij} \left(\frac{\varepsilon_{ij}^{(6)} - \varepsilon_{ij}^{(k)}}{1 + \varepsilon_{ij}^{(6)}} \right), \quad (22.8)$$

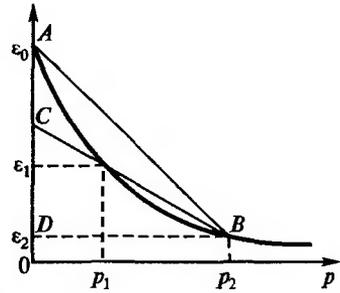
где Δh_{ij} — толщина j -й пластины i -го геологического слоя на заданной вертикали поперечного сечения; S_i — осадка i -го слоя грунта; $\varepsilon_{ij}^{(6)}$ — значение пористости при бытовом давлении, осредненном в пределах j -й пластины i -го слоя; $\varepsilon_{ij}^{(k)}$ — значение пористости при полном давлении, осредненном в пределах j -й пластины i -го слоя.

Как видно из уравнения (22.8), для расчета величины осадки основания насыпи необходимо знать значения уменьшающейся с увеличением нагрузки пористости грунтов в различных слоях грунта, обладающих различными физико-механическими свойствами. Для этой цели для каждого вида грунта соответствующего геологического слоя на основе данных лабораторных испытаний образцов строят компрессионные кривые (рис. 22.11), обладающие следующими характерными свойствами:

компрессионные зависимости представляют собой вогнутые кривые, являющиеся монотонными функциями, не имеющими экстремумов, поскольку пористость с увеличением нагрузки уменьшается;

с увеличением нагрузки компрессионная кривая становится более пологой, в связи с тем что темп уменьшения пористости при деформации грунта как упруго-пластичного тела непрерывно падает.

При наличии данных лабораторных испытаний образцов для автоматизированных расчетов используют аппроксимирующую зависимость гиперболического типа, полученную Е.Л. Фильштейном на основе анализа свойств большого числа компрессионных кривых:



Р и с. 22.11. Общий вид компрессионной кривой

$$\varepsilon = \varepsilon_0 + \frac{p(\varepsilon_0 - \varepsilon_1)}{\frac{(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)(p - p_1)}{(\varepsilon_0 - \varepsilon_2)(p_2 - p_1)} - p}, \quad (22.9)$$

где ε_0 — начальная пористость; (p_1, ε_1) , (p_2, ε_2) — координаты некоторых точек компрессионной кривой (см. рис. 22.11); p — давление.

Выбирая точки p_1 и p_2 компрессионной кривой, обычно руководствуются следующими соображениями. Точку p_2 выбирают в конце интервала напряжений для данного слоя. Точку p_1 выбирают в месте характерного изгиба компрессионной кривой, лежащую между точками p_0 и p_2 . Соответственно выбранным точкам p_1 и p_2 с компрессионной кривой снимают значения ε_1 и ε_2 . Значения ε_0 всегда соответствуют значению $p_0 = 0$.

В случае отсутствия данных лабораторных испытаний образцов грунта, необходимых для построения натурной компрессионной кривой, последняя ориентировочно может быть представлена уравнением проф. Н.Н. Иванова:

$$\varepsilon = \varepsilon_0 - \frac{2,3}{B} \lg p, \quad (22.10)$$

где ε_0 — начальная пористость; B — безразмерный коэффициент, характеризующий сжимаемость грунта и не зависящий от нагрузки.

Значения ε_0 и B при отсутствии данных лабораторных испытаний определяют по табл. 22.1.

Последовательность расчета осадки основания насыпи сводится к следующему:

используя уравнение (22.4), определяют сжимающие напряжения от веса насыпи на вертикали, совпадающей с осью насыпи для середины j -й пластины в пределах каждого i -го геологического слоя;

вычисляют напряжения от собственного веса грунта основания по формуле (22.5);

устанавливают глубину активной зоны по условию (22.6) или (22.7);

для исследуемой вертикали, находящейся на расстоянии x от оси насыпи, по уравнению (22.4) вычисляют напряжения для середины каждой j -й пластины грунта каждого i -го слоя в пределах активной зоны;

полагая $p = \sigma_{zj}^{(H)}$ и $p = \sigma_{zj}^{(6)}$ (где $\sigma^{(H)}$ — давление от веса насыпи; $\sigma^{(6)}$ — бытовое давление от веса вышележащей грунтовой толщи) по уравнению (24.9) или (24.10) в зависимости от обоснованности компрессионных кривых для середины каждой j -й пластины грунта каждого i -го слоя вычисляют значения пористости при бытовом давлении $\epsilon_{ij}^{(6)} = f(\sigma_{zj}^{(6)})$ и значение пористости при полном давлении $\epsilon_{ij}^{(K)} = f(\sigma_{zj}^{(6)} + \sigma_{zj}^{(H)})$;

по уравнению (22.8) определяют полную осадку насыпи для ординаты, расположенной на расстоянии x от оси насыпи;

Т а б л и ц а 22.1. Значения коэффициентов ϵ_0 и B

Грунты	ϵ_0	B
Крупнозернистые и среднезернистые пески и супеси	0,4	До 100
Мелкозернистые пески и супеси	0,4—0,5	25—75
Пылеватые грунты	0,5—0,65	10—25
Суглинистые грунты средней плотности, глинистые грунты	0,65	10—15
Супеси и суглинки с содержанием пыли более 50%; сильно сжимаемые суглинки и глины с прослойками песка	0,7—0,85	5—10
Торфы при разложении, %:		
0,10	3,0—4,0	8,5—10
10—25	2,5—3,0	8—9
25—40	1,5—2,5	6—8
40 и более	0,75—1,5	4—6
Торфяной ил	0,25—1,5	2—4

далее переходят к расчету осадки основания насыпи для следующей вертикали и т.д.

При автоматизированном проектировании исходные данные, вводимые в память компьютера для расчета осадки основания насыпи, разделяют на две группы:

данные, характеризующие очертание поперечного сечения насыпи, свойства слагающих ее грунтов и положение вертикалей, для которых требуется определить значение полной осадки насыпи;

данные, характеризующие положение слоев сжимаемого грунта под основанием насыпи (глубина от дневной поверхности до нижней границы слоя), число пластин грунта, на которое делится каждый геологический слой, и физико-механические свойства грунтов, составляющих каждый слой.

В результате расчета получают очертание поперечного сечения насыпей до и после осадки, а также распечатку полных осадок насыпи на заданных вертикалях.

Изложенный алгоритм легко может быть развит для случая расчета осадки оснований насыпей, расположенных на косогоре с учетом наклонных геологических напластований, а также с учетом бокового расширения сжимаемого грунта.

22.6. Расчет скорости осадки насыпи на слабом основании. Регулирование скорости осадки

При проектировании земляного полотна на слабых основаниях в ряде случаев еще недостаточно знать полную осадку насыпи, но необходимы также сведения и о времени консолидации слабого основания. Действительно, при составлении проекта организации строительства нужно иметь точное представление о том периоде после сооружения земляного полотна, спустя который можно устраивать дорожную одежду, не опасаясь ее просадок и разрушения. Время осадки насыпи в результате сжатия слабого основания во многих случаях оказывается столь значительным, что автомобильная дорога может быть построена в установленные сроки лишь в результате реализации специальных инженерных мероприятий по ускорению осадки слабого основания.

При сжатии водонасыщенных грунтов под действием веса насыпи происходит процесс выжимания практически несжимаемой воды из пор грунта. При этом сжимающим напряжениям противостоят: гидродинамическое сопротивление выжимаемой воды, сопротивление деформаций пленочной влаги, облегающей грунтовые частицы, и сопротивление, обусловленные перемещением самих грунтовых час-

тиц. Эти процессы развиваются весьма медленно, и поэтому темп сжатия водонасыщенного грунта определяется соотношением между скоростью деформации скелета грунта и скоростью выжимания грунтовой воды. В начальный период приложения внешней нагрузки сжимающие напряжения воспринимаются главным образом практически несжимаемой грунтовой водой и процесс деформации слабого основания определяется исключительно скоростью выжимания грунтовой воды. В конечной стадии уплотнения определяющей становится скорость деформации скелета грунта.

Процесс деформации во времени водонасыщенного слабого основания описывается дифференциальным уравнением Терцаги—Герсеванова:

$$\frac{(1+\epsilon_{cp})k_{cp}}{\gamma_b} + \frac{\partial^2 p}{\partial z^2} = a \frac{\partial p}{\partial t}, \quad (22.11)$$

где ϵ_{cp} — средний коэффициент пористости сжимаемого грунта в интервале изменения давления; k_{cp} — средний коэффициент фильтрации; γ_b — объемный вес воды; p — давление от внешней нагрузки, передающееся на скелет грунта в момент времени t ; a — коэффициент уплотнения, 1/МПа; z — ордината.

В результате интегрирования дифференциального уравнения (22.11) можно получить выражение для вычисления дополнительных напряжений от внешней нагрузки в грунтовом скелете через время t после ее приложения:

$$\sigma_{nz} = p_z \left[1 - \frac{4}{\pi} \sin \frac{\pi z}{\Delta h_{ij}} e^{-N} \right], \quad (22.12)$$

где σ_{nz} — дополнительное напряжение в грунтовом скелете на глубине z через время t с момента приложения нагрузки; p_z — давление на глубине z от внешней нагрузки, определяемой по формуле (22.4), полагая $p_z = \sigma_{nz}$, т.е. после полной осадки слабого основания, когда давление от внешней нагрузки полностью воспринимается напряжениями грунтового скелета; Δh_{ij} — толщина j -й пластины i -го геологического слоя при выжимании воды в двух направлениях;

$$N = \frac{\pi^2 k (1 + \epsilon_{ijt}) \sum_{n=1}^N \Delta t_n}{\Delta h_{ij}^2 a_{ijt} \gamma_b}; \quad (22.13)$$

где k — коэффициент фильтрации сжимаемого слоя грунта; ϵ_{ijt} — коэффициент пористости грунта j -й пластины i -го геологического слоя

через время $t = \sum_{n=1}^N \Delta t_n$ с момента приложения нагрузки; a_{ijt} — коэффициент уплотнения.

Значение коэффициента уплотнения a , представляющего собой тангенс угла наклона касательной в соответствующей точке компрессионной кривой, может быть получено путем дифференцирования уравнения компрессионной кривой (22.9) для случая наличия данных испытаний образцов:

$$a = \frac{\partial \epsilon}{\partial p} = \frac{(\epsilon_2 - \epsilon_0)(\epsilon_1 - \epsilon_0)(p_1 - p_2)}{p_1 p_2 (\epsilon_1 - \epsilon_2) \left[\frac{(\epsilon_2 - \epsilon_0)(p_1 - p_2)}{p_1 p_2 (\epsilon_1 - \epsilon_2)} p - \frac{p}{p_1} + 1 \right]^2} \quad (22.14)$$

и уравнения (22.10) для случая отсутствия данных испытаний образцов:

$$a = \frac{\partial \epsilon}{\partial p} = -\frac{1}{Bp}. \quad (22.15)$$

Учитывая, что величины ϵ_{ijt} и a_{ijt} , входящие в выражение (22.13), зависят от напряжения σ_z , значение последнего находится методом последовательных приближений.

Осадка насыпи спустя время $t = \sum_{n=1}^N \Delta t_n$ после приложения нагрузки:

$$S_t = \sum_{i=1}^k S_i = \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^l \frac{a_{ijt} \sigma_z}{1 + \epsilon_{ijt}} \Delta h_{ij}.$$

Полная осадка после прекращения процесса выжимания воды из пор грунта:

$$S_\infty = \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^l \frac{a_{ij} \sigma_z}{1 + \epsilon_{ij}} \Delta h_{ij}, \quad (22.16)$$

где $\sigma_z = p_z$ — напряжение, определяемое по формуле (22.4).

Учитывая, что процесс консолидации слабого основания носит во времени асимптотический характер, осадка S_∞ теоретически будет достигнута через время $t = \infty$. Очевидно, что для практических расчетов следует ограничиваться меньшим значением осадки, при которой деформации уже не будут опасны для данного типа дорожной одежды:

$$S_t = \delta S_{\infty} \quad (22.17)$$

При этом считают, что усовершенствованные покрытия можно устраивать при $\delta = 0,9$, а покрытия переходного и низшего типов при $\delta = 0,75$.

Последовательность детального расчета времени осадки слабого основания сводится к следующему:

используя уравнение (22.4), определяют сжимающие напряжения от веса насыпи $\sigma_{нз}$ на рассчитываемой вертикали для каждой середины каждой j -й пластины грунта каждого i -го геологического слоя;

вычисляют напряжения от собственного веса грунтового основания $\sigma_{бз}$ по формуле (22.5) с учетом сил взвешивания;

по формуле (22.16) определяют полную осадку после прекращения выжимания воды из пор грунта и затем в зависимости от типа покрытия устанавливают расчетную осадку по формуле (22.17);

полагают $\sum_{n=1}^N \Delta t_n = \Delta t$ (где Δt — шаг интегрирования, принимаемый обычно равным 1 мес);

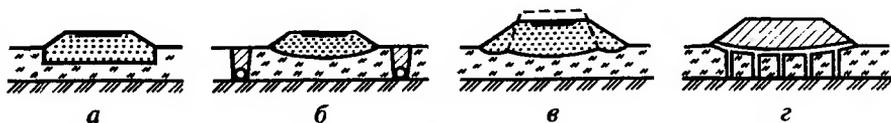
полагая в первом приближении значение p_{ij} средним между $\sigma_{нз}$ и $(\sigma_{нз} + \sigma_{бз})$ по формулам (22.9) и (22.13) или (22.14), вычисляют значения ϵ_{ijt} и a_{ijt} ;

далее по формулам (22.13) и (22.12) вычисляют значения дополнительных напряжений в грунтовом скелете σ_{zt} и при $p_{ij} = \sigma_{zt} + \sigma_{бз}$ вновь вычисляют значения ϵ_{ijt} , a_{ijt} и σ_{zt} и т.д., пока в результате последовательных напряжений не будет окончательно установлено значение σ_{zt} для каждой j -й пластины, каждого i -го геологического слоя на момент времени $\sum_{n=1}^N \Delta t_n = \Delta t$;

по известному σ_{zt} определяют значение полной осадки S_t на момент времени $\sum_{n=1}^N \Delta t_n = \Delta t$ по формуле (22.16);

если $S_t < \delta S_{\infty}$, то задаются значением $\sum_{n=1}^N \Delta t_n = 2\Delta t$, и вновь выполняют все расчеты до тех пор, пока не получат $S_t \geq \delta S_{\infty}$. Вычисленное значение для этого момента $t = \sum_{n=1}^N \Delta t_n$ и является расчетным временем консолидации слабого основания.

Изложенный детальный расчет осадки насыпи, позволяющий определять время консолидации слабого основания на любой вертика-



Р и с. 22.12. Способы ускорения осадки насыпей на слабых основаниях:

а — частичное удаление слабого грунта; *б* — устройство продольных дрена; *в* — отсыпка более высокой насыпи; *г* — устройство вертикальных песчаных свай-дрен

ли насыпи как при однородном, так и слоистом слабом основании, весьма многоделен и может быть реализован лишь с использованием компьютерной техники при автоматизированном проектировании. При этом обеспечивается большая надежность инженерных прогнозов по сравнению с упрощенными расчетами по традиционной технологии.

В тех случаях, когда в результате расчета время осадки насыпи оказывается недопустимо большим и строительство автомобильной дороги в установленные сроки становится невозможным, предусматривают инженерные мероприятия по ускорению осадки насыпи одним из следующих приемов (рис. 22.12):

частичным удалением грунта слабого основания (т.е. уменьшением толщины сжимаемого слоя);

осушением водонасыщенного грунта устройством продольных дрена;

применением способа «перегрузки» путем отсыпки более высокой, чем требуется по проекту, но узкой насыпи;

устройством вертикальных песчаных дрена в виде буровых скважин, засыпанных крупнозернистым песком (песчаных свай-дрен).

Оценка времени консолидации слабого основания при различных толщинах сжимаемого грунта может быть выполнена с использованием изложенного выше детального расчета.

Осушение слабого водонасыщенного основания путем устройства продольных дренажей является весьма эффективным (хотя и дорогостоящим) средством ускорения осадки насыпи. Осушенное грунтовое основание дает осадку под весом насыпи настолько быстро, что обычно расчетная проверка времени консолидации слабого основания не требуется.

Эффективность применения способа «перегрузки» также может быть оценена с использованием изложенного выше детального расчета. При этом, как показывают экспериментальные расчеты, перегрузка всего на 10% сокращает время консолидации в 1,3 раза, а перегрузка на 25% — в 2 раза и т.д.

Одним из наиболее эффективных инженерных приемов ускорения осадки слабого основания является получивший широкое распространение способ устройства вертикальных песчаных свай-дрен, располагаемых через 1,5—3 м в шахматном порядке по квадратной сетке. Как показывает опыт, применение вертикальных песчаных дрен ускоряет осадку в 20—30 раз, что достигается за счет сокращения пути фильтрации выжимаемой воды.

В насыпях на торфяном основании применение вертикальных песчаных свай-дрен приводит к сильному уменьшению времени консолидации не только в результате сокращения пути фильтрации, но и благодаря существенно большему (в 25—30 раз) значению коэффициента фильтрации в горизонтальном направлении по сравнению с вертикальным. Для илистых грунтов коэффициенты фильтрации в горизонтальном и вертикальном направлениях обычно принимают одинаковыми.

Оценку ускорения осадки насыпи при различных вариантах устройства вертикальных песчаных свай-дрен можно выполнить на основе решения осесимметричной задачи теории консолидации.

22.7. Расчет общей устойчивости откосов земляного полотна

Потеря общей устойчивости откосов насыпей и выемок является одним из наиболее распространенных видов деформаций земляного полотна автомобильных дорог. В связи с этим проверка общей устойчивости откосов земляного полотна на различных участках дорог — обычная задача для инженера-дорожника, а выполняемые при этом геотехнические расчеты — обязательная часть обоснования практически любого проекта дороги.

При расчете общей устойчивости откосов исходят из следующих возможных схем обрушения:

если грунт земляного полотна однороден или отдельные его слои мало отличаются по прочностным показателям, смещение оползающего массива происходит по образующейся в грунте криволинейной поверхности скольжения;

если грунт земляного полотна имеет неоднородные напластования, резко различающиеся по прочностным показателям, смещение грунтового массива может происходить по фиксированной поверхности между слоями.



Р и с. 22.13. Положение опасных кривых скольжения:

a — при устойчивых грунтах основания; *б* — при слабых грунтах основания; $L_{сж}$ — расчетная длина скольжения

Рассмотрим наиболее общий и часто встречающийся случай обрушения откосов по криволинейным поверхностям скольжения. Как показывают наблюдения, откосы насыпей обрушиваются по поверхностям скольжения, близким по форме к кругло-цилиндрическим (рис. 22.13).

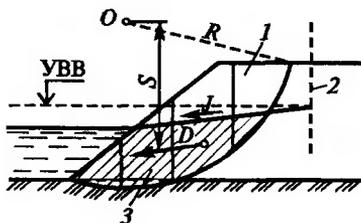
Обрушению откосов всегда предшествует появление вертикальной трещины обрушения (трещины Терцаги). В зависимости от свойств грунтового основания насыпи возможны два вида обрушения:

при достаточно устойчивых грунтах основания поверхность обрушения обычно проходит через подошву откоса насыпи (см. рис. 22.13, *a*);

в случае слабого грунтового основания поверхность обрушения может заходить в пределы слабого слоя и распространяться за пределы подошвы откоса насыпи (см. рис. 23.13, *б*).

Общая устойчивость откоса насыпи оказывается обеспеченной лишь в том случае, если сумма всех сил, сдвигающих массив обрушения (или их моментов относительно оси вращения), оказывается меньше суммы сил (или их моментов), его удерживающих, т.е. при расчетном коэффициенте устойчивости $K_p \geq 1$. Однако, учитывая некоторую погрешность методов расчета, погрешность исходных данных, неучет некоторых фактических условий работы (например, динамического воздействия подвижного состава) и т.д., с инженерной точки зрения, общая устойчивость откоса насыпи считается обеспеченной, если расчетный коэффициент устойчивости оказывается равным нормативному, определяемому по формуле (22.1), или больше его:

$$K_p = \frac{\sum_{i=1}^n P_{yni}}{\sum_{i=1}^n P_{сли}} = \frac{\sum_{i=1}^n M_{yni}}{\sum_{i=1}^n M_{сли}} \geq K_n.$$



Р и с. 22.14. Схема к расчету устойчивости откосов при наличии сил гидродинамического давления:

1 — сухой грунт; 2 — ось насыпи;
3 — водонасыщенный грунт

Для сухих насыпей появление сдвигающих сил обусловлено собственным весом обрушающегося массива и временной нагрузкой от подвижного состава. Для периодически подтопляемых насыпей (например, на подходах к мостам) возникает дополнительное гидродинамическое давление в результате давления и трения о поверхность грунтовых частиц воды, просачивающейся из водонасыщенной насыпи после падения уровней высоких вод на спаде паводка (рис. 22.14).

Физическая природа сил, удерживающих массив обрушения, заключается в наличии сил внутреннего трения грунта $P \operatorname{tg} \varphi$ и сцепления c . В общем случае земляное полотно может быть представлено многослойной системой, характеризующейся наличием нескольких геологических слоев с различными физико-механическими свойствами (объемным весом, силами внутреннего трения и сцепления). Для водонасыщенной насыпи один и тот же грунт будет обладать различными физико-механическими показателями выше и ниже кривой депрессии. Так, для грунта ниже уровня грунтовых вод объемный вес определяют с учетом сил взвешивания, а сцепление принимают меньшим, чем для грунта сухой части насыпи.

Задача оценки общей устойчивости откосов земляного полотна сводится к отысканию центра критической кривой скольжения, характеризующейся наименьшим коэффициентом устойчивости. Ни один из известных методов расчета общей устойчивости откосов не дает сразу точного положения центра наиболее опасной кривой скольжения, который может быть найден лишь методом последовательных приближений. При автоматизированном проектировании вопрос многодельности таких расчетов снимается.

В практике проектирования автомобильных дорог наибольшее распространение получил метод оценки общей устойчивости откосов шведского ученого Феллениуса — метод круглоцилиндрических поверхностей скольжения (КЦПС). Следует отметить, что метод КЦПС наиболее просто поддается компьютерной формализации.

По Феллениусу, центры наиболее опасных кривых скольжения располагаются в районе прямой, проходящей через точки *A* и *B*, получаемых построением согласно рис. 22.15, табл. 22.2.

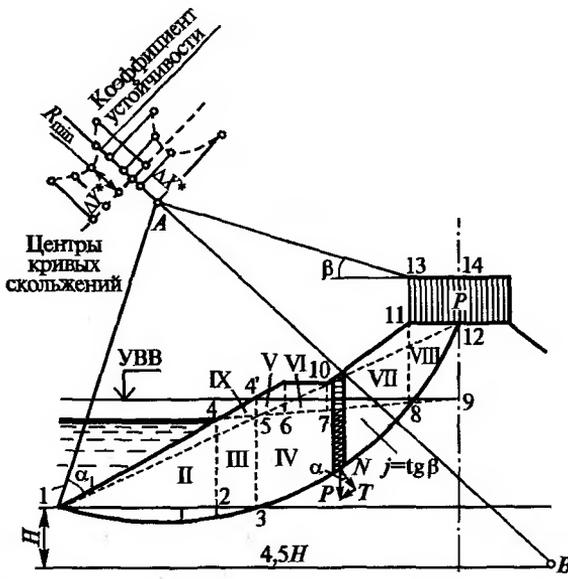


Рис. 22.15. Определение положения центра кривой скольжения, обладающей наименьшим коэффициентом устойчивости

Таблица 22.2. Координаты прямой Феллениуса

Коэффициент заложения откоса	Угол наклона откоса	Углы, град	
		α	β
1 : 0,58	60°	29	40
1 : 1	45°	28	37
1 : 1,5	33°40'	26	35
1 : 2	26°34'	25	35
1 : 3	18°26'	25	35
1 : 4	14°03'	25	36
1 : 5	11°19'	25	37

Глубину вертикальной трещины обрушения (см. рис. 22.13) определяют по формуле Терцаги:

$$z = \frac{2c \times \operatorname{tg} \left(45^\circ + \frac{\varphi}{2} \right)}{\gamma}, \quad (22.18)$$

где c — расчетное сцепление грунта; φ — угол внутреннего трения; γ — объемный вес грунта.

В первом приближении положение центра критической кривой скольжения принимают на пересечении прямой Феллениуса с вертикалью, проходящей через подошву откоса. Оползающий массив разбивают на вертикальные отсеки. При автоматизированных расчетах обычно достаточно 10—20 отсеков шириной Δx_i (см. рис. 22.15). По горизонтали проверяемый массив делят на несколько слоев в соответствии с положением границ раздела геологических напластований. Для подтопленных насыпей обязательно выделяют сухую и водонасыщенную части насыпи. При этом отметку уровня грунтовых вод по оси насыпи принимают равной расчетному уровню высокой воды (УВВ), а угол наклона кривой депрессии в соответствии с табл. 22.3.

Таблица 22.3. Гидравлические градиенты и углы депрессии

Наименование грунта	Гидравлический градиент j	Угол депрессии α
Крупнообломочные грунты	0,003—0,006	0,0015—0,003
Песчаные грунты	0,006—0,020	0,003—0,010
Супесчаные грунты	0,020—0,050	0,010—0,026
Суглинки	0,050—0,100	0,026—0,053
Глинистые грунты	0,100—0,150	0,053—0,081
Тяжелые глины	0,150—0,200	0,081—0,111
Торфянистые грунты (в зависимости от вида торфа и степени его разложения)	0,020—0,120	0,010—0,064

Следует иметь в виду, что пойменную насыпь, сложенную из практически водонепроницаемых грунтов, рассчитывают как обычную сухую насыпь. С другой стороны, насыпи, возведенные из грунтов с высоким коэффициентом фильтрации (среднезернистые и крупнозернистые пески, гравелистые грунты и т.д.), рассчитывают также без учета сил гидродинамического давления, поскольку уровень грунтовых вод вследствие хорошей фильтрации успеваеет следовать понижающемуся уровню высокой воды в реке. Однако расчеты общей устойчивости откосов в этом случае выполняют с учетом сил взвешивания для подтопленной части грунтового массива.

На каждый i -й выделенный отсек действует:
удерживающая сила

$$P_{уд} = \left(\sum_{j=1}^n G_{ij} \right) \cos \alpha_i \operatorname{tg} \varphi + c l_i;$$

сдвигающая сила

$$P_{кли} = \left(\sum_{j=1}^m G_{ij} \right) \sin \alpha_i,$$

где G_{ij} — вес j -й призмы грунта в пределах i -го отсека с учетом временной нагрузки, заменяемой эквивалентным слоем грунта; α_i — угол наклона поверхности скольжения в пределах i -го отсека; φ — угол внутреннего трения грунта на поверхности скольжения; c — сцепление грунта на поверхности скольжения; l_i — длина дуги скольжения в пределах i -го отсека.

Если рассчитывать насыпь единичной длины, то вес каждой j -й призмы i -го отсека можно вычислить:

для сухой части насыпи

$$G_{ij} = \Omega_{ij} \gamma_j;$$

для водонасыщенной части насыпи

$$G_{ij} = \Omega_{ij} (\gamma_j - 1) \frac{100 - n_j}{100},$$

где Ω_{ij} — площадь j -й призмы i -го отсека; γ_j — объемный вес грунта j -го геологического слоя; n_j — пористость грунта j -го геологического слоя.

Гидродинамическое давление для подтопляемой части насыпей:

$$D = \Omega_b \gamma_b J,$$

где Ω_b — площадь массива обрушения ниже уровня грунтовых вод; $\gamma_b = 1$ — объемный вес воды; J — гидравлический градиент, принимаемый равным тангенсу хорды, стягивающей кривую депрессии, и принимаемый по табл. 22.3.

Таким образом, в общем случае коэффициент общей устойчивости откосов земляного полотна будет определяться:

$$K_p = \frac{\sum_{i=1}^n \left[\left(\sum_{j=1}^m G_{ij} \right) \cos \alpha_i \operatorname{tg} \varphi + c l_i \right]}{D + \sum_{i=1}^n \left[\left(\sum_{j=1}^m G_{ij} \right) \sin \alpha_i \right]} \geq K_n. \quad (22.19)$$

Последовательность расчета общей устойчивости откосов земляного полотна следующая (степень детализации расчетов принимают разной при автоматизированном и традиционном проектировании):

согласно рис. 22.15 и табл. 22.2, определяют положение прямой Феллениуса, вблизи которой расположены центры наиболее опасных кривых скольжения;

по формуле (22.18) определяют глубину проникновения вертикальной трещины (см. рис. 22.13);

исследуемый массив земляного полотна делят на n вертикальных отсеков шириной Δx_i каждый (обычно $n = 10—20$) и на m слоев в соответствии с положением границ раздела геологических напластований и кривой депрессии (в случае подтопленной насыпи) (см. рис. 22.15);

задаются в первом приближении положением центра кривой скольжения на пересечении ординаты, восстановленной из подошвы откоса насыпи с прямой Феллениуса. Радиус кривой скольжения определяется значением ординаты полученного центра;

по формуле (22.19) находят значение коэффициента общей устойчивости K_p ;

с шагом Δx^* меняют положение центра кривой скольжения влево по прямой Феллениуса и при новом положении центра по формуле (22.19) вновь вычисляют новое значение коэффициента общей устойчивости откоса K'_p ;

если $K'_p < K_p$, то с шагом Δx^* ищут на прямой Феллениуса положение центра кривой скольжения с минимальным значением коэффициента общей устойчивости откоса;

если $K'_p > K_p$, то меняют положение центра кривой скольжения с шагом Δx^* вправо до тех пор, пока не будет установлено положение центра с минимальным значением коэффициента общей устойчивости откоса (см. рис. 22.15);

далее вновь меняют положение центра кривой скольжения, но уже по нормали к прямой Феллениуса в найденной ранее точке влево с шагом Δy^* и по формуле (22.19) вычисляют значение коэффициента общей устойчивости K''_p ;

если $K''_p < K'_p$, то с шагом Δy^* влево ищут положение центра кривой с минимальным значением K_p . Если же $K''_p > K'_p$, то с шагом Δy^* ищут положение наиболее опасного центра вправо от прямой Феллениуса;

найденное таким образом минимальное значение коэффициента устойчивости K_p является расчетным для данной конструкции земляного полотна. Его сравнивают с нормативным значением K_n , и если оказывается, что $K_p \geq K_n$, то общая устойчивость откоса земляного полотна обеспечена. Если $K_p < K_n$, то необходимо изменить конструкцию земляного полотна с целью повышений общей устойчивости откоса (уположить откос, предусмотреть устройство берм и т.д.) и вновь

изложенным выше способом выполнить проверку общей устойчивости откоса насыпи новой конструкции.

Аналогичным образом может быть выполнена и проверка общей устойчивости откосов насыпей и в случае слабого основания, когда поверхность скольжения может заходить в пределы слабого слоя основания и распространяться за пределы подошвы откоса насыпи (см. рис. 22.13, б).

Откосы дорожных насыпей (особенно водонасыщенных) могут быть подвержены не только потере общей их устойчивости, но и потере местной устойчивости при различных вибрационных воздействиях (от движущихся транспортных средств, при волнобое и т.д.). Вопросы потери местной устойчивости откосов подтопляемых пойменных насыпей при волновых воздействиях и способы их защиты рассмотрены в гл. 31.

22.8. Расчет хода глубины промерзания и оттаивания грунта

При проектировании земляного полотна автомобильных дорог нередко приходится устанавливать глубину промерзания и оттаивания в зависимости от факторов, влияющих на скорость теплоотдачи в грунтах. Особенно часто теплотехнические расчеты приходится выполнять при проектировании автомобильных дорог в районах распространения многолетнемерзлых (ММГ) и вечномерзлых (ВМГ) грунтов.

В РФ наибольшее распространение получил метод теплотехнических расчетов земляного полотна проф. В.С. Лукьянова. В основу метода положен следующий комплекс допущений:

- температура наружного воздуха постоянна;
- грунт на всю рассматриваемую глубину однороден;
- температура грунта от поверхности до талого слоя меняется по линейному закону;
- теплоизоляционные слои при расчетах глубины промерзания или оттаивания заменяют эквивалентным слоем грунта;
- приток тепла из глубинных слоев постоянен во времени.

Поскольку в реальных условиях ход температуры воздуха переменен во времени, то очевидно, что погрешность расчета, связанная с использованием метода В.С. Лукьянова, будет тем большей, чем больше расчетный отрезок времени, к которому этот метод применяют.

При детальных автоматизированных расчетах целесообразно пользоваться решением проф. Г.М. Шахунянца, исключающим основные допущения, принятые при выводе уравнения В.С. Лукьянова: ход температур воздуха в общем случае переменен во времени;

личество тепла, выделяемое за счет понижения температурной кривой из положения BD в EG (см. рис. 22.16).

Многослойный грунтовый массив приводят к воображаемому однородному грунту, эквивалентному по теплотехническим свойствам исходному:

$$S_0 = \lambda_0 \left[\frac{1}{a} + \sum_{i=1}^n \frac{S_i}{\lambda_i} \right], \quad (22.21)$$

где λ_0 — коэффициент теплопроводности нижнего изучаемого слоя грунта.

Уравнение (22.20) не интегрируется в общем виде, но может быть решено в конечных разностях. При этом для случая предположения о линейном распространении температур по глубине приведенного однородного массива его можно представить:

$$\left[\frac{\lambda_0 T_0}{z} - q_0 \right] \Delta t = \rho \omega_0 \delta_0 \Delta z + \frac{1}{\lambda_0} \sum_{i=1}^n C_i \gamma_i \lambda_i \omega_i + C_0 \gamma_0 \omega_0, \quad (22.22)$$

$$\text{где } \omega_i = \frac{T_0 (y_i^2 - y_{i-1}^2)}{2} \left(\frac{1}{z} - \frac{1}{z + \Delta z} \right) + \Delta T_0 (y_i - y_{i-1}) \left[1 - \frac{y_i + y_{i-1}}{2(z + \Delta z)} \right]; \quad (22.23)$$

$$\begin{aligned} \omega_0 = T_0 \Delta z + \frac{T_0}{2} \left[\frac{z^2 - S^2}{z} - \frac{(z + \Delta z)^2 - S_0^2}{z + \Delta z} \right] + \\ + \Delta T_0 (z + \Delta z - S_0) \left[1 - \frac{z + \Delta z - S_0}{2(z + \Delta z)} \right], \end{aligned} \quad (22.24)$$

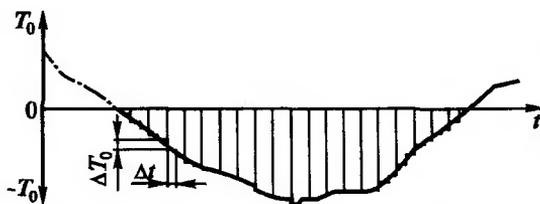
где $T_0 = T_0 + \sum_{j=1}^k \Delta T_{0j}$ — переменная во времени температура воздуха;

ΔT_{0j} — приращение температуры воздуха за время Δt .

В уравнениях (22.22)—(22.24) при отрицательных температурах величины T_0 и ΔT_0 вводят в расчет со знаком «+», а при положительных температурах — со знаком «-».

Последовательность детального расчета хода промерзания (оттаивания), исключающего основные допущения традиционного упрощенного расчета, сводится к следующему:

ход температур воздуха, представляемый обычно среднедекадными значениями температуры, заменяют ступенчатым очертанием с шагом Δt (рис. 22.17). При этом между средними значениями температуры по декадам осуществляют линейную интерполяцию с шагом $\Delta t = 1-2$ сут;



Р и с. 22.17. Замена фактической кривой хода температуры ступенчатым очертанием с шагом Δt

многослойный грунтовый массив (включая слои теплоизоляции, если таковые имеются) заменяют с использованием формулы (22.21) эквивалентным по теплотехническим свойствам массивом однородного грунта;

расчет начинают с температуры $T_0 = 0$ °С, полагая глубину промерзания равной нулю ($z = 0$ м). При этом для первого интервала времени Δt по кривой хода температур вычисляют T_0^I и ΔT_0^I и, применяя уравнения (22.22)—(22.24), сверху вниз последовательно для каждого геологического (и теплоизоляционного) слоя грунтового массива вычисляют глубину промерзания z за первый интервал времени Δt . Уравнения (22.22)—(22.24) записаны в неявном виде относительно Δz , поэтому их решают подбором, задаваясь различными значениями Δz , пока не будет достигнуто равенство левой и правой частей уравнения (22.22);

с шагом Δt на второй ступеньке хода температур вычисляют значения ΔT_0^{II} и $T_0^{II} = T_0 + \Delta T_0^{II}$ и, принимая глубину промерзания в конце первого интервала времени, равной $z^I = z + \Delta z^I$, определяют, решая подбором уравнения (22.22)—(22.24), приращение глубины промерзания Δz^{II} и т.д.

Детальный расчет хода глубины промерзания (оттаивания) позволяет существенно повысить надежность теплотехнических прогнозов. В связи с многodelьностью изложенного расчета последний может быть реализован лишь с использованием современной компьютерной техники.

22.9. Метод конечных элементов (МКЭ) при проектировании земляного полотна

Развитие в последние десятилетия численных методов прогноза, развивающихся во времени и пространстве тех или иных природных процессов и явлений, дало возможность по-новому решать перечис-

ленные выше инженерные геотехнические задачи, исключая большинство допущений, свойственным традиционным упрощенным методом, с соответствующим повышением надежности инженерных прогнозов. В проектировании земляного полотна дорог широкое применение стали находить математические модели, построенные на базе использования современного, универсального математического аппарата методов конечных элементов (МКЭ) в двумерном пространстве и конечных объемов (МКО) — в трехмерном, позволивших не только резко повысить надежность геотехнических прогнозов, но и существенно расширить круг решаемых инженерных задач, реализация которых до недавнего времени была просто невозможна при использовании традиционных расчетных методов и схем.

Инженеров-проектировщиков привлекает универсальность метода, хорошо обоснованный математический аппарат, позволяющий решать как линейные, так и нелинейные сложные задачи механики сплошных сред и ориентированный на численную реализацию с применением компьютерной техники.

В дорожно-мостовом проектировании метод МКЭ позволяет на качественно новом уровне решать следующие задачи:

- геотехнические и теплотехнические расчеты;
- расчеты плитных конструкций, в том числе нежестких и жестких дорожных одежд и оснований;
- расчеты различных мостовых конструкций;
- сооружений тоннельного типа и т.д.

При проектировании земляного полотна стало возможным моделировать и решать с высокой степенью детализации следующие задачи:

- прогноз водно-теплового режима земляного полотна;
- моделирование напряженно-деформированного состояния земляного полотна дорог и грунтовых оснований;
- расчеты устойчивости земляного полотна дорог и его элементов для различных условий их работы;
- изучение протекающих во времени внутренних процессов и закономерностей изменения структуры и формы земляного полотна дорог и т.д.

Одна из геотехнических задач определения напряженно-деформируемого состояния системы «насыпь—основание» была решена проф. В.И. Заворицким.

При изучении напряженно-деформированного состояния грунтовых массивов последние делятся на конечные элементы треугольной или прямоугольной формы. Упругие и геометрические характеристики массива определяют жесткость совокупности элементов.

Связи между отдельными элементами обуславливаются только в узловых точках, определенными соотношениями между силами, приложенными в узловых точках, и перемещениями, которые возникают вследствие действия этих сил.

Применение принципа действительной работы к каждому деформируемому элементу дает для всего грунтового массива $2m$ уравнение равновесия:

$$\{F\} = [K]\{u\},$$

где $\{F\}$ — матрица-столбец узловых сил; $[K]$ — обобщенная матрица жесткости; $\{u\}$ — матрица-столбец узловых перемещений; m — количество узловых точек.

Для двухмерной (плоской) задачи поле перемещений описывают в виде:

$$u = \sum_i u_i f_i(x, z); \quad v = \sum_i v_i \varphi_i(x, z).$$

Функции f_i и φ_i выбирают таким образом, чтобы соблюдалось условие неразрывности деформаций, т.е.

$$\begin{aligned} u^* &= u + \frac{\partial u}{\partial x} dx + \frac{\partial u}{\partial z} dz, \\ v^* &= v + \frac{\partial v}{\partial x} dx + \frac{\partial v}{\partial z} dz, \end{aligned} \tag{22.25}$$

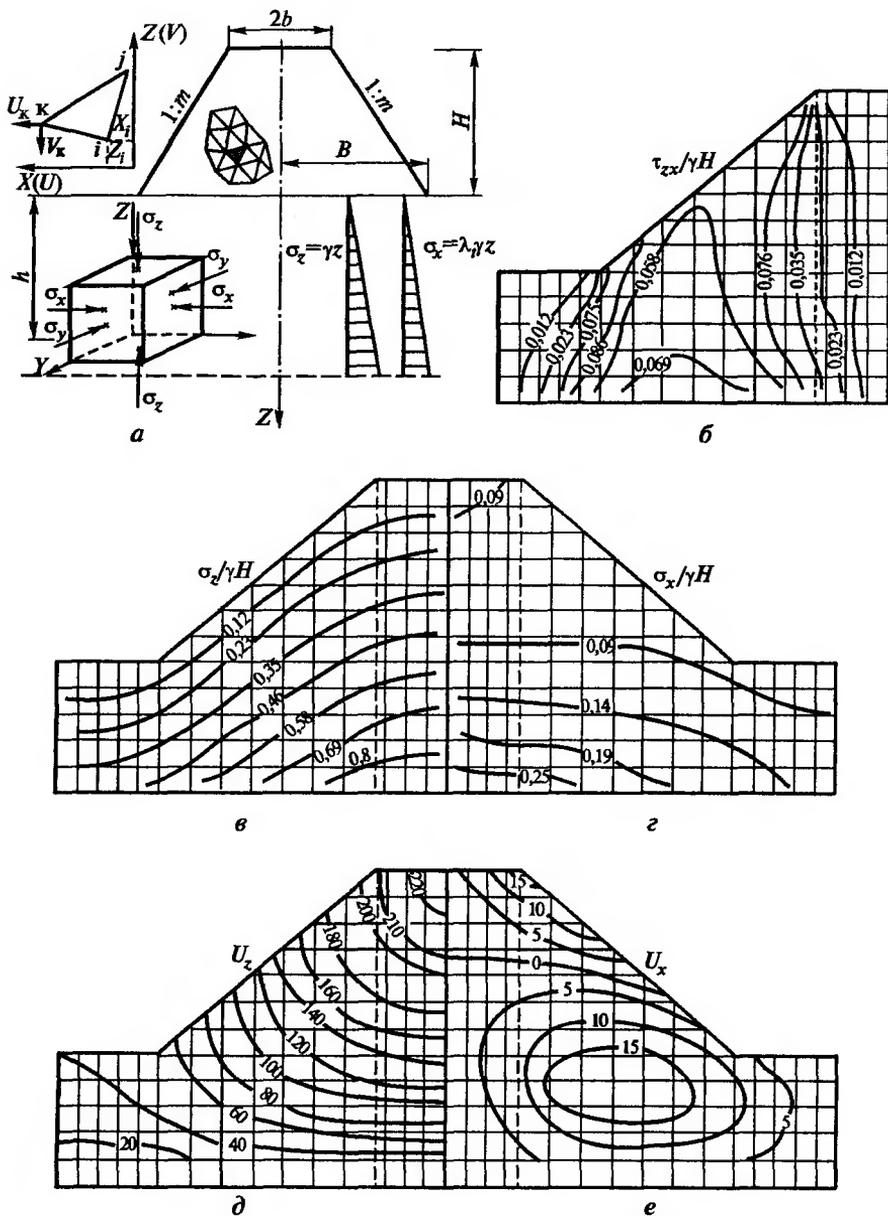
где u, v — перемещения произвольной точки с координатами x, z (рис. 22.18, а); u^*, v^* — перемещения соседней точки с координатами $x + \Delta x, z + \Delta z$.

Условие (22.25) будет выполненным, если компоненты перемещений u и v отдельных точек являются линейными функциями координат:

$$\begin{cases} u = \alpha_1 + \alpha_2 x + \alpha_3 z, \\ v = \alpha_4 + \alpha_5 x + \alpha_6 z. \end{cases} \tag{22.26}$$

Постоянство вида функций (22.26) в пределах всей совокупности конечных элементов обеспечивает неразрывность поля перемещений.

Разбивку моделируемой системы на конечные элементы осуществляют сеткой регулярной структуры, что позволяет в конечном итоге использовать простые аналитические зависимости и минимизировать объем исходной информации.



Р и с. 22.18. Результаты расчета системы «насыпь—основание»:
 расчетная схема (а); поле напряжений (б, в, з); поле перемещений (д, е); $E_1/E_2 = 1$; $m = 1:1,5$; $\mu = 0,3$

Фрагмент реализации разработанной модели напряженно-деформированного состояния системы «насыпь—основание» представлен на рис. 22.18. Исходная информация включает данные о геометрических параметрах системы и характеристиках грунтов, слагающих насыпь и грунтовое основание. В результате расчета получают поле вертикальных перемещений u_z (рис. 22.18, *д*), горизонтальных перемещений u_x (рис. 22.18, *е*) узлов и поле касательных τ_{zx} (рис. 22.18, *б*) и нормальных напряжений σ_z и σ_x (рис. 22.18, *в*, *з*).

Глава 23

КОНСТРУИРОВАНИЕ ДОРОЖНЫХ ОДЕЖД

23.1. Общие сведения о дорожных одеждах

Дорожная одежда — это укрепление проезжей части, устраиваемое на земляном полотне из одного или нескольких конструктивных слоев разной прочности и предназначенное для обеспечения ровной и прочной поверхности качения автомобилей.

Дорожные одежды, обязательные и важнейшие конструкции автомобильных дорог, являются одним из наиболее дорогих и ответственных их элементов, во многом определяющих их стоимость и транспортно-эксплуатационные качества.

Конструкцию дорожных одежд назначают в зависимости от категории дороги, интенсивности и состава движения, наличия тех или иных местных дорожно-строительных материалов, а также в зависимости от грунтовых, гидрогеологических и климатических условий.

Конструкция дорожной одежды должна отвечать следующим обязательным и во многом противоречивым требованиям:

прочности в целом и прочности покрытия даже в самые неблагоприятные по степени увлажнения земляного полотна периоды года;

ровности, обеспечивающей безопасное и комфортабельное движение автомобилей с расчетными скоростями;

шероховатости, обеспечивающей эффективное торможение автомобилей в случае экстренной необходимости, а также безопасное движение (без заносов) с расчетными скоростями даже по закруглениям в плане минимальных радиусов;

беспыльности. Дорожные одежды, не отвечающие этому требованию, ухудшают видимость, создают дискомфорт при эксплуатации автомобильных дорог и т.д.;

надежности. Дорожные одежды должны выполнять свои функции в течение длительного расчетного отрезка времени, т.е. в течение нормативного срока до очередного капитального ремонта;

экономичности. Поскольку дорожные одежды — это чрезвычайно дорогие элементы автомобильных дорог, то поиск наиболее экономичных конструкций является исключительно важным этапом проектирования автомобильных дорог, в сильной степени определяющим строительную стоимость и экономическую эффективность инвестиций в дорожное строительство.

Учитывая, что дорожные одежды определяют наиболее существенную часть строительной стоимости автомобильных дорог (в среднем до 40%, а в отдельных случаях до 70%), проектирование дорожных одежд с использованием современного математического аппарата оптимизации является одной из актуальных проблем дорожного строительства.

При традиционной технологии проектирование дорожной одежды сводится к выбору варианта конструкции, характеризуемого наименьшей (из рассмотренных вариантов) строительной стоимостью или наименьшими приведенными затратами.

Количество вариантов конструкции назначают исходя из наличия местных дорожно-строительных материалов, фондируемых материалов, технологических схем строительства и т.д. Следует особо отметить, что при традиционном проектировании сравнивают между собой неоптимальные по строительной стоимости и приведенным затратам варианты конструкции, что во многих случаях приводит к серьезным экономическим потерям.

При современной технологии проектирования автомобильных дорог дорожные одежды проектируют с соблюдением следующих принципов:

привязки вариантов конструкции к источникам снабжения строительства дешевыми местными дорожно-строительными материалами. С целью максимального снижения капиталоемкости дорожных одежд использование дешевых местных дорожно-строительных материалов является неременным условием их конструирования;

многовариантности. Принцип многовариантности предусматривает использование в конструкции различных местных дорожно-строительных и фондируемых материалов, различных технологических схем строительства в зависимости от ожидаемых условий эксплуатации, возможностей подрядных строительных организаций и т.д.;

оптимизации. Использование математических методов оптимизации вариантов конструкций стало возможным лишь при использовании в проектировании современной компьютерной техники.

Использование математических методов оптимизации при проектировании дорожных одежд возможно на трех уровнях.

На *первом уровне* применяют алгоритмы и программы, оптимизирующие конкретную заданную конструкцию дорожной одежды по строительной стоимости. При этом собственно оптимизационному расчету предшествует разработка традиционными методами транспортной схемы строительства с выделением на проектируемой дороге характерных участков в зависимости от грунтовых, гидрогеологических условий, а также в зависимости от зон использования источников снабжения строительства местными дорожно-строительными материалами и с учетом транспортных расходов на перевозку материалов, т.е. когда стоимость единицы толщины каждого i -го конструктивного слоя заранее определена. Оптимизационные программы на первом уровне позволяют, как правило, в пакетном режиме их обработки находить оптимальные по строительной стоимости соотношения толщин принятых конструктивных слоев для каждого конкретного варианта конструкции дорожной одежды.

На *втором уровне* автоматизированно решают конструкцию дорожной одежды в пространстве одновременно с разработкой оптимальной транспортной схемы строительства и способа производства работ. Дорожная конструкция оптимизируется по длине трассы автомобильной дороги с учетом протяженности насыпей и выемок, почвенно-грунтовых, гидрогеологических условий, местоположения источников получения местных дорожно-строительных материалов, размещения производственных баз, станций доставки фондируемых и привозных материалов и т.д. На этом уровне уже удается реализовать системный подход к процессу проектирования.

И наконец, на *третьем уровне* решают более широкий круг задач создания единой системы проектирования, строительства и эксплуатации дорожных одежд, с оптимизацией ресурсов, выделяемых на строительство и эксплуатацию дорог в пределах данного региона. Такой путь уже реализован в ряде развитых стран, например в Канаде, Нидерландах и т.д.

Реализация третьего уровня оптимального решения дорожных одежд приносит наибольший экономический эффект и не только в области строительства и эксплуатации автомобильных дорог, но и во многих других сферах народно-хозяйственной деятельности.

23.2. Конструктивные слои дорожных одежд и их назначение

Напряжения, возникающие в дорожной одежде от колес проезжающих автомобилей, затухают с глубиной (рис. 23.1), что позволяет проектировать ее как многослойную конструкцию, состоящую из конструктивных слоев различного назначения, прочность которых обычно убывает с глубиной сообразно уменьшающимся напряжениям от подвижного состава. В общем случае дорожные одежды различных конструкций состоят из следующих основных конструктивных слоев (рис. 23.2):

- покрытия;
- основания (основного несущего слоя);
- дополнительного слоя основания (дренирующего, морозозащитного, противозаиляющего);
- грунтового основания земляного полотна.

Покрытие состоит из одного или нескольких относительно тонких слоев из очень прочных и дорогих материалов, хорошо сопротивляющихся истирающим, ударным, вертикальным и сдвигающим нагрузкам от колес автомобилей, а также воздействию природных факторов.

Покрытие непосредственно обеспечивает необходимые эксплуатационные качества автомобильных дорог — это прежде всего ровность и необходимый коэффициент сцепления колес автомобилей с дорогой.

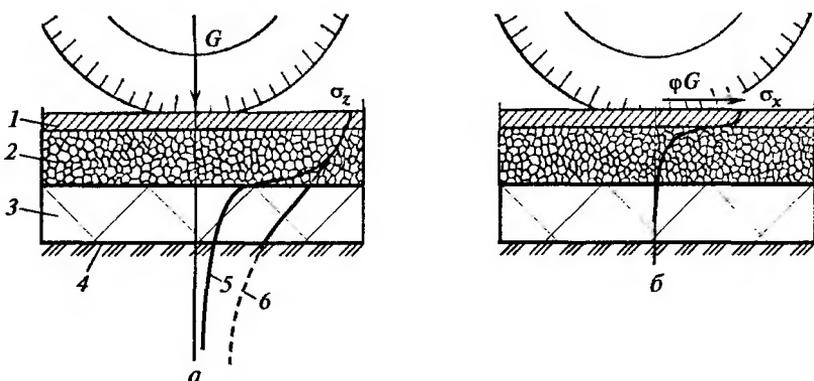
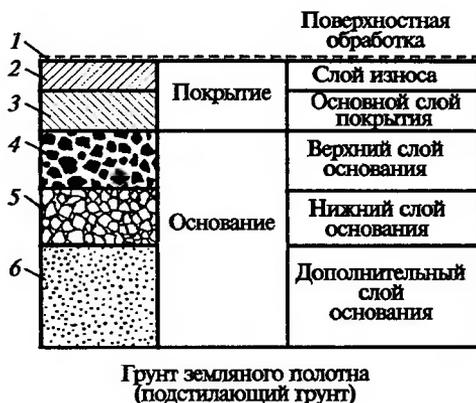


Рис. 23.1. Напряжения от колес автомобилей в многослойной дорожной одежде:

a — эпюра вертикальных напряжений σ_z ; b — эпюра горизонтальных напряжений σ_x ; 1 — покрытие; 2 — основание; 3 — дополнительный слой основания; 4 — грунтовое основание; 5 — напряжения в дорожной одежде; 6 — напряжения в однородной среде



Р и с. 23.2. Конструктивные слои дорожных одежд:

1 — поверхностная обработка; 2 — мелкозернистый асфальтобетон; 3 — крупнозернистый асфальтобетон; 4 — щебень, обработанный вяжущими материалами; 5 — щебень; 6 — песок

В качестве материалов для устройства покрытий наиболее часто используют такие высокопрочные и дорогие материалы, как асфальтобетон или цементобетон.

Поверх покрытий водонепроницаемых или обладающих невысоким сопротивлением истиранию устраивают тонкие защитные слои *поверхностной обработки (слои износа)* путем розлива органических вяжущих материалов с засыпкой мелким гранитным щебнем. Периодически восстанавливаемая поверхностная обработка защищает покрытие от проникновения в него влаги и обеспечивает необходимые сцепные качества колес автомобилей в ходе эксплуатации.

Основание — несущая часть конструкции дорожной одежды, состоящая из прочных материалов и расположенная под покрытием, воспринимает вертикальные нагрузки и обеспечивает совместно с покрытием перераспределение напряжений в конструкции и снижение их величин в грунте рабочего слоя земляного полотна (подстилающем грунте).

Основание не подвергается непосредственному воздействию колес автомобилей, поэтому для его устройства обычно используют материалы несколько меньшей прочности, чем в покрытии и слое износа. Основание может состоять из одного или нескольких слоев, верхние из которых обрабатывают вяжущими материалами. В значительной мере изолированное при устройстве усовершенствованных покрытий от воздействия поверхностной влаги основание, тем не менее, может увлажняться в результате перемещения влаги снизу вверх из земляного полотна, с боков из обочин, а также сверху через трещины в покрытии. Поэтому к материалам для устройства оснований предъявляют определенные требования по морозостойкости.

В качестве материалов слоев оснований новых дорожных одежд используют крупнозернистый асфальтобетон, щебень и гравий обработанные вяжущими, щебень, естественные и оптимальные гравийные смеси, цементогрунт и т.д. При реконструкции автомобильных дорог и усилении существующих дорожных одежд последние часто используют в качестве оснований конструкций с новыми покрытиями.

Дополнительный слой основания устраивают между основанием и грунтом земляного полотна из несвязного, не теряющего своих свойств при увлажнении материала, с высоким коэффициентом фильтрации — песка, гравия или гравийно-песчаных смесей. Дополнительный слой основания выполняет функции дренирующего слоя, обеспечивая быстрый отвод воды из-под дорожной конструкции и осушение грунта верхней части земляного полотна. На участках земляного полотна, сложенного из пылеватых мелкозернистых песков, суглинистых и глинистых грунтов, в которых развиваются процессы зимнего влагонакопления и пучинообразования, дополнительный слой основания выполняет функции морозозащитного слоя, поскольку материалы, из которых его изготавливают, не подвержены процессам зимнего влагонакопления. В общем случае дополнительный слой основания обеспечивает снижение толщины покрытия и основания дорожной конструкции.

Грунт земляного полотна (грунтовое основание дорожной одежды) воспринимает вертикальное давление от вышележащих слоев дорожной одежды. От свойств и прочности грунтового основания дорожной одежды во многом зависят работоспособность, долговечность и надежность всей конструкции в целом. При переувлажнении весной и осенью грунт земляного полотна не должен терять своей несущей способности настолько, что при этом возникнут необратимые его деформации с провалами и просадки покрытия. Общая прочность дорожной одежды может быть обеспечена лишь на однородном, хорошо уплотненном земляном полотне при обеспеченном водоотводе. Повышение сопротивляемости грунтов земляного полотна внешним нагрузкам, его осушение и постоянство водного режима являются наиболее надежными способами увеличения прочности дорожной конструкции и снижения ее стоимости. Никакое увеличение толщин конструктивных слоев покрытия и основания не может обеспечить необходимую прочность и ровность дорожной одежды, укладываемой на слабом грунте земляного полотна.

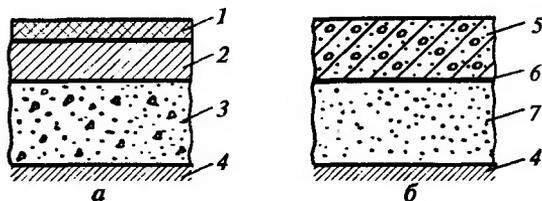
23.3. Основные типы дорожных одежд

По механическим свойствам все дорожные одежды делят на *нежесткие*, слабо сопротивляющиеся изгибу (рис. 23.3, а), и *жесткие*, сопротивляющиеся изгибающим моментам (рис. 23.3, б).

По общей прочности дорожные одежды подразделяют на четыре типа (табл. 23.1).

Т а б л и ц а 23.1 Классификация дорожных одежд и покрытий по общей прочности

№ п/п	Типы дорожных одежд	Виды покрытий, материал и способы его укладки
1	Капитальные	Усовершенствованные покрытия: а) из горячих асфальтобетонных смесей; б) из теплых асфальтобетонных смесей; в) из цементобетона монолитного и сборного т.д.
2	Облегченные	Усовершенствованные покрытия: а) из горячих асфальтобетонных смесей; б) из холодных асфальтобетонных смесей; в) из органоминеральных смесей с жидкими органическими вяжущими, с жидкими органическими вяжущими совместно с минеральными; с вязкими, в том числе эмульгированными, органическими вяжущими; с эмульгированными органическими вяжущими совместно с минеральными; из каменных материалов и грунтов, обработанных битумом по способу смешения на дороге или методами пропитки; из каменных материалов, обработанных органическими вяжущими методом пропитки; черного щебня, приготовленного в установке и уложенного по способу заклинки; из пористой и высокопористой асфальтобетонной смеси с поверхностной обработкой; из прочного щебня с двойной поверхностной обработкой
3	Переходные	Покрытия переходные: а) из щебня прочных пород, устроенных по способу заклинки без применения вяжущих материалов; б) из грунтов и малопрочных каменных материалов, укрепленных вяжущими; в) из булыжного и колотого камня (мостовые)
4	Низшие	Покрытия низшие: а) из щебеночно-гравийно-песчаных смесей; б) из малопрочных каменных материалов и шлаков; в) из грунтов, укрепленных или улучшенных различными местными материалами



Р и с. 23.3. Принципиальные конструкции дорожных одежд:

а — нежестких; *б* — жестких; 1 — покрытие; 2 — основание; 3 — дополнительный слой основания; 4 — грунт земляного полотна; 5 — цементобетонная плита; 6 — выравнивающий слой; 7 — фильтр

Дорожные одежды различных типов применяют:

с *усовершенствованными капитальными покрытиями* — на дорогах I, II и III категорий;

с *усовершенствованными облегченными покрытиями* — на дорогах III и IV категорий;

с *переходными покрытиями* — на дорогах IV и V категорий;

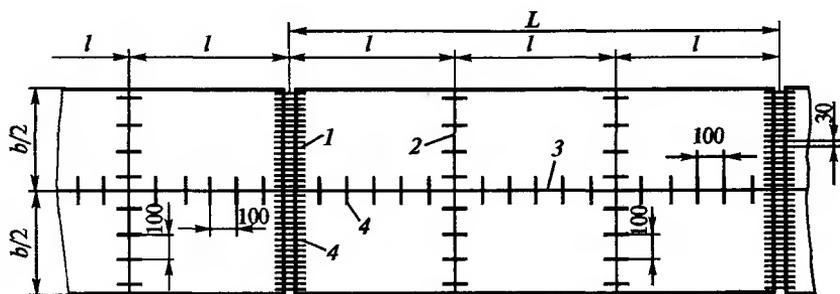
с *низшими покрытиями* — на дорогах V категории.

Современные покрытия дорожных одежд, представляемые различными материалами и технологиями их устройства, различают:

асфальтобетонные покрытия, используемые в дорожных конструкциях нежесткого типа, состоят из 1—3 тщательно уплотненных слоев асфальтобетонной смеси, уложенных на прочное основание.

Асфальтобетон — это искусственный материал, состоящий из очень прочного каменного остова — щебня из твердых неполируемых горных пород или гравия и песка, связанных между собой смесью тонкого минерального порошка с битумом. Различают асфальтобетоны: песчаные (с крупностью частиц до 5 мм), мелкозернистые (с крупностью щебня 5—10 мм), среднезернистые (с крупностью 10—25 мм) и крупнозернистые (с крупностью 25—40 мм). Поскольку свойства асфальтобетонных смесей во многом зависят от температуры окружающего воздуха, к подбору их состава предъявляют особые требования с целью недопущения растрескивания покрытия зимой и образования волн и сдвигов в летний период;

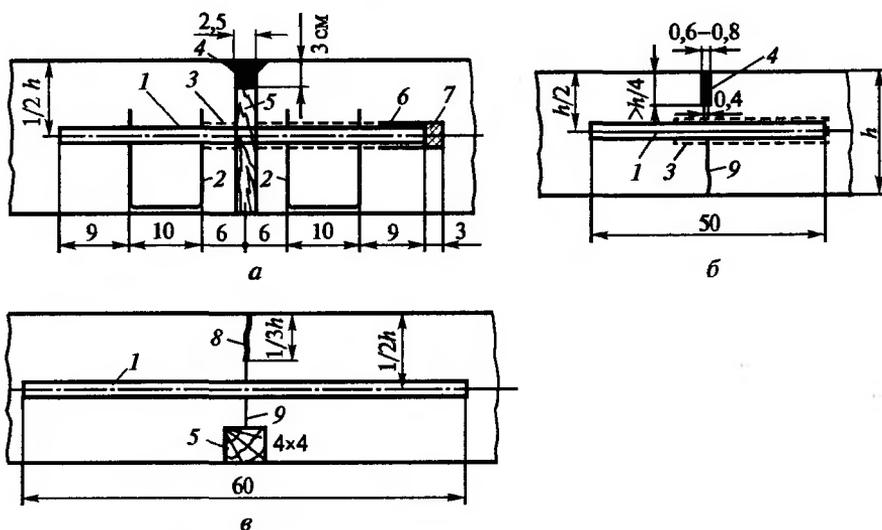
цементобетонные покрытия, используемые в дорожных конструкциях жесткого типа, обладают большой монолитностью и высокой сопротивляемостью внешним нагрузкам. Их строят в виде плит размером в плане 3—4 на 6—7 м при толщине от 18 до 24 см. Плиты отделяют друг от друга температурными швами. Различают *швы расширения*, сокращающиеся при нагревании плит и их удлинении, и *швы сжатия*, расширяющиеся при охлаждении плит и их укорочении (рис. 23.4).



Р и с. 23.4. Схема размещения температурных швов в цементобетонном покрытии:

1 — шов расширения; 2 — шов сжатия; 3 — продольный шов; 4 — штыри

Для обеспечения совместной работы плит и сохранения их взаимного положения швы объединяют стальными штырями, которые обеспечивают возможность температурных изменений длины плит, передают вертикальные нагрузки и частично изгибающие моменты с одной плиты на другую (рис. 23.5).



Р и с. 23.5. Конструкция швов цементобетонных покрытий:

а — поперечный шов расширения; б — поперечный шов сжатия; в — продольный шов; 1 — штырь; 2 — монтажный каркас из тонкой арматуры для закрепления штырей на месте при бетонировании; 3 — обмазка битумом; 4 — изолирующий материал; 5 — деревянная прокладка; б — колпачок длиной 60—80 мм; 7 — наполнитель из опилок или войлока; 8 — искусственный шов; 9 — место разрыва плиты по слабому сечению

Свойства покрытий из цементобетонных плит, в отличие от асфальтобетонных покрытий, практически не меняются с изменением температуры. Цементобетонные покрытия хорошо сопротивляются износу и более долговечны, чем другие виды покрытий.

Строительство цементобетонных покрытий полностью механизировано. Современные высокопроизводительные укладчики типа «Автогрейд» обеспечивают качественную постройку бетонных покрытий со скоростью порядка 800—1000 п.м. в день с автоматической укладкой штырей в продольные швы.

Цементобетонные покрытия, как правило, существенно дороже других видов покрытий и требуют длительного и тщательного ухода перед вводом в эксплуатацию. Несмотря на высокую прочность самих цементобетонных покрытий, долговечная работа последних возможна лишь при укладке их на прочные основания;

покрытия из сборных железобетонных плит имеют ряд несомненных преимуществ по сравнению с цементобетонными покрытиями. Сборные железобетонные плиты изготавливают заблаговременно на заводах ЖБК с соблюдением всех технологических правил и режимов ухода за бетоном, а их строительство сводится к монтажу покрытия на подготовленном основании. Строительство сборных железобетонных покрытий можно выполнять в течение всего года, включая и неблагоприятные для бетонных работ периоды. Движение по сборным покрытиям можно открывать немедленно после их монтажа.

Однако покрытия из сборных железобетонных плит, несмотря на очевидные достоинства, имеют и серьезные недостатки, сдерживающие их широкое применение. Это, прежде всего, низкие темпы укладки сборных железобетонных плит, невозможность полноценной передачи конструкциями стыков нагрузок и моментов с плиты на плиту, большой расход арматуры и, главное, невозможность придания покрытиям необходимой ровности для обеспечения комфортабельного и безопасного движения автомобилей с расчетными скоростями. Поэтому сфера применения сборных покрытий в настоящее время ограничена временными подъездными путями к объектам строительства, подъездными путями к оборонным объектам, нефтепромысловыми и лесовозными дорогами;

покрытия из щебня, обработанного органическими вяжущими, хорошо сопротивляются разрушающему воздействию колес автомобилей и обладают достаточной высокой водостойкостью. Обработку вяжущими (разогретыми вязкими битумами или битумными эмульсиями) каменных материалов осуществляют смешением в специальных установках (стационарных или передвижных), пропиткой недоукатанного слоя щебня одинаковой крупности либо перемешиванием камен-

ных материалов с вяжущими автогрейдером непосредственно на дороге с последующей заклинкой, т.е. россыпью по поверхности мелко-го щебня из прочных каменных пород и уплотнением;

покрытия из естественного гравия или из искусственно подобранных по крупности оптимальных гравийных смесей, т.е. в которых поры между крупными фракциями заполнены частицами более мелкими и смесь обладает минимальной пористостью. Связность таких покрытий обеспечивают мелкие частицы пыли и глины, входящие в состав материала. В периоды года с повышенным увлажнением прочность таких покрытий может заметно снижаться;

покрытия из укрепленных грунтов или отходов промышленности имеют распространение в экономически развитых промышленных районах и в районах с недостатком естественных каменных материалов. Естественные грунты, обработанные органическими вяжущими или цементом, обладают повышенной прочностью и устойчивостью против увлажнения и их давно используют в качестве конструктивных слоев дорожных одежд (оснований и дополнительных слоев основания). На дорогах с невысокой интенсивностью движения они успешно работают в качестве несущих слоев при наличии прочной поверхностной обработки;

естественные грунтовые покрытия, улучшенные гранулометрическими добавками. Добавление песка и других зернистых материалов к глинистым грунтам увеличивает их сопротивляемость внешним нагрузкам при увлажнении.

23.4. Принципы конструирования дорожных одежд

Как уже отмечалось выше, при чрезвычайно высокой капиталоемкости автомобильных дорог дорожные одежды являются одним из самых дорогих их элементов, достигая до 60—70% общей стоимости дороги в целом. При этом дорожные одежды во многом определяют долговечность, транспортно-эксплуатационные качества автомобильных дорог и стоимость перевозок. Дорожные конструкции работают в условиях более тяжелых, чем другие транспортные сооружения на дорогах, поскольку подвержены непосредственному воздействию не только транспортных потоков, но и различных природных факторов. Поэтому к назначению конструкций дорожных одежд подходят особенно внимательно, сочетая стремление к максимальному снижению стоимости строительства с возможным повышением долговечности и надежности конструкций. В связи с тем, что по длине автомобильной дороги не удается устранить при проектировании линии продольного профиля и земляного полотна изменения почвен-

но-грунтовых, инженерно-геологических, гидрологических и гидрогеологических условий, при проектировании дорожных одежд выделяют участки с аналогичными грунтовыми условиями, условиями увлажнения, перспективной интенсивностью движения и обеспеченностью строительными материалами, применительно к которым и разрабатывают рациональные варианты конструкции дорожной одежды.

Проектирование дорожных одежд состоит из двух последовательно выполняемых взаимосвязанных процессов — *конструирования и конструктивных расчетов*, взаимная подмена которых не может обеспечить получение надежных, экономичных, а также удобных в строительстве и последующей эксплуатации инженерных решений.

В зависимости от особенностей работы при воздействии внешних нагрузок различают две принципиальные группы дорожных одежд — нежесткие и жесткие (см. рис. 23.3).

Жесткие дорожные конструкции, представляемые цементобетонными и железобетонными покрытиями, хорошо сопротивляются растяжению при изгибе и распределяют давление от временной нагрузки на значительную площадь, оказывая небольшое давление на подстилающий грунт. Являясь обычно существенно более дорогими по сравнению с другими типами дорожных одежд, они, тем не менее, находят применение в следующих случаях:

на дорогах с интенсивным движением тяжелых автомобилей и автопоездов с нагрузками на одиночную ось 100 кН и более (более 250 авт/сут);

в районах с недостатком местных каменных материалов;

на участках дорог, где невозможно обеспечить быструю очистку покрытия от грязи;

на участках высоких насыпей и при слабых грунтовых основаниях, когда трудно обеспечить стабильность грунта земляного полотна;

на мостовых переходах для обеспечения ритмичной работы цементобетонных заводов (ЦБЗ).

В остальных случаях применяют, как правило, более дешевые дорожные *конструкции нежесткого типа* со слоями, построенными из различных видов асфальтобетонов (дегтебетонов), из каменных материалов и грунтов, укрепленных битумом, цементом, известью, комплексными и другими вяжущими, а также из слабосвязанных зернистых материалов (щебня, шлака, гравийных смесей, песка и т.д.).

Конструирование дорожной одежды состоит в принципиальном выборе для нее наиболее подходящих в данных условиях материалов исходя из местных ресурсов и соображений наилучшей организации

строительных работ, в определении оптимальных толщин слоев и размещении их по глубине.

Конструирование дорожной одежды — это одна из наиболее ответственных частей процесса проектирования, базирующаяся на четких представлениях о напряженном состоянии и механизме деформирования дорожных одежд, на учете опыта работы различных типов конструкций в разных природно-климатических условиях и на особенностях воздействия на них подвижного состава и природных факторов.

Наметив вариант конструкции дорожной одежды, вначале назначают толщины тех ее слоев, размеры которых определяются не столько прочностью, сколько иными факторами (обеспечение водоотвода, предотвращение пучинообразования, обеспечение износостойкости и т.д.) или же принимают минимальные толщины конструктивных слоев в связи с их высокой стоимостью.

В ряде случаев в конструкции предусматривают возможность постепенного (стадийного) ее усиления с укладкой сверху слоев из более прочных материалов по мере возрастания интенсивности и изменения состава движения.

К верхним слоям земляного полотна, на которые укладывают дорожную конструкцию, предъявляют высокие требования как в части их прочности, так и однородности. Грунтовое основание дорожной одежды рассматривают как один из важнейших конструктивных слоев дорожной одежды. Поскольку грунты земляного полотна часто теряют свою несущую способность при увлажнении, технические мероприятия по осушению верхней части земляного полотна являются обязательным элементом конструкции дорожной одежды. Опыт эксплуатации автомобильных дорог свидетельствует, что недостаточная прочность земляного полотна не может быть компенсирована утолщением других конструктивных слоев дорожной одежды.

Расчет дорожной одежды заключается в обосновании необходимых толщин ее слоев и всей конструкции в целом с обеспечением равнопрочности всех вариантов конструкции в соответствии с расчетными параметрами перспективного транспортного потока.

Одним из основных требований при назначении вариантов конструкции дорожной одежды является максимальное использование дешевых местных дорожно-строительных материалов, поскольку сокращение дальности возки дорожно-строительных материалов позволяет существенно снизить стоимость строительства автомобильной дороги.

При отсутствии местных каменных материалов устраивают основания из грунтов, укрепленных различными вяжущими. В промыш-

ленно развитых районах находят широкое применение золы уноса ТЭЦ, металлургические шлаки, обладающие цементирующими свойствами, каменные породы из отвалов рудников и каменноугольных шахт и другие побочные отходы промышленности. Однако в связи со значительной неоднородностью этих материалов они требуют тщательной сортировки перед укладкой в дорожную конструкцию. Некоторые слабые местные каменные материалы требуют предварительной обработки малыми дозами цемента или органических вяжущих для повышения их морозоустойчивости. Чем слабее и неоднороднее местные материалы, тем большего внимания они требуют при конструировании и строительстве дорожных одежд.

При конструировании дорожных одежд учитывают технологические особенности их строительства, отдавая предпочтение вариантам конструкции наиболее простым при постройке, допускающим высокую степень индустриализации заготовительных работ на базах и полную механизацию строительных работ.

Большое значение при конструировании придают возможности пропуска строительной техники по уплотненным слоям дорожной одежды. Следует разрабатывать варианты дорожных конструкций по возможности с минимальным количеством конструктивных слоев, поэтому не следует увеличивать их число без явной необходимости, поскольку это приводит к усложнению технологического процесса с соответствующим возрастанием стоимости строительства.

При конструировании дорожных одежд, которые подлежат усилению в ходе эксплуатации в связи с закономерным возрастанием интенсивности движения, эти конструкции часто используют в качестве основания новых дорожных одежд.

Дорожная одежда должна быть защищена от поступления и накопления в ней влаги. Водопроницаемость конструктивных слоев возрастает сверху вниз, а из нижнего дополнительного слоя основания при водонепроницаемых грунтах земляного полотна обеспечивают отвод воды на откосы. Для предотвращения поступления влаги снизу обеспечивают необходимое возвышение дорожной конструкции над уровнями грунтовых и поверхностных вод или предусматривают устройство капилляропрерывающих прослоек.

Материалы в дорожной одежде обычно располагают с убывающей по глубине прочностью сообразно с затуханием напряжений от временной нагрузки, при этом отношение модулей упругости материалов смежных конструктивных слоев из слабосвязных материалов не должно превышать 5—6.

Верхние слои основания, где возникают значительные напряжения сжатия и сдвига от тяжелых автомобилей, устраивают из материа-

лов, обладающих достаточной прочностью в пределах всех возможных колебаний температуры и влажности (крупнозернистый пористый асфальтобетон; щебень, обработанный вязким битумом; щебень или гравий, укрепленный цементом, и т.д.). В нижних слоях основания обычно уже используют местные каменные материалы и укрепленные грунты.

Отдельные конструктивные слои по технологическим условиям не должны быть тоньше некоторых минимальных значений, при которых обеспечивается возможность их технологического исполнения (табл. 23.2).

Т а б л и ц а 23.2. Минимальные толщины конструктивных слоев по технологическим условиям

Наименование слоев	Толщина слоя, см
Асфальтобетон мелкозернистый	3—5
Асфальтобетон крупнозернистый	6—7
Асфальтобетон песчаный	3—4
Щебеночные (гравийные) материалы, обработанные органическим вяжущим	8
Щебень, обработанный органическим вяжущим по способу пропитки	8
Щебеночные и гравийные материалы, не обработанные вяжущими на песчаном основании	15
То же на прочном основании (каменном или из укрепленного грунта)	8
Каменные материалы и грунты, обработанные органическими или неорганическими вяжущими	10

П р и м е ч а н и я: 1. Большие толщины асфальтобетонных покрытий следует принимать для дорог I и II категорий, меньшие — для дорог III и IV категорий. 2. Толщину конструктивного слоя необходимо принимать не менее чем 1,5 размера наиболее крупной фракции применяемого в слое минерального материала. 3. В случаях укладки каменных материалов на глинистые и суглинистые грунты следует предусматривать прослойку толщиной не менее 10 см из песка, высевок, укрепленного грунта или других водоустойчивых материалов.

Поскольку при одной и той же перспективной интенсивности движения могут быть применены разные типы равнопрочных дорожных конструкций, то из нескольких возможных вариантов выбирают тот, который обеспечивает в течение нормативного срока службы наименьшую, отнесенную к тонно-километру сумму транспортных расходов и расходов на строительство и эксплуатацию — автомобильную и дорожную составляющие себестоимости перевозок.

Автомобильная составляющая себестоимости складывается из расходов на топливо, смазочные материалы и шины, из заработной платы водителей, из расходов на ремонт и обслуживание автомобилей, а также из стоимости их амортизации. Эти расходы во многом зависят от типа и состояния покрытия (табл. 23.3).

Таблица 23.3. Относительные эксплуатационные показатели покрытий

Покрытия	Коэффициент сопротивления качению	Относительные эксплуатационные показатели			
		Техническая скорость	Расход топлива	Межремонтный пробег	Стоимость автомобильных перевозок
Асфальтобетонные и цементобетонные	0,015	1	1	1	1
Щебеночные с применением органических вяжущих	0,025	0,95	1,05	0,91	1,1—1,3
Щебеночные и гравийные	0,035	0,7—0,8	1,1	0,83	1,2—1,6
Булыжная мостовая	0,05	0,65	1,3	0,83	1,4—1,8
Грунтовая профилированная дорога	0,05—0,06	0,4	1,6—1,8	0,51	1,7—2,0

Примечание. Меньшие стоимости автомобильных перевозок относятся к тщательно организованной эксплуатационной службе, большие — к средним условиям эксплуатации парка автомобилей.

Дорожная составляющая себестоимости транспортных расходов складывается из отнесенных к 1 ткм расходов организаций на строительство, капитальный и текущий ремонт и содержание дорог. Обычно дорожная составляющая стоимости перевозок не превышает 10—15% от полной себестоимости перевозок. При росте дальности перевозок и грузоподъемности автомобилей относительная роль дорожной составляющей себестоимости перевозок повышается при уменьшении общей величины себестоимости.

23.5. Прочностные характеристики грунтов и материалов конструктивных слоев

Надежные результаты расчетов толщин конструктивных слоев и общей толщины дорожных одежд могут быть получены только при использовании достоверных значений прочностных характеристик материалов конструктивных слоев одежды и подстилающего грунта.

При проектировании новых автомобильных дорог обычно используют усредненные табличные значения модулей упругости материалов и грунтов. Модули упругости грунтов иногда определяют также опытным путем вдавливанием в грунт круглого штампа.

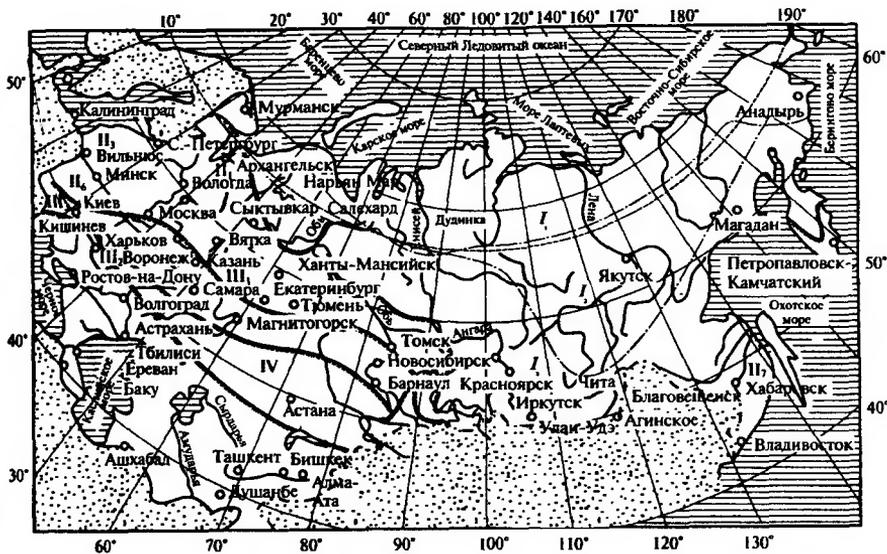
Для проектирования нежестких дорожных одежд на вновь сооружаемых дорогах, на новых участках реконструируемых дорог, а также при разработке каталогов и альбомов типовых решений по конструкциям дорожных одежд на дорогах общей сети предназначены отраслевые дорожные нормы «Проектирование нежестких дорожных одежд» ОДН 218.046—01.

При определении *модуля упругости* учитывают только восстанавливаемую после снятия нагрузки упругую часть деформации, а при определении *модуля деформации* — полную ее величину.

Для грунтов нет прямой пропорциональности между давлением и деформацией, модуль упругости грунтов оказывается разным при различных величинах погружения штампа. Наиболее значительно величина упругости грунтов меняется при очень малых деформациях, характерных для изгиба жестких дорожных покрытий. В интервале больших деформаций, свойственных нежестким дорожным одеждам, изменения величины модуля упругости грунтов сравнительно невелики. При конструктивных расчетах для всех типов дорожных одежд, как жестких, так и нежестких, принимают (с запасом) одинаковые значения модулей упругости грунтов.

В связи с тем, что в течение годового цикла существенно меняется водно-тепловой режим земляного полотна, соответственно в течение года, как правило, существенно меняются модули упругости и модули деформации грунтов. Чем выше влажность грунтов, тем ниже их модули упругости. Особенно сильно снижаются модули упругости грунтов в периоды весеннего переувлажнения. Поэтому расчетные значения модулей упругости грунтов, приводимые в действующих инструкциях по расчету дорожных одежд, принимают именно для этого, наиболее неблагоприятного периода года. В относительно сухие периоды года, а также в зимний период при промерзшем земляном полотне фактические модули упругости грунтов существенно выше значений, приводимых в таблицах для расчета прочности дорожных конструкций.

В результате многолетних натурных исследований водно-теплого режима земляного полотна в разных дорожно-климатических зонах (рис. 23.6) установлены характерные влажности верхних слоев земляного полотна под дорожными одеждами при нормированном возвышении поверхности покрытия над уровнями грунтовых и по-



Р и с. 23.6. Карта дорожно-климатических зон и подзон:

— границы дорожно-климатических зон;
 - - - - границы дорожно-климатических подзон

верхностных вод в наиболее неблагоприятные периоды года (табл. 23.4).

Таблица 23.4. Средние значения влажности в долях от границы текучести для грунтов

Дорожно-климатические зоны	Дорожно-климатические подзоны	Схема увлажнения рабочего слоя земляного полотна	Среднее значение влажности $\bar{W}_{\text{таб}}$ грунта, доли от \bar{W}_1			
			Супесь легкая	Песок пылеватый	Суглинок легкий, тяжелый и тяжелый пылеватый, глины	Супесь пылеватая, тяжелая пылеватая, суглинок пылеватый
I	I ₁	1	0,53	0,57	0,62	0,65
		2	0,55	0,59	0,65	0,67
		3	0,57	0,62	0,67	0,70
	I ₂	1	0,57	0,57	0,62	0,65
		2	0,59	0,62	0,67	0,70
		3	0,62	0,65	0,70	0,75
	I ₃	1	0,60	0,62	0,65	0,70
		2	0,62	0,65	0,70	0,75

Дорожно-климатические зоны	Дорожно-климатические подзоны	Схема увлажнения рабочего слоя земляного полотна	Среднее значение влажности $\bar{W}_{\text{таб}}$ грунта, доли от \bar{W}_s			
			Супесь легкая	Песок пылеватый	Суглинок легкий, тяжелый и пылеватый, суглинок пылеватый, глины	Супесь пылеватая, тяжелая пылеватая, суглинок пылеватый
I	I ₃	3	0,65	0,70	0,75	0,80
II	II ₁	1	0,60	0,62	0,65	0,70
		2	0,63	0,65	0,68	0,73
		3	0,65	0,67	0,70	0,75
	II ₂	1	0,57	0,59	0,62	0,67
		2	0,60	0,62	0,65	0,70
		3	0,62	0,64	0,67	0,72
	II ₃	1	0,63	0,65	0,68	0,73
		2	0,66	0,68	0,71	0,76
		3	0,68	0,70	0,73	0,78
	II ₄	1	0,60	0,62	0,65	0,70
		2	0,63	0,65	0,68	0,73
		3	0,65	0,67	0,70	0,75
	II ₅	1	0,65	0,67	0,70	0,75
		2	0,68	0,70	0,73	0,78
		3	0,70	0,72	0,75	0,80
	II ₆	1	0,62	0,64	0,67	0,72
		2	0,65	0,67	0,70	0,75
		3	0,67	0,69	0,72	0,77
III	III ₁	1	0,55	0,57	0,60	0,63
		2—3	0,59	0,61	0,63	0,67
	III ₂	1	0,58	0,60	0,63	0,66
		2—3	0,62	0,64	0,66	0,70
	III ₃	1	0,55	0,57	0,60	0,63
		2—3	0,59	0,61	0,63	0,67
IV		1	0,53	0,55	0,57	0,60
		2—3	0,57	0,58	0,60	0,64
V		1	0,52	0,53	0,54	0,57
		2—3	0,55	0,56	0,57	0,60

Примечание. Табличными значениями $\bar{W}_{\text{таб}}$ можно пользоваться только при обеспечении возвышения земляного полотна в соответствии со СНиП. На участках, где возвышение не обеспечивается (например, в нулевых местах и в выемках с близким залеганием грунтовых вод), величина $\bar{W}_{\text{таб}}$ назначается индивидуально по данным прогнозов, но она должна быть не менее чем на 0,03 выше табличных значений.

В табл. 23.5 приведены расчетные значения модулей упругости грунтов, которые принимают при расчетах толщины дорожных одежд.

Таблица 23.5. Нормативные значения модулей упругости грунтов

Грунт	Модуль упругости, при относительной влажности W/W_m , МПа									
	0,5	0,55	0,60	0,65	0,70	0,75	0,80	0,85	0,90	0,95
Пески: крупные средней крупности мелкие однородные пылеватые	130 120 100 75									
	96	90	84	78	72	66	60	54	48	43
Супеси: легкая пылеватая, тяжелая пылеватая легкая крупная	70	60	56	53	49	45	43	42	41	40
	108	90	72	54	46	38	32	27	26	25
Суглинки: легкий, тяжелый, легкий пылеватый, тяжелый пылеватый	65									
	108	90	72	50	41	34	29	25	24	23
Глины	108	90	72	54	46	38	32	27	26	25
	108	90	72	50	41	34	29	25	24	23

Примечание. Классификация песков дана по ГОСТу 25100—95. Однородные выделяются по указаниям СНиП.

В табл. 23.6—23.14 представлены значения модулей упругости и другие расчетные характеристики для основных материалов конструктивных слоев дорожных одежд.

Таблица 23.6. Нормативные значения кратковременного модуля упругости асфальтобетонов различных составов (при расчете конструкции по допускаемому упругому прогибу и по условию сдвигоустойчивости)

Материал	Марка битума	Кратковременный модуль упругости E , МПа, при температуре покрытия				
		+10	+20	+30	+40	+50 (60)
Плотный асфальтобетон и высокоплотный асфальтобетон	Вязкого БНД и БН: 40/60,60/90, 90/130 130/200; 200/300	4400;3200;	2600;	1550;	850;650;	520;460;
		2400	1800;	1100 550	550	420
		1500;	1200	670;500	460;420	380;360
		1200	800;600			

Материал	Марка битума	Кратковременный модуль упругости E , МПа, при температуре покрытия				
		+10	+20	+30	+40	+50 (60)
Плотный асфальтобетон и высокоплотный асфальтобетон	Жидкого: БГ-70/130; СГ-130/200 СГ-70/130; МГ-70/130	1000;1000 800;800	420;420 360;360	400;400 350;350	350;3503 50;350	350;350 350;350
Пористый и высокопористый асфальтобетон	Вязкого БНД и БН: 40/60;60/90;90/130 130/200;200/300	2800;2000; 1400 1100;950	1700, 1200, 800 600,450	900;700; 510 400;350	540;460; 380 340;330	390;360; 350 340;330
Плотный дегтебетон	—	3800	1500	800	500	350
Пористый дегтебетон	—	2000	300	400	350	300
Асфальтобетоны холодные Бх Вх Гх Дх	—	1300 1100 900 750	—	—	—	—

Примечания: 1. Модули упругости пористого и высокопористого асфальтобетона даны применительно к песчаным смесям. При температуре от 30 до 50 °С модули упругости для мелкозернистых смесей следует увеличить на 10%, а для крупнозернистых смесей — на 20%. 2. При расчете на упругий прогиб принимать при $t = +10^\circ$.

Таблица 23.7. Расчетные значения модуля упругости асфальтобетона при расчете на длительную нагрузку

Вид асфальтобетона	Тип смеси	Расчетный модуль упругости E при статическом действии нагрузки, МПа, при расчетной температуре, °С			
		+20	+30	+40	+50
Плотные смеси	А	480	420	360	300
	Б	400	350	300	250
	В	320	280	240	200
	Г	300	270	220	200
	Д	200	180	160	150

Вид асфальтобетона	Тип смеси	Расчетный модуль упругости E при статическом действии нагрузки, МПа, при расчетной температуре, °С			
		+20	+30	+40	+50
Пористые и высокопористые смеси	Крупнозернистая	360	320	280	250
	Мелкозернистая	290	250	220	200
	Песчаная	250	225	200	190
Асфальтобетоны холодные	Бх	180	—	—	—
	Вх	170	—	—	—
	Гх	160	—	—	—
	Дх	150	—	—	—

Примечание. Модуль упругости высокоплотного асфальтобетона принимать как для плотного асфальтобетона типа А.

Таблица 23.8. Конструктивные слои из щебеночно-гравийно-песчаных смесей и грунтов, обработанных органическими и комплексными вяжущими (органоминеральные смеси — ГОСТ 30491—97)

№ п/п	Материал слоя	Нормативные значения модуля упругости E , МПа
1	Щебеночно-гравийно-песчаные смеси и крупнообломочные грунты (оптимального/неоптимального состава) обработанные: — жидкими органическими вяжущими или вязкими, в том числе эмульгированными органическими вяжущими — жидкими органическими вяжущими совместно с минеральными или эмульгированными органическими вяжущими совместно с минеральными	450/350
		950/700
2	Пески гравелистые, крупные, средние/пески мелкие, супесь легкая и пылеватая, суглинки легкие обработанные: — жидкими органическими вяжущими или вязкими, в том числе эмульгированными органическими вяжущими — жидкими органическими вяжущими совместно с минеральными или эмульгированными органическими вяжущими совместно с минеральными	430/280
		700/600

Таблица 23.9. Конструктивные слои из смесей щебеночно-гравийно-песчаных и грунтов, обработанных неорганическими вяжущими материалами, соответствующих ГОСТ 223558—94

№ п/п	Материал	Нормативные значения модуля упругости E , МПа
1	Щебеночно-гравийно-песчаные смеси, крупнообломочные грунты (оптимальные/неоптимальные), обработанные цементом — соответствующие марке: 20 40 60 75 100	500/400 600/550 800/700 870/830 1000/950
2	То же, обработанные зольным или шлаковым вяжущим — соответствующие марке: 20 40 60 75 100	450/350 550/500 750/650 870/780 950/910
3	Пески гравелистые, крупные, средние, пески мелкие и пылеватые, супесь легкая и тяжелая, суглинки легкие, обработанные цементом — соответствующие марке: 20 40 60 75 100	400/250 550/400 700/550 870/750 950/870
4	То же, обработанные зольным или шлаковым вяжущим — соответствующие марке: 20 40 60 75 100	300/200 450/300 600/450 730/600 870/750

Таблица 23.10. Конструктивные слои из черного щебня

№ п/п	Материал	Нормативные значения модуля упругости E , МПа
1	Черный щебень, уложенный по способу заклинки	600—900
2	Слой из щебня, устроенного по способу пропитки вязким битумом и битумной эмульсией	400—600

Примечание. Большие значения — для покрытий, меньшие — для оснований.

Таблица 23.11. Щебеночные основания, устраиваемые методом заклинки, соответствующие ГОСТ 25607—94

Материал слоя	Нормативные значения модуля упругости E , МПа
Щебень фракционированный 40—80 (80—120) мм с заклинкой:	
— фракционированным мелким щебнем	450 350
— известняковой мелкой смесью или активным мелким шлаком	400 300
— мелким высокоактивным шлаком	450 400
— асфальтобетонной смесью	500 450
— цементопесчаной смесью М75 при глубине пропитки $0,25—0,75h$ слоя	450—700 350—600

Примечание. Для слоя в числителе — из легкоуплотняемого щебня; в знаменателе — из трудноуплотняемого щебня.

Таблица 23.12. Характеристики асфальтобетонов при расчете на растяжение при изгибе под кратковременными нагрузками

Асфальтобетон	Расчетные значения модуля упругости E , МПа	Показатель степени m	Коэффициент различия реальных и лабораторных режимов α	Нормативные значения сопротивления растяжению при изгибе R_b , МПа
Высокоплотный на БНД марки:				
40/60	8600	6,0	5,0/5,6*	10,00
60/90	6000	5,5	5,2/5,9	9,80
90/130	4600	5,0	5,4/6,3	9,50
130/200	3500	4,5	5,8/6,8	9,30
200/300	2500	4,3	5,9/7,1	9,00
Плотный на БНД марки:				
40/60	6000	6,0	5,0/5,6	10,00
60/90	4500	5,5	5,2/5,9	9,80
90/130	3600	5,0	5,4/6,3	9,50
130/200	2600	4,5	5,8/6,8	9,30
200/300	2000	4,3	5,9/7,1	9,00
Пористый на БНД марки:				
40/60	3600	4,5	5,8/6,8	8,30
60/90	2800	4,3	5,9/7,1	8,00
90/130	2200	4,0	6,3/7,6	7,80
130/200	1800	3,75	6,6/8,2	7,60
200/300	1400	3,7	6,7/8,2	7,10

Асфальтобетон	Расчетные значения модуля упругости E , МПа	Показатель степени m	Коэффициент различия реальных и лабораторных режимов α	Нормативные значения сопротивления растяжению при изгибе R_0 , МПа
Высокопористый на БНД марки:				
40/60	3000	4,3	5,9 7,1	5,50/6,50**
60/90	2100	4,0	6,3/7,6	5,65/6,20
90/130	1700	3,8	6,5/7,9	5,50/ —
Холодные асфальтобетоны:				
Бх	2600	3,0	8,0/10,3	4,90
Вх	2200	2,5	9,8/13,4	4,60
Гх	1800	2,0	13,2 19,5	4,20
Дх	1500	2,0	13,2/19,5	3,90

Примечание. * — в числителе — для II дорожно-климатической зоны, в знаменателе — для III–V дорожно-климатических зон. ** — для песчаного асфальтобетона.

Таблица 23.13. Расчетные значения угла внутреннего трения и сцепления песчаных грунтов и песков конструктивных слоев в зависимости от расчетного числа приложения расчетной нагрузки (ΣN_p)

№ п/п	Тип грунта	Сцепление, МПа, и угол внутреннего трения, град, при суммарном числе приложений нагрузки (ΣN_p)					
		1	10^3	10^4	10^5	10^6	
1	Песок крупный с содержанием пылеватоглинистой фракции:						
		0%	$\frac{35}{0,004}$	$\frac{33}{0,003}$	$\frac{32}{0,003}$	$\frac{31}{0,003}$	$\frac{29}{0,003}$
		5%	$\frac{34}{0,005}$	$\frac{31}{0,004}$	$\frac{36}{0,004}$	$\frac{29}{0,003}$	$\frac{28}{0,003}$
2	Песок средней крупности с содержанием пылеватоглинистой фракции:						
		0%	$\frac{32}{0,004}$	$\frac{30}{0,004}$	$\frac{30}{0,003}$	$\frac{28}{0,003}$	$\frac{27}{0,002}$
		5%	$\frac{33}{0,005}$	$\frac{30}{0,004}$	$\frac{29}{0,003}$	$\frac{28}{0,003}$	$\frac{26}{0,002}$

№ п/п	Тип грунта	Сцепление, МПа, и угол внутреннего трения, град, при суммарном числе приложений нагрузки (ΣN_p)					
		1	10^3	10^4	10^5	10^6	
3	Песок мелкий с содержанием пылеватоглинистой фракции:	0%	$\frac{31}{0,003}$	$\frac{28}{0,003}$	$\frac{27}{0,002}$	$\frac{26}{0,002}$	$\frac{25}{0,002}$
		5%	$\frac{31}{0,005}$	$\frac{27}{0,004}$	$\frac{26}{0,004}$	$\frac{25}{0,004}$	$\frac{24}{0,003}$
		8%	$\frac{31}{0,006}$	$\frac{27}{0,005}$	$\frac{26}{0,004}$	$\frac{25}{0,003}$	$\frac{23}{0,002}$

Примечания: 1. Значения характеристик даны для условий полного заполнения пор водой. 2. В числителе — угол внутреннего трения в градусах, в знаменателе — сцепление в МПа. 3. При $\Sigma N_p > 4 \cdot 10^6$ расчетные значения ϕ и c следует принимать по столбцу « 10^6 ».

Таблица 23.14. Нормативные значения сдвиговых характеристик глинистых грунтов в зависимости от расчетного числа приложений расчетной нагрузки

Расчетная относительная влажность	Сцепление, МПа, при суммарном числе приложений нагрузки (ΣN_p)					Угол внутреннего трения, град, при суммарном числе приложений нагрузки (ΣN_p)				
	1	10^3	10^4	10^5	10^6	1	10^3	10^4	10^5	10^6
<i>Суглинки и глины</i>										
0,60	0,030	0,030	0,016	0,014	0,012	24	20	14,5	11	9
0,65	0,024	0,019	0,013	0,011	0,009	21	15	11	8	7
0,70	0,019	0,013	0,009	0,007	0,006	18	11,5	8,5	6,5	5,5
0,75	0,015	0,009	0,006	0,005	0,004	15	10	7,5	5	4
0,80	0,011	0,007	0,005	0,003	0,002	13	8	5	3	2,5
0,90	0,008	0,004	0,004	0,002	0,001	11,5	6,5	3,5	2,2	2
<i>Супеси и пески пылеватые</i>										
0,6	0,014	0,012	0,008	0,006	0,005	36	24	18	14	12
0,65	0,013	0,010	0,008	0,006	0,004	36	23,5	17	14	12
0,70	0,012	0,009	0,006	0,005	0,004	35	23,5	17	14	12
0,75	0,011	0,008	0,005	0,004	0,003	35	23	17	14	12

Расчетная относительная влажность	Сцепление, МПа, при суммарном числе приложений нагрузки (ΣN_p)					Угол внутреннего трения, град, при суммарном числе приложений нагрузки (ΣN_p)				
	1	10^3	10^4	10^5	10^6	1	10^3	10^4	10^5	10^6
0,80	0,010	0,007	0,005	0,004	0,003	34	23	17	14	12
0,85	0,009	0,007	0,004	0,003	0,003	34	22	15	12	10
0,90	0,008	0,004	0,003	0,003	0,003	33	21	12,5	10	8

Примечание. Значение сдвиговых характеристик при $\Sigma N_p = 1$ используются при расчете на статическое действие нагрузки. При $\Sigma N_p > 10^6$ расчетные значения φ и c следует принимать по столбцу « 10^6 ».

Расчетный (проектный) срок службы проектируемой дорожной одежды и требуемый уровень проектной надежности необходимо назначать на основе норм, принимаемых административными органами по согласованию с региональными дорожными организациями.

При проектировании дорожных одежд в зоне вечной мерзлоты должны быть дополнительно учтены характер вечномерзлых грунтов, их температурный и водный режим, а также влияние толщины деятельного слоя и вечномерзлого грунта (жесткого основания) на прочность дорожной одежды.

Учет указанных факторов осуществляют на основе специальных региональных нормативно-технических документов.

Глава 24

КОНСТРУКТИВНЫЕ РАСЧЕТЫ НЕЖЕСТКИХ ДОРОЖНЫХ ОДЕЖД

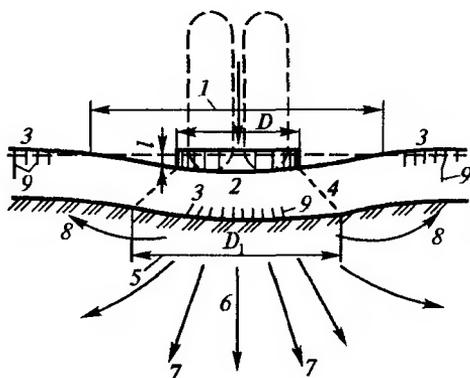
24.1. Нагрузки на дорожную одежду

Давление колес автомобилей на дорожную одежду — основная нагрузка, на которую рассчитывают дорожные конструкции. Под действием колес автомобилей происходят деформации конструктивных слоев дорожных одежд и подстилающего грунтового основания. При этом в дорожной конструкции протекают следующие процессы:

грунтовое основание дорожной одежды сжимается под действием нагрузок от подвижного состава, происходит изгиб дорожной конст-

Р и с. 24.1. Схема образования чаши прогиба и разрушение нежесткой дорожной одежды под колесами автомобиля:

1 — чаша прогиба; 2 — зона сжатия покрытия; 3 — зона растяжения; 4 — коническая поверхность среза дорожной одежды; 5 — площадь передачи вертикального давления на грунт; 6 — уплотнение грунтового основания дорожной конструкции; 7 — направление сжатия грунта; 8 — выпор грунта; 9 — трещины в монолитных конструктивных слоях; 1 — упругая деформация дорожной конструкции



рукции по некоторой криволинейной поверхности с образованием так называемой «чаши прогиба» (рис. 24.1) глубиной l ;

под воздействием вертикальной нагрузки происходит сжатие конструктивных слоев дорожной конструкции, а в нижней части конструктивных слоев — растяжение. При превышении растягивающими напряжениями некоторого предела прочности в покрытии и монолитных слоях основания образуются трещины. По периметру контакта следа колеса автомобиля возникают срезающие напряжения, которые при значительных величинах вертикальной нагрузки могут вызвать пролом в монолитных конструктивных слоях в виде расширяющегося книзу усеченного конуса;

в малосвязных конструктивных слоях основания и в подстилающем грунте вследствие изгиба возникают сдвигающие касательные напряжения (подобно изгибаемой многослойной металлической пластине, соединенной заклепками, где роль заклепок играют силы внутреннего трения и сцепления), которые могут приводить к необратимым сдвигам по контактам конструктивных слоев;

в зоне растяжения по верхней границе чаши прогиба растягивающие напряжения также могут вызвать растрескивание покрытия.

При фактически имеющем место на дорогах многократном приложении нагрузок от колес проходящих автомобилей в нежестких дорожных одеждах развиваются процессы нарастания прогиба покрытий в зависимости от величины нагрузок по одному из трех видов кривых, изображенных на рис. 24.2.

В первый период после сдачи дороги в эксплуатацию дорожные одежды еще испытывают некоторые остаточные деформации, связанные с доуплотнением земляного полотна и некоторых конструктивных слоев нежесткой дорожной одежды, после чего дорожная



Р и с. 24.2. Варианты возможного хода деформаций нежестких дорожных одежд при многократных нагружениях:

I — остаточные деформации; 2 — полная величина остаточных и упругих деформаций

конструкция уже работает только в стадии упругих деформаций (кривая I).

При большой величине нагрузки от подвижного состава в периоды года, неблагоприятные по степени увлажнения земляного полотна, может происходить постепенное накопление относительно небольших пластических деформаций (кривая II). И наконец, при значительных величинах вертикальных нагрузок или при сильном ослаблении грунтового основания вначале происходит замедленное накопление осадок с быстрым их последующим возрастанием и разрушением дорожной конструкции, когда суммарная величина осадок превысит некоторую предельно допустимую величину (кривая III). Именно по этой причине в весенние периоды года службы эксплуатации автомобильных дорог нередко ограничивают выход на трассу тяжелых автомобилей.

Таким образом, при проектировании нежестких дорожных одежд необходимо выполнять следующие конструктивные расчеты на прочность как всей дорожной конструкции в целом, так и отдельных ее конструктивных слоев:

расчет нежесткой дорожной конструкции на прочность в целом по допускаемому упругому прогибу в наиболее неблагоприятный по степени увлажнения период года исходя из суммарного расчетного числа приложений расчетной нагрузки в точке на поверхности дорожной конструкции за расчетный срок службы;

расчет несвязных конструктивных слоев и подстилающего грунта на устойчивость против сдвига;

расчет конструктивных слоев из монолитных материалов на установившиеся растягивающие напряжения при изгибе;

расчет морозоустойчивости дорожной одежды;

расчет осушения верха земляного полотна и дорожной одежды.

В соответствии с ОДН 218.046—01 при проектировании дорожных одежд нежесткого типа в качестве расчетных принимают следующие

предельные нагрузки на ось расчетного двухосного автомобиля (табл. 24.1).

Т а б л и ц а 24.1. Предельные нагрузки на ось расчетного двухосного автомобиля

Группа расчетной нагрузки	Нормативная статическая нагрузка на ось, кН	Нормативная статическая нагрузка на поверхность покрытия от колеса расчетного автомобиля, $Q_{расч}$, кН	Расчетные параметры нагрузки	
			Давление пневматика на покрытие p , МПа	Эквивалентный диаметр отпечатка D , см
A_1	100	50	0,60	37/33
A_2	110	55	0,60	39/34
A_3	130	65	0,60	42/37

Примечания: 1. В числителе — диаметр отпечатка для движущегося колеса, в знаменателе — для неподвижного. 2. Постановлением Госстроя России № 132 от 30.06.2003 г. для дорог I и II категорий введена нормативная нагрузка на ось 115 кН.

Данные о нагрузках, передаваемых на дорожное покрытие выпускаемыми серийно автотранспортными средствами, принимают по специальным справочникам.

Поскольку фактическая расчетная интенсивность движения на дорогах представлена автомобилями различных марок с разными нагрузками на оси, для прочностных расчетов дорожных одежд фактическую интенсивность движения приводят к расчетной нагрузке группы A_1 введением суммарного коэффициента приведения $S_{т сум}$ по данным табл. 24.2.

Т а б л и ц а 24.2. Коэффициенты приведения к расчетной нагрузке

Типы автомобилей	Коэффициент приведения к расчетной нагрузке $S_{т сум}$
Легкие грузовые автомобили грузоподъемностью от 1 до 2 т	0,005
Средние грузовые автомобили грузоподъемностью от 2 до 5 т	0,2
Тяжелые грузовые автомобили грузоподъемностью от 5 до 8 т	0,7
Очень тяжелые грузовые автомобили грузоподъемностью более 8 т	1,25
Автобусы	0,7
Тягачи с прицепами	1,5

Расчет дорожных одежд на перегонных участках ведут на кратковременное (динамическое) и многократное действие подвижной на-

грузки. Продолжительность действия нагрузки для средних условий, современных скоростей автомобилей и размеров отпечатка колеса принимают равной 0,1 с. В этом случае значения модулей упругости и прочностных характеристик материалов и грунта также соответствуют длительности действия нагрузки 0,1 с.

На стоянках дорожную одежду рассчитывают на длительное однократное нагружение. В случае длительного действия нагрузки в расчет принимают значения модулей упругости материалов и грунтов и их прочностные характеристики, соответствующие продолжительности нагружения более 10 мин.

Суммарное расчетное число приложений расчетной нагрузки в точке на поверхности дорожной конструкции за расчетный срок службы принимают по формуле:

$$\sum N_p = f_{\text{пол}} \sum_{m=1}^n (N_{im} K_c T_{\text{рдг}} 0,7) S_{m \text{ сум}} k_n, \quad (24.1)$$

где $f_{\text{пол}}$ — коэффициент, учитывающий число полос движения и распределение движения по ним, определяемый по табл. 24.3; n — число марок автомобилей в расчетном транспортном потоке; N_{im} — суточная интенсивность движения автомобилей m -й марки в первый год службы (в обоих направлениях), авт/сут; $T_{\text{рдг}}$ — расчетное число дней в году, соответствующих определенному состоянию деформируемости конструкции, определяемое по табл. 24.4 и рис. 24.3; k_n — коэффициент, учитывающий вероятность отклонения суммарного движения от среднего ожидаемого (табл. 24.5); K_c — коэффициент суммирования (табл. 24.6); $T_{\text{сл}}$ — расчетный срок службы (табл. 24.7);

Т а б л и ц а 24.3. Значения коэффициента $f_{\text{пол}}$

Число полос движения	Значение коэффициента $f_{\text{пол}}$ для полосы с номером от обочины		
	1	2	3
1	1,00	—	—
2	0,55	—	—
3	0,50	0,50	—
4	0,35	0,20	—
6	0,30	0,20	0,05

П р и м е ч а н и е. Порядковый номер полосы считается справа по ходу движения в одном направлении. Для расчета обочин принимают $f_{\text{пол}} = 0,01$.

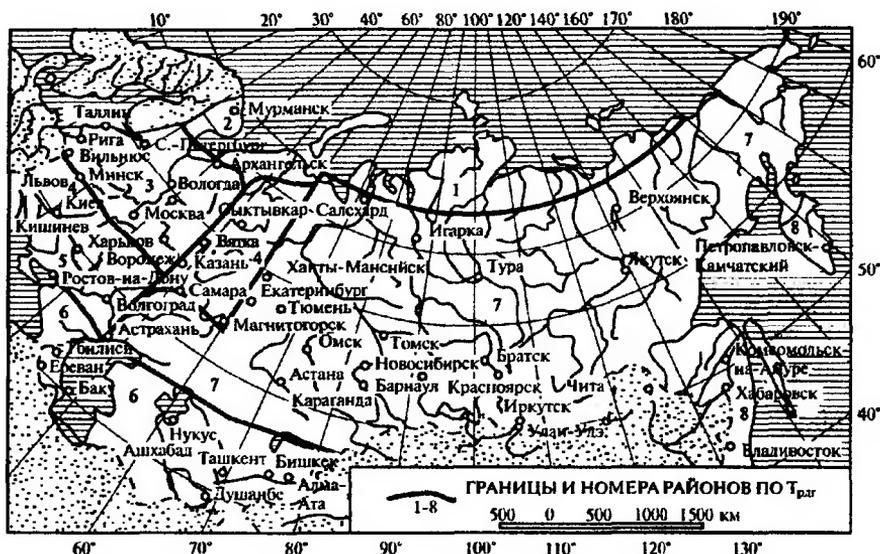


Рис. 24.3. Карта районирования по количеству расчетных дней в году, $T_{рлг}$

Таблица 24.4. Рекомендуемые значения $T_{рлг}$ в зависимости от местоположения дороги

Номера районов на карте	Примерные географические границы районов	Рекомендуемое количество расчетных дней* в году ($T_{рлг}$)
1	Зона распространения вечномёрзлых грунтов севернее семидесятой параллели	70
2	Севернее линии, соединяющей Онегу—Архангельск—Мезень—Нарьян-Мар — шестидесятый меридиан — до побережья Европейской части	145
3	Севернее линии, соединяющей Минск—Смоленск—Калугу—Рязань—Саранск — сорок восьмой меридиан — до линии, соединяющей Онегу—Архангельск—Мезень—Нарьян-Мар	125
4	Севернее линии, соединяющей Львов—Киев—Белгород—Воронеж—Саратов—Самару—Оренбург — шестидесятый меридиан до линии районов 2 и 3	135
5	Севернее линии, соединяющей Ростов-на-Дону—Элисту—Астрахань до линии Львов—Киев—Белгород—Воронеж—Саратов—Самара	145
6	Южнее линии Ростов-на-Дону—Элиста—Астрахань для Европейской части, южнее сорок шестой параллели для остальных территорий	205

Номера районов на карте	Примерные географические границы районов	Рекомендуемое количество расчетных дней* в году ($T_{\text{рлг}}$)
7	Восточная и Западная Сибирь, Дальний Восток (кроме Хабаровского и Приморского краев, Камчатской области), ограниченные с севера семидесятой параллелью, с юга сорок шестой параллелью	130—150 (меньшие значения для центральной части)
8	Хабаровский и Приморский края. Камчатская область	140

Примечание. *Значения величины $T_{\text{рлг}}$ на границах районов следует принимать по наибольшему из значений.

Таблица 24.5. Значения коэффициента k_n

Тип дорожной одежды	Значения коэффициента k_n для дорог различных категорий				
	I	II	III	IV	V
Капитальный	1,49	1,49	1,38	1,31	—
Облегченный	—	1,47	1,32	1,26	1,06
Переходный	—	—	1,19	1,16	1,04

Таблица 24.6. Рекомендуемые значения коэффициента суммирования K_c

Показатель изменения интенсивности движения по годам, q	Значение K_c при сроке службы дорожной одежды $T_{\text{сл}}$, в годах			
	8	10	15	20
0,90	5,7	6,5	7,9	8,8
0,92	6,1	7,1	8,9	10,1
0,94	6,5	7,7	10,0	11,8
0,96	7,0	8,4	11,4	13,9
0,98	7,5	9,1	13,1	16,6
1,00	8,0	10,0	15,0	20,0
1,02	8,6	10,9	17,2	24,4
1,04	9,2	12,0	20,0	29,8
1,06	9,9	13,2	23,2	36,0
1,08	10,6	14,5	27,2	45,8
1,10	11,4	15,9	31,7	67,3

Расчетным считается день, в течение которого сочетание состояния грунта земляного полотна по влажности и температуре асфальтобетонных слоев конструкции обеспечивают возможность накопления остаточных деформаций в грунте земляного полотна или мало-связных слоях дорожной одежды.

При отсутствии региональных норм расчетный срок службы дорожной одежды допускается назначить в соответствии с рекомендациями табл. 24.7.

Т а б л и ц а 24.7. Рекомендуемый расчетный срок службы дорожной конструкции

Категория дороги	Тип дорожной одежды	Срок службы в дорожно-климатических зонах $T_{ср}$, лет		
		I, II	III	IV, V
I	Капитальные	14—15—18	15—19	16—20
II	Капитальные	11—15	12—16	13—16
III	Капитальные	11—15	12—16	13—16
IV	Облегченные	10—13	11—14	12—15
	Капитальные	11—15	12—16	13—16
V	Облегченные	8—10	9—11	10—12
	Облегченные переходные	3—8	3—9	3—9

П р и м е ч а н и е. Значение коэффициента суммирования (при отсутствии других данных) следует принимать по табл. 24.6.

24.2. Расчеты нежестких дорожных одежд на прочность

Под прочностью нежесткой дорожной одежды понимают способность ее сопротивляться процессу развития остаточных деформаций и разрушений под воздействием касательных и нормальных напряжений, возникающих в конструктивных слоях и подстилающем грунте от расчетной нагрузки (кратковременной многократной или длительной однократной), приложенной к поверхности покрытия. Расчет на прочность включает проверку прочности конструкции в целом (по величине возникающего в ней упругого прогиба) и прочности отдельных конструктивных слоев (по величинам возникающих в них напряжений).

В соответствии с ОДН 218.046—01 нежесткую дорожную одежду следует проектировать с требуемым уровнем надежности, под которой понимают вероятность безотказной работы в течение межремонтного срока. Отказ конструкции по прочности характеризуется образова-

нием продольных и поперечных неровностей поверхности дорожной одежды, связанных с недостаточной прочностью конструкции (поперечные неровности, колейность, усталостные трещины), с последующим развитием других видов разрушений (частые трещины, сетка трещин, выбоины, просадки, проломы и т.д.).

В качестве количественного показателя отказа дорожных одежд используют *предельный коэффициент разрушения* K_p^{np} , представляющий собой отношение суммарной протяженности (или суммарной площади) участков дороги, требующих ремонта из-за недостаточной прочности конструкции, к общей протяженности (или общей площади) дороги между соответствующими пунктами.

Прочность нежесткой дорожной одежды количественно оценивают величиной *требуемого коэффициента прочности* $K_{np}^{тр}$. При оценке прочности конструкции дорожной одежды в целом по допускаемому упругому прогибу коэффициент прочности в общем виде определяют по формуле:

$$K_{np} = \frac{l_{доп}}{l} = \frac{E_{общ}}{E_{общ}^{тр}}$$

При оценке прочности отдельных конструктивных слоев по допускаемым напряжениям коэффициент прочности определяют по формуле:

$$K_{np} = \frac{\sigma_{доп}}{\sigma_{расч}},$$

где $l_{доп}$ — допустимый общий прогиб конструкции дорожной одежды под расчетной нагрузкой; l — общий прогиб конструкции дорожной одежды под расчетной нагрузкой; $\sigma_{доп}$ — допустимые напряжения (нормальные или касательные) от расчетной нагрузки; $\sigma_{расч}$ — действующие напряжения (нормальные или касательные) от расчетной нагрузки; $E_{общ}$ — расчетный общий модуль упругости конструкции дорожной одежды, определяемый при расчетной нагрузке; $E_{общ}^{тр}$ — требуемый общий модуль упругости конструкции дорожной одежды, определяемый при расчетной нагрузке.

Значения коэффициентов K_p^{np} и $K_{np}^{тр}$ на последний год службы перед очередным капитальным ремонтом в зависимости от типа дорожной одежды, категории дороги и заданного уровня надежности определяют по табл. 24.8.

Т а б л и ц а 24.8. Требуемые минимальные коэффициенты прочности при заданных уровнях надежности для расчета дорожных одежд по различным критериям прочности

Тип дорожной одежды		Капитальный												
		I			II			III			IV			
Категория дороги		0,10												
Предельный коэффициент разрушения K_{pr}		0,05												
Заданная надежность K_n	Требуемый коэффициент прочности $K_{пр}$ по критерию	0,98	0,95	0,98	0,95	0,98	0,95	0,98	0,95	0,98	0,95	0,98	0,95	0,98
		1,50	1,30	1,38	1,20	1,29	1,17	1,10	1,10	1,00	0,94	1,00	0,94	0,90
		1,10	1,00	1,10	1,00	1,10	1,00	1,10	1,00	0,94	1,00	0,94	0,90	0,87

Продолжение табл. 24.8

Тип дорожной одежды		Облегченный													
		III			IV			V							
Категория дороги		0,15													
Предельный коэффициент разрушения		0,15													
Заданная надежность K_n	Требуемый коэффициент прочности $K_{пр}$ по критерию	0,98	0,95	0,90	0,95	0,90	0,85	0,90	0,85	0,80	0,85	0,80	0,95	0,90	0,80
		1,29	1,17	1,10	1,17	1,10	1,06	1,02	1,06	1,02	1,06	1,02	1,13	1,06	0,98
		1,10	1,00	0,94	1,00	0,94	0,90	0,94	0,90	0,87	0,90	0,87	1,00	0,94	0,87

Тип дорожной одежды	Переходный								
	IV			V					
Категория дороги									
Предельный коэффициент разрушения $K_p^{пр}$	0,40								
Заданная надежность K_n	0,95	0,90	0,85	0,80	0,95	0,90	0,80	0,70	
Требуемый коэффициент прочности $K_{пр}$ по критерию	упругого прогиба	1,17	1,10	1,06	1,02	1,13	1,06	0,98	0,99
		сдвига и растяжения при изгибе	1,00	0,94	0,90	0,87	1,00	0,94	0,87

П р и м е ч а н и е. Дорожные одежды переходного типа для дорог V категории по критерию растяжения при изгибе не рассчитываются.

Требуемый коэффициент прочности $K_{пр}^{тр}$ вновь проектируемой дорожной конструкции должен быть таким, чтобы в течение заданного межремонтного срока вероятность наступления отказа по прочности не превышала допустимого уровня, т.е. чтобы была обеспечена требуемая надежность.

Для обеспечения заданной надежности (обеспеченности по прочности) требуемый коэффициент прочности $K_{пр}^{тр}$ проектируемой конструкции по каждому из расчетных критериев не должен быть ниже некоторого минимального значения, нормируемого табл. 24.8. Основной задачей прочностных расчетов является определение необходимых толщин конструктивных слоев одежды для вариантов, намеченных при конструировании, или выбор материалов с соответствующими деформационными и прочностными характеристиками при заданных толщинах конструктивных слоев.

Отказ дорожной одежды, связанный с недостаточной ее прочностью, может возникнуть в результате накопления недопустимых остаточных деформаций до истечения заданного межремонтного срока службы конструкции под воздействием касательных напряжений, возникающих в конструктивных слоях и подстилающем грунте от транспортных нагрузок, с потерей ровности поверхности покрытия и соответствующим снижением скоростей и безопасности движения, а также в результате усталостных разрушений монолитных слоев конструкции под воздействием растягивающих напряжений от многократного приложения транспортных нагрузок с последующей интенсивной потерей дорожной одеждой требуемых транспортно-эксплуатационных свойств до истечения заданного срока службы.

В соответствии с этим расчет прочности дорожной конструкции в целом ведут по допустимому упругому прогибу или требуемому общему модулю упругости дорожной одежды, а расчеты на прочность отдельных конструктивных слоев выполняют по допускаемым напряжениям на сдвиг в слоях с пониженной сопротивляемостью сдвигу и на растяжение при изгибе в монолитных слоях.

24.3. Расчет нежестких дорожных одежд по допускаемому упругому прогибу

Конструкция нежесткой дорожной одежды в целом удовлетворяет требованиям прочности и надежности по величине упругого прогиба при условии:

$$E_{\text{общ}} \geq E_{\text{мин}} K_{\text{пр}}^{\text{тп}}, \quad (24.2)$$

где $E_{\text{общ}}$ — общий расчетный модуль упругости конструкции, МПа; $E_{\text{мин}}$ — минимальный требуемый общий модуль упругости конструкции, МПа; $K_{\text{пр}}^{\text{тп}}$ — требуемый коэффициент прочности дорожной одежды по критерию упругого прогиба, принимаемый в зависимости от требуемого уровня надежности (см. табл. 24.8).

Величину минимального требуемого общего модуля упругости конструкции вычисляют по формуле:

$$E_{\text{мин}} = 98,65 [\lg(\sum N_p) - c], \quad \text{МПа}, \quad (24.3)$$

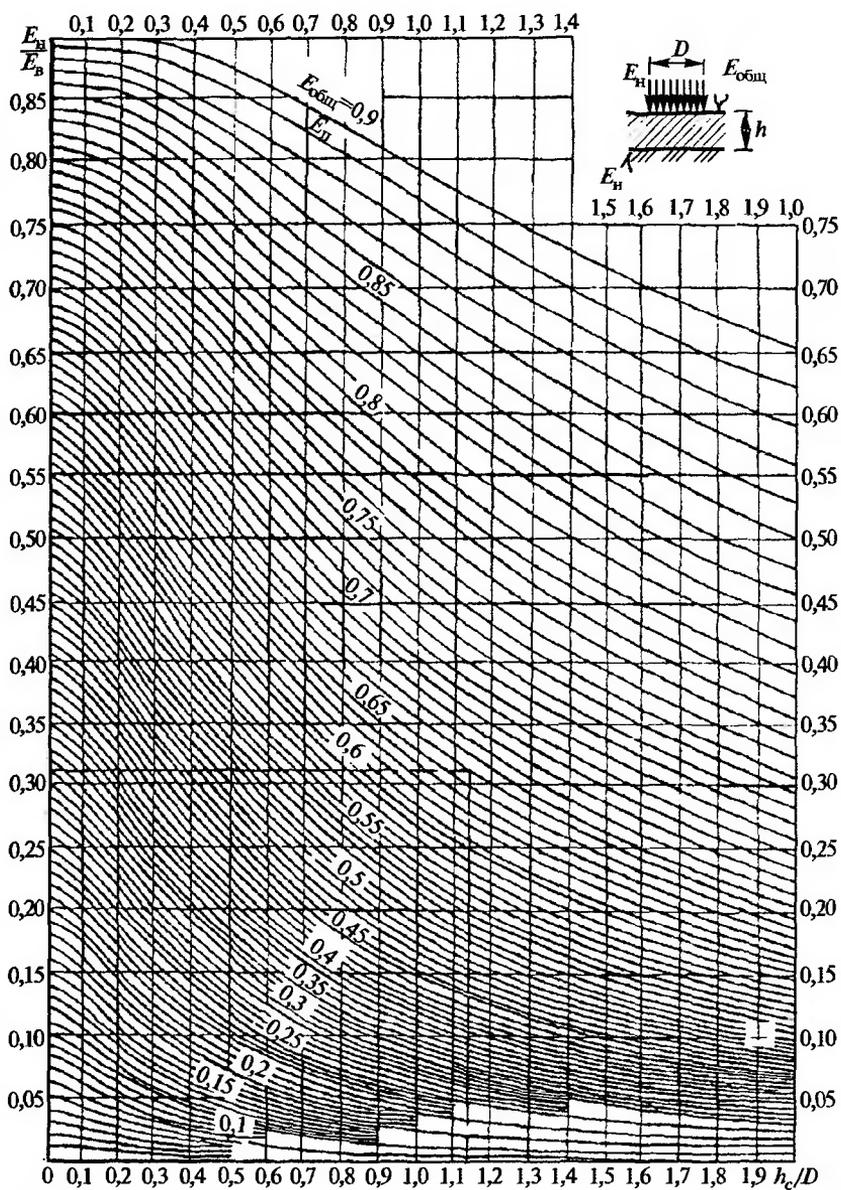
где $\sum N_p$ — суммарное расчетное число приложений нагрузки за расчетный срок службы дорожной одежды, устанавливаемое по формуле (24.1); c — эмпирический параметр, принимаемый равным для расчетной нагрузки на ось 100 кН — 3,55; 110 кН — 3,25; 130 кН — 3,05.

Формулой (24.1) следует пользоваться при $\sum N_p > 4 \cdot 10^4$. Для дорог в V дорожно-климатической зоне минимальный требуемый модуль упругости, определенный по формуле (24.3), следует уменьшить на 15%. Независимо от результата, полученного по формуле (24.3), минимальный требуемый модуль упругости должен быть не менее указанного в табл. 24.9.

Т а б л и ц а 24.9. Минимальные значения требуемого модуля упругости

Категория дороги	Суммарное расчетное число приложений нагрузки на наиболее нагруженную полосу	Минимальный требуемый модуль упругости дорожной одежды, МПа		
		Тип дорожной одежды		
		Капитальной	Облегченной	Переходной
I	750 000	230	—	—
II	500 000	220	210	—
III	375 000	200	200	—
IV	110 000	—	150	100
V	40 000	—	100	50

Общий расчетный модуль упругости проектируемой конструкции дорожной одежды определяют с помощью номограммы (рис. 24.4), построенной на основе решения задачи теории упругости двухслойной системы по формуле Е. Барбера для двухслойного полупространства:



Р и с. 24.4. Номограмма для определения общего модуля упругости двухслойной системы $E_{общ}$

$$E_i^{(э)} = \frac{1,05 E_i}{1 + \frac{E_i}{E_{i-1}} + \sqrt{1 + 4 \frac{h_i}{D} \left(\frac{E_i}{E_{i-1}} \right)^{2/3}}} + 1, \quad (24.4)$$

где $E_i^{(э)}$ — эквивалентный модуль упругости на поверхности i -го конструктивного слоя, МПа; E_{i-1} — то же, на поверхности $(i - 1)$ -го слоя дорожной одежды, МПа; E_i — модуль упругости материала i -го конструктивного слоя, МПа; h_i — толщина i -го конструктивного слоя, см; D — расчетный диаметр следа автомобиля, см.

При автоматизированных оптимизационных расчетах уравнение (24.4) решают последовательно для каждой пары конструктивных слоев, начиная с грунтового основания, снизу вверх. Именно поэтому в уравнении (24.4) нумерация конструктивных слоев дорожной конструкции принята снизу вверх и грунтовое основание имеет 0-й номер с модулем упругости E_0 . При традиционном (неавтоматизированном) проектировании послойные расчеты, наоборот, ведут сверху вниз.

Приведение многослойной конструкции к эквивалентной однослойной ведут послойно снизу вверх, начиная с подстилающего грунта.

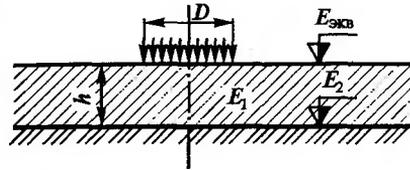
Расчетные значения модулей упругости грунтов принимают в соответствии с данными табл. 23.5 в зависимости от расчетной влажности грунта рабочего слоя, определяемой по табл. 23.4.

Задача традиционного расчета нежесткой дорожной одежды сводится к тому, что при априори установленной конструкции (в зависимости от категории дороги, требуемого модуля упругости одежды, наличия местных и привозных фондируемых материалов, сроков строительства, технической оснащенности подрядных строительных организаций и т.д.), выполняя послойный расчет сверху вниз, по известным толщинам и модулям упругости материалов назначенных конструктивных слоев определяют необходимую толщину дополнительного слоя основания.

Порядок традиционного расчета дорожной конструкции по допускаемому упругому прогибу с использованием уравнения (24.4) или номограммы (рис. 24.4) следующий:

в зависимости от расчетного числа приложения нагрузки за расчетный срок службы конструкции по формуле (24.3) определяют минимальный модуль упругости дорожной одежды E_{\min} с учетом задан-

Р и с. 24.5. Схема к послойному расчету конструкции нежесткой дорожной одежды



ного уровня надежности и соответствующего ему коэффициента прочности по формуле (24.2) устанавливают общий требуемый модуль упругости $E_{\text{общ}}$;

общую толщину верхних конструктивных слоев, содержащих органические вяжущие, предварительно назначают в пределах:

- при $E_{\text{общ}} = 250\text{--}300$ МПа от 0,13 до 0,16 м;
- » $E_{\text{общ}} = 220\text{--}250$ МПа от 0,10 до 0,13 м;
- » $E_{\text{общ}} = 180\text{--}220$ МПа от 0,08 до 0,10 м;
- » $E_{\text{общ}} = 125\text{--}180$ МПа от 0,06 до 0,08 м;
- » $E_{\text{общ}} < 125$ МПа от 0,04 до 0,06 м.

Часто для назначения толщин верхних конструктивных слоев дорожных одежд используют типовые проектные решения;

проводя послойные расчеты сверху вниз по номограмме на рис. 24.4, определяют эквивалентный модуль упругости на поверхности $(i - 1)$ -го, т.е. 2-го от поверхности покрытия слоя $E_{i-1}^{(3)}$ (рис. 24.5) (при

этом, вычислив $\frac{E_{\text{общ}}}{E_i}$ и $\frac{h_i}{D}$, по номограмме 24.4 определяют $\frac{E_{i-1}^{(3)}}{E_i}$ и считают $E_{i-1}^{(3)}$);

аналогичным образом последовательно производят послойные расчеты нижележащих конструктивных слоев сверху вниз и определяют модуль упругости на поверхности дополнительного слоя основания $E_1^{(3)}$, т.е. 1-го снизу конструктивного слоя;

определив отношение модуля упругости грунтового основания E_0 к модулю упругости материала дополнительного слоя основания E_1 , т.е. $\frac{E_0}{E_1} = \frac{E_{i-1}}{E_i}$, и отношение $\frac{E_1^{(3)}}{E_1} = \frac{E_{\text{общ}}}{E_1}$, по номограмме 24.4 устанавли-

вают величину $\frac{h_1}{D}$ для дополнительного слоя основания и вычисля-

ют его необходимую толщину $h_1 = \left(\frac{h_1}{D}\right)D$. Минимальную толщину до-

полнительного слоя основания принимают не менее чем по табл. 24.10.

Таблица 24.10. Минимальная толщина дополнительного слоя основания из песка

Грунт земляного полотна	Увлажнение местности		
	избыточное	нормальное	недостаточное
Мелкие пески	0,10	0,10	—
Супесь мелкая	0,15	0,12	0,10
Суглинки тяжелые и глины	0,25	0,20	0,15
Пылеватые суглинки и пылеватые грунты	0,30	0,20	0,15

При автоматизированных оптимизационных расчетах конструкций нежестких дорожных одежд вычисления с использованием уравнения (24.4) ведут последовательно для каждой пары конструктивных слоев снизу вверх, начиная с грунтового основания, с вычислением общего модуля дорожной одежды $E_{\text{общ}}$.

Определив минимальную толщину дополнительного слоя основания по допускаемому упругому прогибу, ее корректируют по условиям обеспечения морозоустойчивости и осушения верха земляного полотна и дорожной одежды (см. § 24.6, 24.7).

24.4. Расчет несвязных конструктивных слоев и подстилающего грунта на устойчивость против сдвига

Дорожную одежду необходимо проектировать таким образом, чтобы под действием кратковременных и длительных нагрузок в подстилающем грунте или малосвязных конструктивных слоях в течение расчетного срока службы между капитальными ремонтами не происходило накапливания недопустимых остаточных деформаций. Недопустимые деформации сдвига в конструкции не будут накапливаться, если в грунте земляного полотна и в малосвязных конструктивных слоях обеспечено условие:

$$T \leq \frac{T_{\text{пр}}}{K_{\text{пр}}}, \quad (24.5)$$

где T — расчетное активное напряжение сдвига (часть сдвигающего напряжения, непогашенная силами внутреннего трения) в расчетной

(наиболее опасной) точке конструкции от действующей временной нагрузки; $T_{пр}$ — предельная величина активного напряжения сдвига (в той же точке), превышение которой вызывает нарушение прочности конструкции на сдвиг; $K_{пр}^{тп}$ — требуемое минимальное значение коэффициента прочности, определяемое с учетом заданного уровня надежности (см. табл. 24.8).

При практических расчетах на сдвиг (аналогично расчетам на допускаемый упругий прогиб) многослойную дорожную конструкцию приводят к двухслойной расчетной модели. При расчете дорожной одежды на прочность по сдвигоустойчивости грунта земляного полотна в качестве нижнего слоя принимают грунтовое основание (с его прочностными характеристиками), а в качестве верхнего — всю вышележащую дорожную конструкцию. Толщину верхнего слоя h_b принимают равной сумме толщин слоев одежды $\left(\sum_{i=1}^n h_i \right)$. Модуль упругости верхнего слоя двухслойной модели вычисляют как средневзвешенный по формуле:

$$E_b = \frac{\sum_{i=1}^n E_i h_i}{\sum_{i=1}^n h_i}, \quad (24.6)$$

где n — число слоев дорожной одежды; E_i — модуль упругости материала i -го конструктивного слоя; h_i — толщина i -го слоя.

При расчетах по условию сдвигоустойчивости в песчаном дополнительном слое основания с помощью номограммы (см. рис. 24.4) нижнему слою двухслойной модели условно присваивают обычные характеристики песчаного слоя (c_1 , ϕ_1), а модуль упругости принимают равным эквивалентному модулю упругости на поверхности дополнительного слоя основания E_1 ; толщину верхнего слоя двухслойной модели принимают равной общей толщине конструктивных слоев, лежащих над песчаным дополнительным слоем основания, а модуль упругости E_b вычисляют как средневзвешенное значение для этих слоев по формуле (24.6).

При расчете дорожных одежд по условию сдвигоустойчивости значения модулей упругости материалов, содержащих органическое вяжущее, принимают соответствующими температурам, указанным в табл. 24.11, для соответствующих дорожно-климатических зон (см. рис. 23.6).

Т а б л и ц а 24.11. Расчетные значения температур
для дорожно-климатических зон

Дорожно-климатические зоны	I—II	III	IV	V
Расчетная температура, °С	+20	+30	+40	+50

Действующие в грунте или в песчаном слое активные напряжения сдвига (T) вычисляют по формуле:

$$T = \bar{\tau}_n p, \quad (24.7)$$

где $\bar{\tau}_n$ — удельное активное напряжение сдвига от единичной нагрузки, определяемое с помощью номограмм (рис. 24.6 и 24.7); p — расчетное давление от колеса на покрытие.

При пользовании номограммой для определения $\bar{\tau}_n$ величину φ принимают для случая воздействия динамической нагрузки (с учетом числа приложений) (см. табл. 23.13 и 23.14).

Предельное активное напряжение сдвига $T_{пр}$ в грунте рабочего слоя (или в песчаном материале промежуточного слоя) определяют по формуле:

$$T_{пр} = K_d (c_N + 0,1\gamma_{ср} z_{оп} \operatorname{tg} \varphi_{ст}), \quad (24.8)$$

где c_N — сцепление в грунте земляного полотна (или в промежуточном песчаном слое), принимаемое с учетом расчетного числа приложения нагрузки (см. табл. 23.13 или 23.14), МПа; $z_{оп}$ — глубина расположения поверхности слоя, проверяемого на сдвигустойчивость, от верха конструкции, см; $\gamma_{ср}$ — средневзвешенный удельный вес конструктивных слоев, расположенных выше проверяемого слоя, кг/см³; $\varphi_{ст}$ — расчетная величина угла внутреннего трения материала проверяемого слоя при статическом действии нагрузки, град; K_d — коэффициент, учитывающий особенности работы конструкции на границе песчаного слоя с нижним слоем несущего основания.

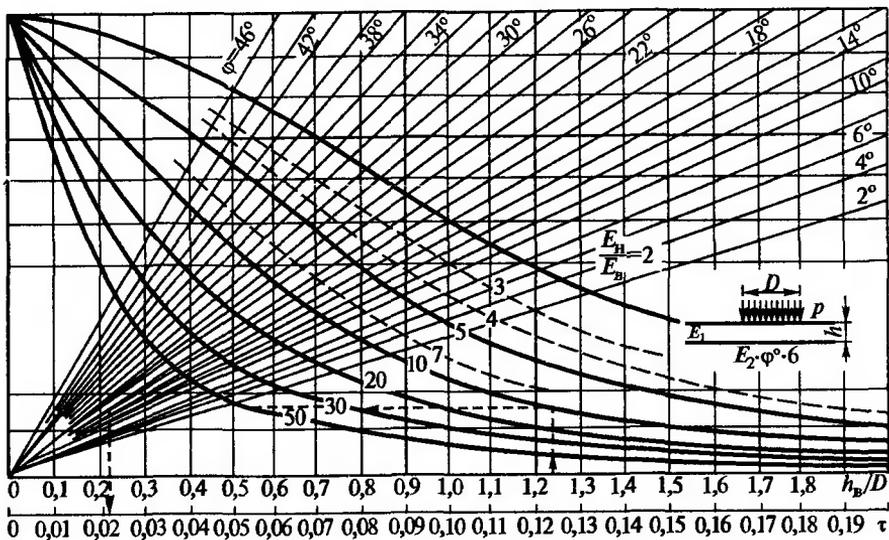
При устройстве нижнего слоя несущего основания из укрепленных материалов или при укладке на границе «несущее основание — песчаный слой (или песчаный грунт)» разделяющей геотекстильной прослойки следует принимать значение K_d , равным:

$K_d = 4,5$ — при использовании в песчаном слое крупного песка;

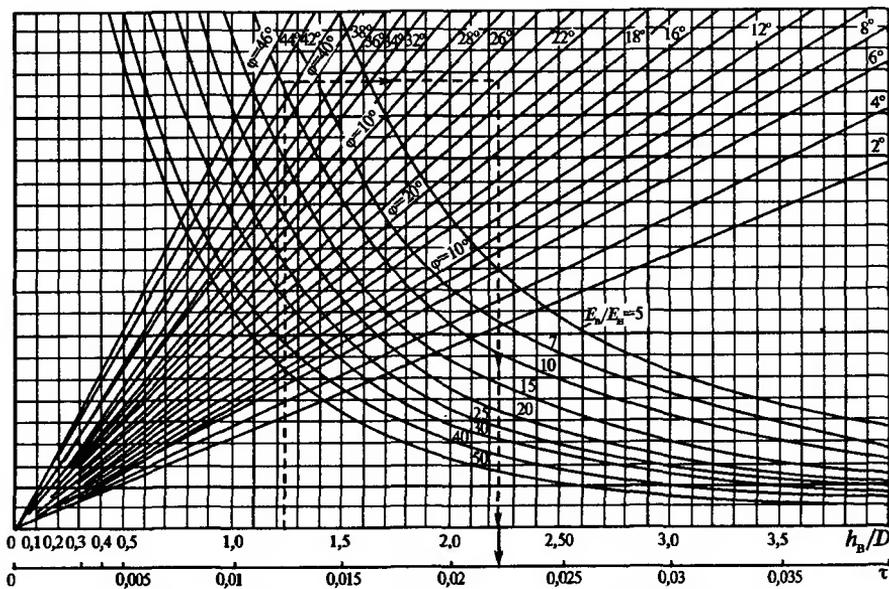
$K_d = 4,0$ — песка средней крупности;

$K_d = 3,0$ — мелкого песка.

При устройстве нижнего слоя несущего основания из неукрепленных материалов и без укладки разделительной прослойки следует принимать $K_d = 2$.



Р и с. 24.6. Номограмма для определения активного напряжения сдвига от временной нагрузки в нижнем слое двухслойной системы (при $\frac{h_b}{D} = 0 \div 2,0$)



Р и с. 24.7. Номограмма для определения активного напряжения сдвига от временной нагрузки в нижнем слое двухслойной системы (при $\frac{h_b}{D} = 0 \div 4,0$)

При проверке сдвигоустойчивости в подстилающем дорожную одежду глинистом грунте земляного полотна следует принимать $K_d = 1$.

В качестве расчетных значений угла внутреннего трения грунта и малосвязных слоев используют его значения, отвечающие расчетному суммарному числу воздействия нагрузки за межремонтный срок ΣN_p . Эту величину устанавливают по формуле (24.1).

Входящую в формулу (24.1) величину расчетных дней в году, соответствующих расчетному состоянию прочности и деформируемости конструкции, определяют по данным рис. 23.6 и табл. 24.4.

Расчет дорожной одежды по сопротивлению сдвигу в грунте земляного полотна, а также в песчаных материалах промежуточных слоев дорожной одежды ведут в следующей последовательности:

по табл. 23.6—23.14 назначают расчетные модули упругости для слоев и асфальтобетона, соответствующие максимально возможному температурам в ранний весенний (расчетный) период;

по табл. 23.13 и 23.14 (с учетом расчетной влажности и общего числа воздействий нагрузки) назначают расчетные прочностные характеристики ϕ и c грунта земляного полотна и песка промежуточного слоя одежды;

по рис. 24.6 или 24.7 определяют активные напряжения сдвига $\bar{\tau}_n$ от единичной временной нагрузки. Для этого приводят многослойную конструкцию к двухслойной модели;

по формуле (24.7) вычисляют расчетное напряжение сдвига в грунте земляного полотна или в песчаном слое одежды;

по формуле (24.8) вычисляют предельное напряжение сдвига;

по формуле (24.5) проверяют выполнение условия прочности (с учетом требуемой надежности);

при необходимости, изменяя толщины конструктивных слоев, подбирают конструкцию, удовлетворяющую условию (24.5).

24.5. Расчет конструктивных материалов на сопротивление монолитных слоев усталостному разрушению от растяжения при изгибе

В монолитных слоях дорожной одежды (из асфальтобетона, материалов и грунтов, укрепленных комплексными и неорганическими вяжущими и т.д.), возникающие при изгибе одежды, растягивающие напряжения под действием повторных кратковременных нагрузок, не должны в течение заданного срока службы приводить к образова-

нию трещин от усталостного разрушения. Для этого должно быть выполнено условие:

$$\sigma_r \leq \frac{R_N}{K_{\text{пр}}^{\text{тр}}}, \quad (24.9)$$

где $K_{\text{пр}}^{\text{тр}}$ — требуемый коэффициент прочности с учетом заданного уровня надежности (см. табл. 24.8); R_N — прочность материала слоя на растяжение при изгибе с учетом усталостных явлений; σ_r — наибольшее растягивающее напряжение в рассматриваемом слое, устанавливаемое расчетом.

Наибольшее растягивающее напряжение σ_r при изгибе в монолитном слое определяют с помощью номограммы (рис. 24.8), приводя реальную конструкцию к двухслойной модели.

К верхнему монолитному слою модели относят все асфальтобетонные слои, включая рассчитываемый. Толщину верхнего слоя модели h_b принимают равной сумме толщин, входящих в пакет асфальтобетонных слоев (Σh_i).

Значение модуля упругости верхнего слоя двухслойной модели устанавливают как средневзвешенное для всего пакета асфальтобетонных слоев по формуле (24.6). Нижним слоем модели служит часть конструкции, расположенная ниже пакета асфальтобетонных слоев, включая грунт рабочего слоя земляного полотна.

Модуль упругости нижнего слоя двухслойной модели определяют путем приведения слоистой системы к эквивалентной по жесткости с помощью номограммы (см. рис. 24.4).

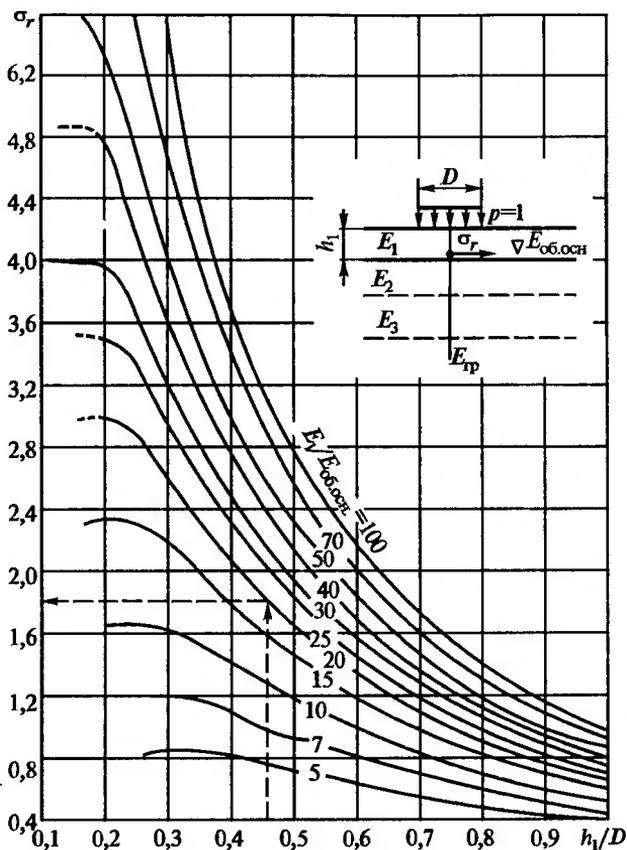
При использовании номограммы на рис. 24.8 расчетное растягивающее напряжение определяют по формуле:

$$\sigma_r = \bar{\sigma}_r p K_b, \quad (24.10)$$

где $\bar{\sigma}_r$ — растягивающее напряжение от единичной нагрузки при расчетных диаметрах площадки, передающей нагрузку, определяемое по номограмме на рис. 24.8; K_b — коэффициент, учитывающий особенности напряженного состояния покрытия при двухбаллонной конструкции колеса $K_b = 0,85$ (при расчете на однобаллонное колесо $K_b = 1,00$); p — расчетное давление, принимаемое по табл. 24.1.

Порядок использования показан на рис. 24.8 стрелками.

Прочность материала монолитного слоя при многократном растяжении при изгибе определяют по формуле:



Р и с. 24.8. Номограмма для определения растягивающего напряжения σ_r при изгибе в верхнем монолитном слое двухслойной системы

$$R_N = R_0 K_1 K_2 (1 - V_R t), \quad (24.11)$$

где R_0 — нормативное значение предельного сопротивления растяжению (прочность) при изгибе при расчетной низкой весенней температуре при однократном приложении нагрузки, принимаемое по данным табл. 23.12; K_1 — коэффициент, учитывающий снижение прочности вследствие усталостных явлений при многократном приложении нагрузки; K_2 — коэффициент, учитывающий снижение прочности во времени от воздействия погодных-климатических факторов (табл. 24.12); V_R — коэффициент вариации прочности на растяжение; t — коэффициент нормативного отклонения, принимаемый в зависимости от требуемого уровня надежности K_H :

K_1	0,70	0,75	0,80	0,85	0,90	0,95	0,98
t	0,52	0,68	0,84	1,06	1,32	1,71	2,19

Т а б л и ц а 24.12. Рекомендуемые коэффициенты снижения прочности от воздействия погоднo-климатических факторов

№ п/п	Материал расчетного слоя	K_2
1	Асфальтобетон: высокоплотный	1,0
2	Плотный: I марки II марки III марки	0,95 0,90 0,80
3	Пористый и высокопористый	0,80
4	Органоминеральные смеси	0,80

Коэффициент K_1 , отражающий влияние на прочность усталостных процессов, вычисляют по выражению:

$$K_1 = \frac{\alpha}{\sqrt[m]{\sum N_p}}$$

где N_p — расчетное суммарное число приложений расчетной нагрузки за срок службы монолитного покрытия, определяемое по формуле (24.1) с учетом числа расчетных суток за срок службы (см. табл. 24.7); m — показатель степени, зависящий от свойств материала рассчитываемого монолитного слоя (см. табл. 23.12); α — коэффициент, учитывающий различие в реальном и лабораторном режимах растяжения повторной нагрузкой, а также вероятность совпадения во времени расчетной (низкой) температуры покрытия и расчетного состояния грунта рабочего слоя по влажности, определяемый по табл. 23.12.

Рекомендуемое значение коэффициента вариации $V_R = 0,1$.

Расчеты на усталостную прочность выполняют в следующем порядке:

приводят конструкцию к двухслойной модели и определяют отношения $\frac{h}{D}$; $\frac{E_b}{E_{np}}$;

по полученным параметрам по номограмме на рис. 24.8 находят значение $\bar{\sigma}$, и по формуле (24.10) вычисляют расчетное растягивающее напряжение;

вычисляют предельное растягивающее напряжение по формуле (24.11). В пакете асфальтобетонных слоев за предельное растягивающее напряжение R_N принимают значение, отвечающее материалу нижнего слоя асфальтобетонного пакета;

проверяют условие (24.9) и при необходимости корректируют конструкцию.

24.6. Обеспечение морозоустойчивости дорожных одежд

В районах сезонного промерзания грунтов земляного полотна при неблагоприятных грунтовых, гидрогеологических и гидрологических условиях наряду с требуемой прочностью по трем рассмотренным выше критериям должна быть обеспечена необходимая морозоустойчивость дорожных одежд, предотвращающая недопустимое ее зимнее пучение (см. § 13.4).

С этой целью предусматривают различные специальные инженерные мероприятия:

использование непучинистых или слабопучинистых грунтов (табл. 24.13, 24.14) для сооружения верха земляного полотна, находящегося в зоне периодического промерзания и оттаивания;

осушение рабочего слоя земляного полотна с устройством в необходимых случаях дренажа для увеличения расстояния от низа дорожной конструкции до уровня грунтовых вод;

устройство гидроизолирующих или капилляропрерывающих прослоек для перехода от 2-й или 3-й схемы увлажнения рабочего слоя земляного полотна к 1-й схеме (см. § 13.4);

устройство морозозащитного слоя необходимой толщины из непучинистых минеральных материалов, в том числе укрепленных малыми дозами минеральных или органических вяжущих;

устройство теплоизолирующих слоев, позволяющих снизить глубину или полностью исключить промерзание грунта под дорожной одеждой;

устройство основания дорожной одежды из монолитных материалов (типа тощего бетона или зернистых материалов, обработанных минеральными или органическими вяжущими).

Конструкцию считают морозоустойчивой, если соблюдено условие

$$(I_{\text{пуч}} + I_{\text{мз}}) \leq I_{\text{доп}}, \quad (24.12)$$

где $I_{\text{пуч}}$ — расчетное (ожидаемое) пучение грунта земляного полотна; $I_{\text{мз}}$ — расчетное пучение материала морозозащитного слоя; $I_{\text{доп}}$ — допускаемое для данной конструкции пучение грунта.

Таблица 24.13. Классификация грунтов по степени пучинистости при замерзании (СНиП 2.05.02—85, прил. 2, табл. 6)

Группа грунтов по пучинистости	Степень пучинистости	Относительное морозное пучение $l_{пуч}$, %, при глубине промерзания 1,5 м
I	Непучинистый	1 и менее
II	Слабопучинистый	Свыше 1 до 4
III	Пучинистый	Свыше 4 до 7
IV	Сильнопучинистый	Свыше 7 до 10
V	Чрезмернопучинистый	Свыше 10

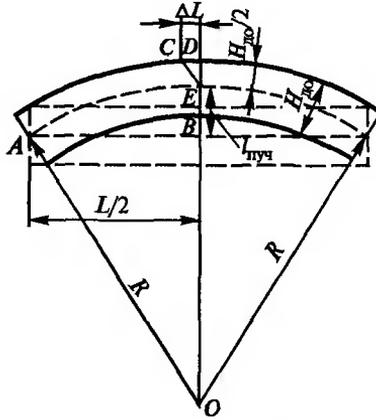
Таблица 24.14. Группы грунтов по степени пучинистости (СНиП 2.05.02—85, прил. 2, табл. 7)

Грунт	Группа
Песок гравелистый, крупный и средней крупности с содержанием частиц мельче 0,05 мм до 2%	I
Песок гравелистый, крупный и средней крупности с содержанием частиц мельче 0,05 мм до 15%; мелкий с содержанием частиц мельче 0,05 мм до 15%; супесь легкая крупная	II
Супесь легкая; суглинок легкий и тяжелый; глины	III
Песок пылеватый; супесь пылеватая; суглинок тяжелый пылеватый	IV
Супесь тяжелая пылеватая; суглинок легкий пылеватый	V

П р и м е ч а н и е. Величина коэффициента морозного пучения щебенистых, гравелистых, дресвяных песков при содержании частиц мельче 0,05 мм свыше 15% ориентировочно принимается как для пылеватого песка и проверяется в лаборатории.

Расчет на морозоустойчивость необходимо выполнять для характерных участков или групп характерных участков дороги, сходных по грунтовым, гидрогеологическим и гидрологическим условиям, имеющим одну и ту же конструкцию дорожной одежды и схему увлажнения рабочего слоя земляного полотна.

Величину допустимого неравномерного вспучивания дорожных одежд определяют согласно предложению проф. А.Я. Тулаева исходя из простейшего допущения, что участок вспучивания образует цилиндрическую поверхность. При допустимом удлинении материала



Р и с. 24.9. Схема к определению предельно допустимой величины коэффициента пучения

покрытия $\epsilon_{\text{доп}} = \frac{\Delta L}{L/2}$ можно определить минимальный радиус кривизны вспучивания R исходя из схемы, представленной на рис. 24.9:

$$\frac{\Delta L}{h_{\text{до}}/2} = \frac{L/2}{R - l_{\text{пуч}}},$$

откуда, учитывая, что $l_{\text{пуч}}$ несоизмеримо мало по сравнению с R , получим

$$R = \frac{h_{\text{до}}}{2\epsilon_{\text{доп}}},$$

где $h_{\text{до}}$ — толщина монолитных слоев дорожной одежды; $\epsilon_{\text{доп}} = 0,001$ — допустимое относительное удлинение для асфальтобетона.

Отсюда величину предельно допустимого неравномерного вспучивания покрытия можно определить:

$$l_{\text{доп}} = \frac{\epsilon_{\text{доп}}}{2h_{\text{до}}} \left(\frac{L}{m} \right)^2, \quad (24.13)$$

где m — коэффициент, учитывающий неравномерное вспучивание покрытия, которое захватывает только часть общей ширины проезжей части $\frac{L}{m}$.

По данным наблюдений, на пучинных станциях при благоприятных гидрогеологических условиях $m = 2$ и $m = 1,5$ при высоких уровнях залегания грунтовых вод и на участках дорог на косогорах. Допустимое неравномерное вспучивание для покрытий различных типов можно определять по табл. 24.15.

Таблица 24.15. Допустимые величины пучения

Тип дорожных одежд	Вид покрытия	Допустимая величина морозного пучения $l_{\text{доп}}$, см
Капитальные	Цементобетонное	3
Капитальные	Асфальтобетонное	4
Облегченные	Асфальтобетонное	6
Переходные	Переходное	10

Примечание. В восточных районах II—III дорожно-климатических зон значения $l_{\text{доп}}$ следует увеличивать на 20—40% (большие значения для облегченных и переходных дорожных одежд).

Облегченные конструкции дорожной одежды с усовершенствованными покрытиями при 1-м типе местности по условиям увлажнения на морозостойчивость не рассчитывают.

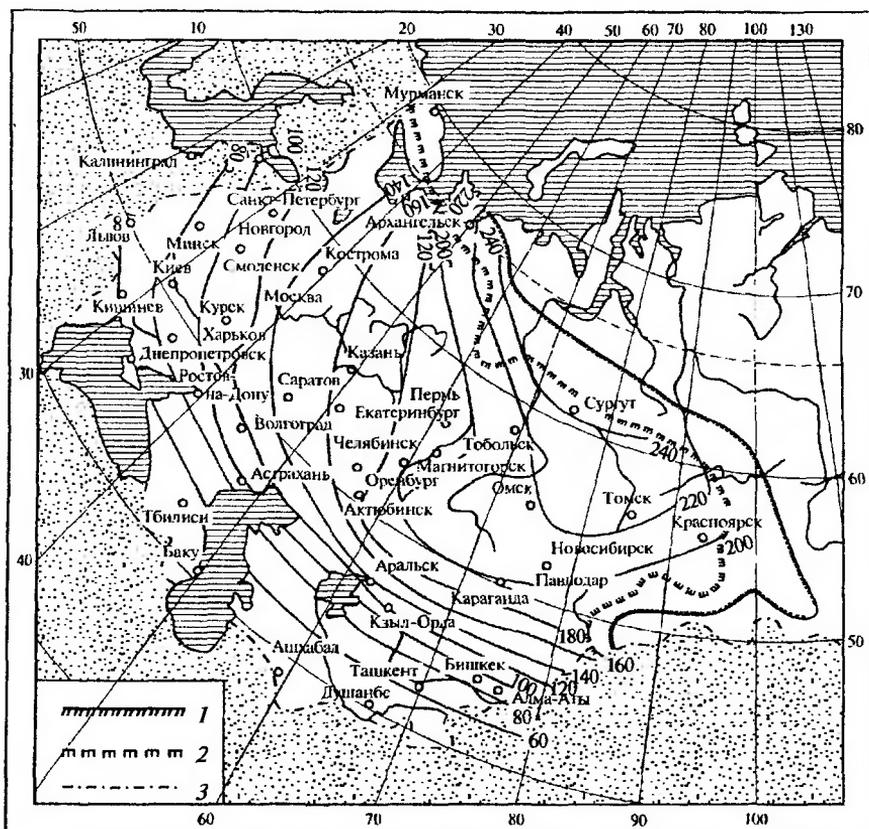
При 2-м типе местности по условиям увлажнения выполняют проверку только при пылеватых супесчаных подстилающих грунтах земляного полотна.

И наконец, для 3-го типа местности по увлажнению конструкцию, рассчитанную по рассмотренным выше трем критериям прочности, проверяют на морозостойчивость.

Величину расчетного пучения определяют на основе решения уравнения:

$$l_{\text{пуч}} = \frac{B(H - h_{\text{мз}})}{\alpha_0} \left\{ \left[\frac{2,8(z - h_{\text{мз}})}{H - h_{\text{мз}}} - 1 \right] e^{2,8 \left(\frac{z - h_{\text{мз}}}{H - h_{\text{мз}}} - 1 \right)} + e^{-2,8} \right\}, \quad (24.14)$$

где $h_{\text{мз}}$ — толщина морозостойчивой дорожной конструкции, включая дополнительный слой основания; z — расчетная глубина промерзания, определяемая по карте изолиний (рис. 24.10), с увеличением на 0,5 м за счет большего промерзания дорожной одежды, очищаемой



Р и с. 24.10. Карта изолиний глубины промерзания $z_{пр.ср}$ грунтов на территории РФ и стран СНГ:

1 — граница сплошного распространения вечномёрзлых грунтов; 2 — то же, островного; 3 — Северный полярный круг

от снега; H — глубина грунтовых вод, считая от оси проезжей части; B — комплексная характеристика свойств грунта, характеризующая степень пучинистости (табл. 24.16); α_0 — показатель, характеризующий режим и интенсивность промерзания, определяемый по карте изолиний (рис. 24.11).

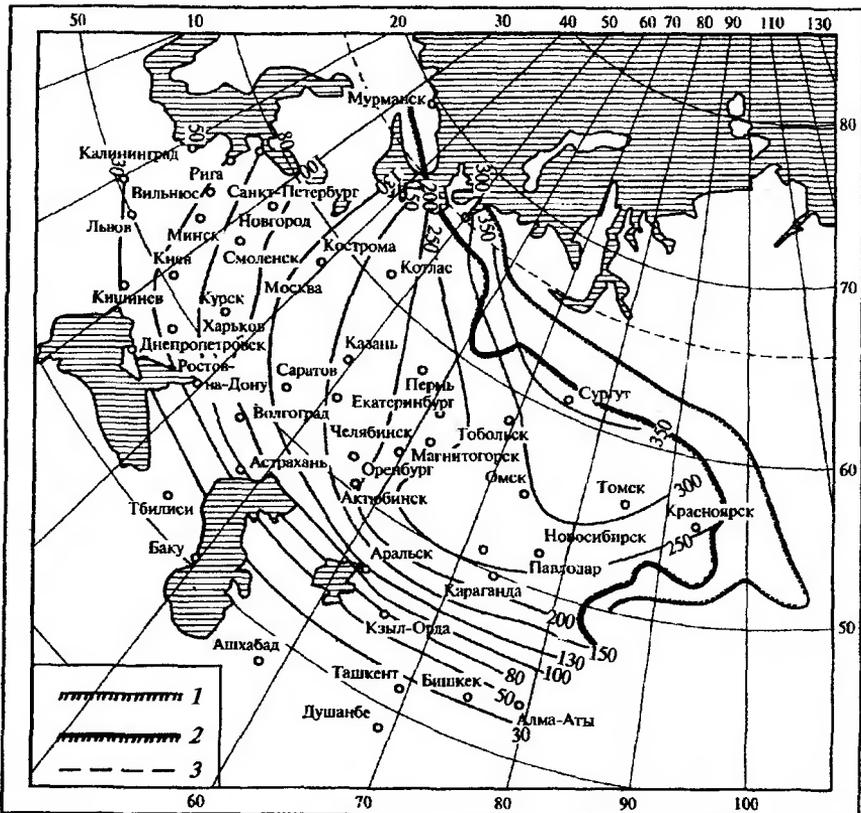
Уравнение (24.14) решают, последовательно увеличивая значение $h_{мз}$ с шагом $\Delta h = 0,01$ м до тех пор, пока не будет выполнено условие (24.12).

При 2-м типе местности по условию увлажнения необходимую толщину морозоустойчивой конструкции $h_{мз}$ определяют:

$$h_{мз} = z - \frac{100l_{доп}}{K_{пуч}}, \quad (24.15)$$

где $K_{пуч}$ — коэффициент пучения грунта, зависящий от рода грунта и определяемый испытанием образцов на морозное пучение, как отношение морозного пучения к первоначальной высоте образца, % (табл. 24.17).

Если общая необходимая толщина морозоустойчивой дорожной одежды (включая дополнительный слой основания) $h_{мз}$ превышает величину $h_{до}$, полученную расчетами на прочность, конструкцию корректируют и вновь выполняют расчеты по всем критериям прочности.



Р и с. 24.11. Карта изолиний коэффициента α_0 на территории РФ и стран СНГ: 1 — граница сплошного распространения вечномерзлых грунтов; 2 — то же, островного; 3 — Северный полярный круг

Таблица 24.16. Значения комплексной характеристики свойств грунтов *B*

Грунт	Расчетное значение комплексной характеристики свойств грунтов <i>B</i> , см ² /сут	Степень пучинистости в условиях 3-го типа местности по увлажнению
Песок мелкий (непылеватый), содержащий более 5% частиц мельче 0,05 мм	1,5—2	Слабопучинистые
Глина, суглинок легкий и тяжелый (непылеватый), супесь (непылеватая)	3—3,6	Пучинистые
Супесь пылеватая, песок пылеватый, суглинок тяжелый пылеватый	4—4,5	Сильнопучинистые
Супесь тяжелая пылеватая, суглинок легкий пылеватый	5	Чрезмернопучинистые

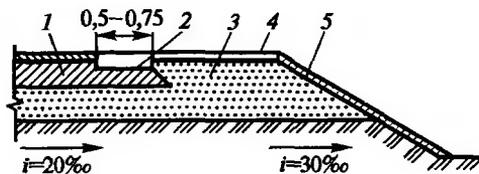
Таблица 24.17. Значения коэффициентов пучения грунтов $K'_{\text{пуч}}$

Грунт	$K'_{\text{пуч}}$, %, в зависимости от типа местности по условиям увлажнения и конструкции земляного полотна			
	1-й тип		2-й тип	
	Насыпи	Выемки	Насыпи	Выемки
Глина, суглинок и супесь (непылеватая)	2	3	3	4,5
Суглинок тяжелый пылеватый	3,5	5	5	7,5
Суглинок легкий пылеватый и супесь пылеватая	3	4,5	4,5	7
Супесь тяжелая пылеватая	5	7,5	7,5	11
Супесь легкая, песок пылеватый, песок мелкий	1	1,5	1,5	2

Примечание. Коэффициенты $K'_{\text{пуч}}$ даны при $\alpha_0 = 100$. При других значениях α_0 коэффициент $K'_{\text{пуч}}$ определяют как $K'_{\text{пуч}} = K'_{\text{пуч}} \frac{100}{\alpha_0}$.

24.7. Осушение дорожной одежды и земляного полотна

В тех случаях, когда количество воды, поступающее в дополнительный слой основания дорожной конструкции, в отдельные периоды года больше, чем может разместиться в порах без заметного снижения несущей способности грунтового основания, предусматривают меры по осушению дорожной одежды путем устройства дренирующих слоев. Дренирующие слои устраивают из песка, гравия, гравийно-песчаных смесей, шлаков и других фильтрующих материалов с коэффициентом фильтрации не менее 1—2 м/сут. Во II и III до-



Р и с. 24.12. Конструкция дорожной одежды с дренирующим слоем, устраиваемым на всю ширину земляного полотна:

1 — покрытие основания; 2 — краевая полоса; 3 — дренирующий слой; 4 — укрепление обочины; 5 — укрепление откоса засевом трав

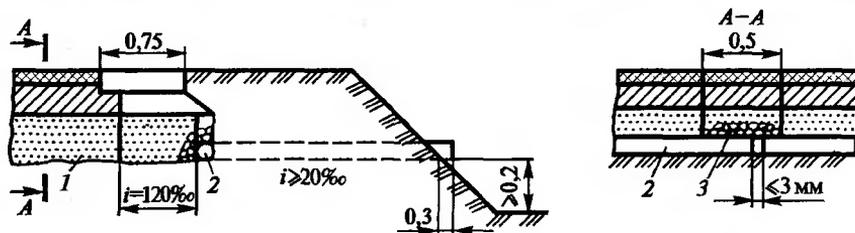
рожно-климатических зонах дренирующие слои дорожных одежд выполняют также морозозащитные функции.

Дренирующие слои обычно укладывают на всю ширину земляного полотна (рис. 24.12).

При удельном притоке воды более 70 л/сут на 1 м² площади покрытия и необходимости снижения общей толщины дренирующего слоя его предусматривают только на ширине проезжей части и краевых полос с устройством для отвода воды продольных и поперечных трубчатых дрен (рис. 24.13).

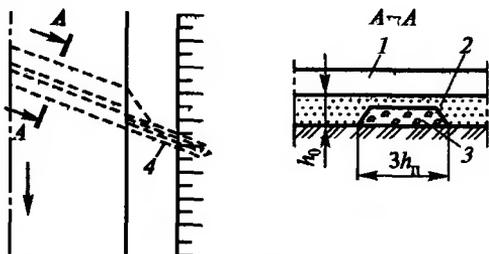
При затяжных продольных уклонах для перехвата и отвода воды, перемещающейся по дренирующему слою, устраивают поперечные валики из крупнопористого материала с шагом не реже 50 м (рис. 24.14).

Дренажные устройства (дренирующий слой и водоотводящие устройства) предусматривают в конструкциях дорожных одежд на участках земляного полотна из слабофильтрующих грунтов (пылеватых песков, непывеватых песков с коэффициентом фильтрации менее 0,5 м/сут, суглинистых и глинистых грунтов) во II дорожно-климатической зоне при всех схемах увлажнения рабочего слоя земляного по-



Р и с. 24.13. Продольный трубчатый дренаж с поперечными выпусками:

1 — дренирующий слой; 2 — труба диаметром $d = 80-100$ мм; 3 — фильтрующая обсыпка стыка труб или сплошная обсыпка перфорированных труб



Р и с. 24.14. Устройство для перехвата и отвода воды на участках с затяжными продольными уклонами:

- 1 — покрытие и основание; 2 — дренарующий слой из песка толщиной h_n ; 3 — гравий, щебень либо трубофильтр; 4 — дренажная труба

лотна, в III зоне — при 2-й и 3-й схемах, в IV и V зонах — только при 3-й схеме (табл. 24.18).

Т а б л и ц а 24.18. Условия применения дренажных конструкций

Схема увлажнения рабочего слоя	Источники увлажнения	Условия отнесения к данному типу увлажнения
1	Атмосферные осадки	<p>Для насыпей на участках 1-го типа местности по условиям увлажнения.</p> <p>Для насыпей на участках местности 2-го и 3-го типов по условиям увлажнения при возвышении поверхности покрытия над расчетным уровнем грунтовых и поверхностных вод или над поверхностью земли, более чем в 1,5 раза превышающем требования табл. 24.19.</p> <p>Для насыпей на участках 2-го типа при расстоянии от уреза поверхностной воды (отсутствующей не менее 2/3 летнего периода) более 5—10 м при супесях; 2—5 м при легких пылеватых суглинках и 2 м при тяжелых пылеватых суглинках и глинах (меньшие значения следует принимать для грунтов с большим числом пластичности; при залегании различных грунтов — принимать большие значения).</p> <p>В выемках в песчаных и глинистых грунтах при уклонах кюветов более 20‰ (в I—III дорожно-климатических зонах) и при возвышении поверхности покрытия над расчетным горизонтом грунтовых вод, более чем в 1,5 раза превышающем требования табл. 24.19.</p> <p>При применении специальных методов регулирования водно-теплового режима (капилляропрерывающие, гидроизолирующие, теплоизолирующие и армирующие прослойки, дренаж и т.п.), назначаемых по специальным расчетам</p>

Схема увлажнения рабочего слоя	Источники увлажнения	Условия отнесения к данному типу увлажнения
2	Кратковременно стоящие (до 30 сут) поверхностные воды, атмосферные осадки	<p>Для насыпей на участках 2-го типа местности по условиям увлажнения при возвышении поверхности покрытия не менее требуемого по табл. 24.19 и не более, чем в 2 раза превышающем эти требования, и при крутизне откосов не менее 1:1,5 и простом (без берм) поперечном профиле насыпи.</p> <p>Для насыпей на участках 3-го типа местности при применении специальных мероприятий по защите от грунтовых вод (капиллярпрерывающие слои дренаж), назначаемых по специальным расчетам, отсутствии длительно (более 30 сут) стоящих поверхностных вод и выполнении условий предыдущего абзаца.</p> <p>В выемках в песчаных и глинистых грунтах при уклонах кюветов менее 20‰ (в I, II зонах) и возвышении поверхности покрытия над расчетным уровнем грунтовых вод, более чем в 1,5 раза превышающем требования табл. 24.19</p>
3	Грунтовые или длительно (более 30 сут) стоящие поверхностные воды; атмосферные осадки	Для насыпей на участках 3-го типа местности по условиям увлажнения при возвышении поверхности покрытия, отвечающем требованиям табл. 24.19, но не превышающем их более чем в 1,5 раза. То же, для выемок, в основании которых имеется уровень грунтовых вод, расположение которого по глубине не превышает требований табл. 24.19 более чем в 1,5 раза

При устройстве всех слоев дорожной одежды из монолитных материалов в качестве плоскостного горизонтального дренажа при соответствующем технико-экономическом обосновании допускается применять вместо дренирующего слоя прослойку из геотекстиля толщиной не менее 4 мм с коэффициентом фильтрации не менее 50 м/сут с выпуском полотнищ на откосы насыпи на высоте не менее 0,5 м. Выбор геотекстиля в этом случае производят по специальным указаниям.

Проектирование мероприятий по дренированию дорожной одежды осуществляют в такой последовательности:

дорогу разделяют на характерные участки по виду продольного профиля и природным условиям (характер рельефа местности, наличие водотоков, пересекающих дорогу, особенности конструкции зем-

ляного полотна — насыпи, выемки с необеспеченным возвышением поверхности покрытия над уровнями грунтовых и поверхностных вод, переходные участки от насыпей к выемкам, наличие монолитных слоев основания, морозозащитных или теплоизоляционных слоев, наличие материалов, пригодных для устройства дренирующих слоев, дренажных труб и геотекстиля и т.д.);

Т а б л и ц а 24.19. Наименьшее возвышение поверхности покрытия

Грунт рабочего слоя	Наименьшее возвышение поверхности покрытия, м, в пределах дорожно-климатических зон			
	II	III	IV	V
Песок мелкий, супесь легкая крупная, супесь легкая	1,1/0,9	0,9/0,7	0,75/0,55	0,5/0,3
Песок пылеватый, супесь пылеватая	1,5/1,2	1,2/1,0	1,1/0,8	0,8/0,5
Суглинок легкий, суглинок тяжелый, глины	2,2/1,6	1,8/1,4	1,5/1,1	1,1/0,8
Супесь тяжелая пылеватая, суглинок легкий пылеватый, суглинок тяжелый пылеватый	2,4/1,8	2,1/1,5	1,8/1,3	1,2/0,8

П р и м е ч а н и е. В числителе — возвышение поверхности покрытия над уровнем грунтовых вод, верховодки или длительно (более 30 сут) стоящих поверхностных вод, в знаменателе — то же, над поверхностью земли на участках с необеспеченным поверхностным стоком или над уровнем кратковременно (менее 30 сут) стоящих поверхностных вод.

для характерных участков определяют количество воды, поступающей в основание за сутки за расчетный период с учетом предусмотренных мер по ограничению притока воды в дорожную конструкцию;

намечают варианты дренажных конструкций;

обосновывают расчетом толщину дренирующего слоя, необходимую в данных условиях, или определяют, каким значением коэффициента фильтрации должен обладать дренирующий материал в заданной дренажной конструкции.

При проектировании дренирующего слоя, помимо обеспечения осушения, проверяют сдвигоустойчивость материала дренирующего слоя и прочность дорожной конструкции в целом.

Дренаж проектируют с учетом объема притока воды, поступающей в основание дорожной одежды в расчетный период, фильтрационной способности материала дренирующего слоя и конструкции земляного полотна.

Комбинированный плоскостной горизонтальный дренаж является универсальным мероприятием для большинства участков автомобильных дорог.

Поперечный дренаж мелкого заложения устраивают для поперечного перехвата воды, движущейся в дренирующем слое вдоль дороги, на участках с продольными уклонами свыше 20‰, также с затяжными продольными уклонами, превышающими поперечные, в местах вогнутых вертикальных кривых и в местах уменьшения продольных уклонов (см. рис. 24.14).

Дренирующий слой, работающий по принципу «осушения», необходимо устраивать из песчаных грунтов или высокопроницаемой скелетной смеси (щебня или гравия) открытого типа (с незаполненными пустотами), отвечающих определенным требованиям по водопроницаемости, и укладывать этот слой под дорожной одеждой на всю ее ширину (см. рис. 24.12). При этом обеспечивают выходы дренирующего слоя на откос. Дренирующий слой устраивают также с дренажными трубами для сбора и быстрого отвода воды за пределы земляного полотна (см. рис. 24.13). Следует предусматривать противозаиливающую защиту дрен и дренирующих слоев, а также недопущение замерзания воды в выпусках труб.

При устройстве дренирующих слоев, работающих по принципу «поглощения», устраивают слои из песчаного, гравийного или гравийно-песчаного грунтов необходимой толщины.

Для устройства дренирующего слоя, работающего по принципу «осушения», применяют материалы с коэффициентом фильтрации не менее 1 м/сут. Материал с коэффициентом фильтрации 1—2 м/сут целесообразно применять на участках, где он одновременно выполняет дренирующие и морозозащитные функции.

Целью расчета дренажной конструкции является определение требуемой толщины дренирующего слоя из несвязных материалов. При проектировании дренирования дорожных одежд в районах сезонного промерзания грунтов учитывают два расчетных этапа работы дренажных конструкций. Первый относится к периоду, когда основание дорожной одежды под серединой проезжей части уже оттаяло, а дренирующий слой у ее краев находится еще в мерзлом состоянии и водоотводящие устройства не работают.

Второй расчетный этап относится ко времени, когда дренирующий слой полностью оттаял и водоотводящие устройства начали нормально работать.

В зависимости от конкретных условий дренаж может быть рассчитан на один из трех вариантов работы:

- работа на «осушение»;
- работа на «осушение с периодом запаздывания отвода воды»;
- работа на «поглощение».

Полную толщину дренирующего слоя определяют по формуле:

$$h_{\text{п}} = h_{\text{нас}} - h_{\text{зап}},$$

где $h_{\text{нас}}$ — толщина слоя, полностью насыщенного водой, м; $h_{\text{зап}}$ — дополнительная толщина слоя, зависящая от капиллярных свойств материала и равная для песков крупных 0,10—0,12 м, средней крупности 0,14—0,15 м и мелких 0,18—0,20 м.

Во всех случаях полную толщину дренирующего слоя следует принимать не менее 0,20 м.

Для дренирующего слоя, работающего по принципу «осушения», величину $h_{\text{нас}}$ устанавливают с помощью номограмм (рис. 24.15 и 24.16) в зависимости от длины пути фильтрации L и расчетной величины притока воды в дренирующий слой на 1 м^2 q_p , определяемой по формуле:

$$q_p = q K_{\text{п}} K_{\text{г}} K_{\text{вог}} K_{\text{р}} : 1000 \text{ [м}^3/\text{м}^2\text{]}, \quad (24.16)$$

где q — осредненное (табличное) значение притока воды в дренирующий слой при традиционной конструкции дорожной одежды, отнесенное к 1 м^2 поверхности проезжей части, л/м² (табл. 24.20); $K_{\text{п}}$ — коэффициент «пик», учитывающий неустановившийся режим поступления воды из-за неравномерного оттаивания и выпадения атмосферных осадков (табл. 24.21); $K_{\text{г}}$ — коэффициент гидрологического запаса, учитывающий снижение фильтрационной способности дренирующего слоя в процессе эксплуатации дороги (см. табл. 24.21); $K_{\text{вог}}$ — коэффициент, учитывающий накопление воды в местах изменения продольного уклона, определяемый при одинаковом направ-

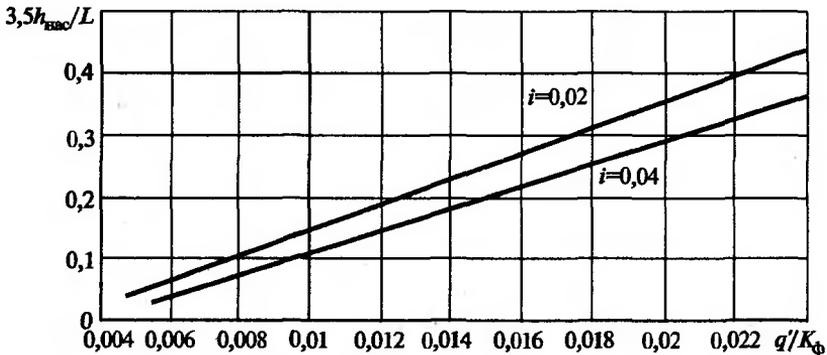
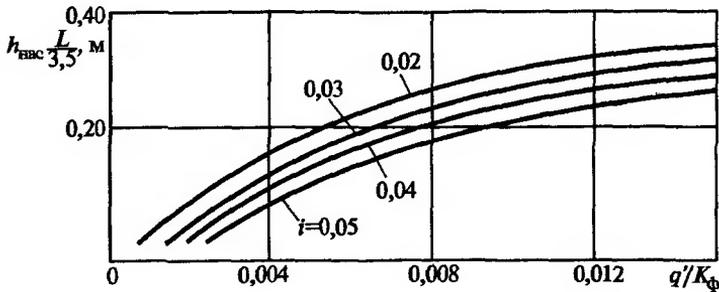


Рис. 24.15. Номограмма для определения толщины $h_{\text{нас}}$ дренирующего слоя из песка мелких и средней крупности, а также крупнозернистых с коэффициентом фильтрации не менее 10 м/сут. При односкатном поперечном профиле $q' = q_p B$, м³/м; при двускатном поперечном профиле $q' = 0,5 q_p B$, м³/м; B — ширина проезжей части, м; L — длина пути фильтрации, м, равная B при односкатном профиле и $0,5B$ — при двускатном; $K_{\text{ф}}$ — коэффициент фильтрации, м/сут



Р и с. 24.16. Номограмма для расчета дренирующего слоя из крупных песков с коэффициентом фильтрации более 10 м/сут:

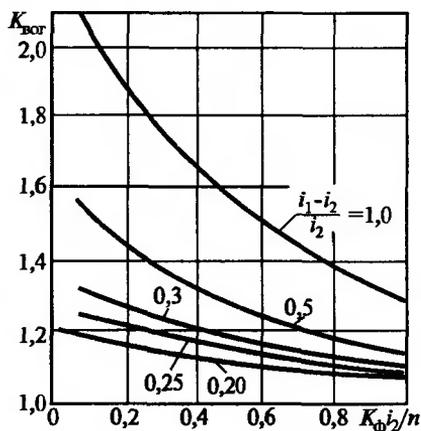
L — длина пути фильтрации, м, равная B при односкатном профиле и $0,5B$ — при двускатном; i — поперечный уклон дренирующего слоя; K_{ϕ} — коэффициент фильтрации, м/сут

лении участков профиля у перелома по номограмме рис. 24.17; K_p — коэффициент, учитывающий снижение притока воды при принятии специальных мер по регулированию водно-теплового режима (табл. 24.22).

Т а б л и ц а 24.20. Среднее количество воды, поступающее в дренирующий слой, q , л/м²

Дорожно-климатическая зона	Схема увлажнения рабочего слоя земляного полотна	Объем воды, поступающей в основание дорожной одежды, q , л/м ²			
		Супесь легкая и песок пылеватый	Суглинок и глина	Суглинок пылеватый	Супесь пылеватая
II	1	15/2,5	20/2	35/3	80/3,5
	2	25/3	50/3	80/4	130/4,5
	3	60/3,5	90/4	130/4,5	180/5
III	1	10/1,5	10/1,5	15/2	30/3
	2	15/2	25/1	30/2,5	40/3
	3	25/2,5	40/2,5	50/3,5	60/4
IV и V	3	20/2	20/2	30/2,5	40/3

П р и м е ч а н и я: 1. В числителе дан общий объем воды Q (в литрах на квадратный метр), поступающий в основание за весь расчетный период, в знаменателе — за сутки (q). Для насыпей, возведенных из непилеватых грунтов высотой более, чем требуется по СНиП 2.05.02—85* (табл. 12.45), во II дорожно-климатической зоне принимаем $q = 1,5$ л/(м² · сут). 2. При наличии разделительной полосы для участков, проходящих в нулевых отметках, насыпей высотой менее, чем требуется по СНиП, во II зоне расчетные значения q повышают на 20%.



Р и с. 24.17. Номограмма для определения коэффициента $K_{\text{вог}}$ увеличения объема воды в дренирующем слое в местах изменения вогнутого профиля:

i_1, i_2 — продольные уклоны выше и ниже перелома профиля; $K_{\text{ф}}$ — коэффициент фильтрации, м/сут; n — коэффициент пористости дренирующего слоя

Таблица 24.21. Значения коэффициентов K_n и K_r

Дорожно-климатическая зона	Схема увлажнения	K_n для непылеватых грунтов	Пылеватые грунты	
			K_n	K_r
II	1	1,5	1,5	1,0/1,0
	2	1,5	1,6	1,2/1,2
	3	1,6	1,7	1,3/1,2
III	1	1,4	1,5	1,0/1,0
	2	1,4	1,5	1,1/1,0
	3	1,5	1,6	1,2/1,1
IV и V	3	1,5	1,3	1,1/1,0

Примечания: 1. Для непылеватых грунтов $K_r = 1,0$. 2. В числителе указаны значения K_r для дорог I и II категорий, а в знаменателе — для III и IV категорий.

Таблица 24.22. Коэффициент уменьшения притока воды в дренирующий слой K_p

Мероприятие	Дорожно-климатическая зона	Грунт		
		Супесь	Легкий суглинок	Тяжелый суглинок, глины
Укрепление обочин (по отношению к неукрепленным) в условиях 1-й схемы увлажнения	II	0,45	0,30	0,15
	III	0,40	—	—
	IV	0,35	—	—
Монолитные слои основания с пористостью материала до 5%	I, II, III	0,10	0,10	0,10

Полную толщину дренирующего слоя, работающего по принципу «поглощения», определяют по формуле:

$$h_{\text{п}} = \frac{\left(\frac{Q}{1000n} + 0,3h_{\text{зап}} \right)}{1 - \varphi_{\text{зим}}},$$

где Q — расчетное количество воды в л/м², накапливающейся в дренирующем слое за весь расчетный период (см. табл. 24.20); $\varphi_{\text{зим}}$ — коэффициент заполнения пор влагой в материале дренирующего слоя к началу оттаивания (табл. 24.23); n — пористость материала, в долях единицы.

Т а б л и ц а 24.23. Значения коэффициента $\varphi_{\text{зим}}$

Толщина дренирующего слоя, см	Значение $\varphi_{\text{зим}}$ во II дорожно-климатической зоне при пористости n , равной			
	0,4	0,36	0,32	0,28
До 20	0,4	0,5	0,6	0,7
20—40	0,35	0,4	0,5	0,6
Более 40	0,3	0,35	0,45	0,55

П р и м е ч а н и е. В III дорожно-климатической зоне величину $\varphi_{\text{зим}}$ следует уменьшить на 20%.

Дренирующий слой в конструкции с прикромочным дренажем, усиливающим процесс движения воды в песке мелком и средней крупности, рассчитывают с помощью номограмм (рис. 24.18).

По номограммам на рис. 24.15, 24.16 и 24.18 можно также определять требуемые значения коэффициента фильтрации дренирующего слоя при известных других параметрах дренажной конструкции.

Полную толщину дренирующего слоя (в метрах), работающего по принципу «осушения с периодом запаздывания отвода воды», достаточную для временного размещения в его порах поступающей в конструкцию в начальный период ее оттаивания воды, определяют по формуле:

$$h_{\text{п}} = \frac{\frac{q_{\text{р}} T_{\text{зап}}}{n} + 0,3h_{\text{зап}}}{1 - \varphi_{\text{зим}}},$$

где $T_{\text{зап}}$ — средняя продолжительность запаздывания начала работы водоотводящих устройств, принимаемая для II дорожно-климатиче-

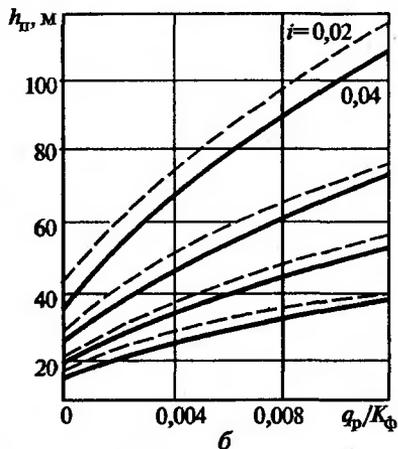
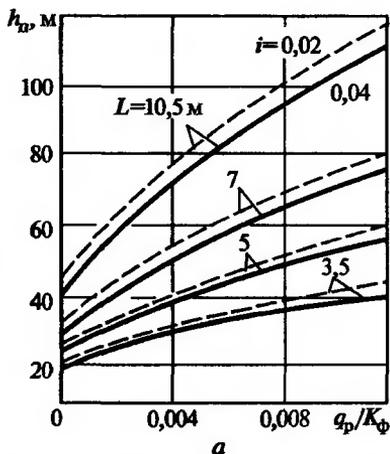


Рис. 24.18. Номограмма для расчета дренирующего слоя в конструкции с прикромочным дренажем:

a — мелкий песок; *b* — песок средней крупности

ской зоны, равной 4—6 сут, для III дорожно-климатической зоны, равной 3—4 сут (большее значение — для мелких песков); $\varphi_{\text{зим}}$ — коэффициент заполнения пор влагой в материале дренирующего слоя к началу оттаивания (см. табл. 24.23); q_p — расчетное значение воды, поступающей за сутки (формула 24.16).

На участках, где длина пути фильтрации $L > 10$ м, дренирующий слой должен быть рассчитан на поглощение всего количества воды, поступающей за весь расчетный период.

За длину пути фильтрации принимают половину ширины дренирующего слоя при двускатном поперечном профиле и полную ширину дренирующего слоя при односкатном.

24.8. Особенности автоматизированного проектирования оптимальных нежестких дорожных одежд

При неавтоматизированном, традиционном проектировании конструкцию дорожной одежды обычно назначают по типовому проекту¹, а расчет ее сводится главным образом к определению толщины дополнительного слоя основания.

Как показывает опыт автоматизированного проектирования дорожных одежд, в результате применения оптимизационных компьютерных программ достигают три статьи экономического эффекта:

¹ Дорожные одежды автомобильных дорог общей сети Союза ССР. Серия 503-0-11. М.: Союздорпроект, 1976.

ускорение процесса проектирования и снижение сметной стоимости проектных работ. В результате этого в фиксированные проектные сроки удается рассмотреть большее количество принципиальных вариантов конструкции;

исключение случайных ошибок в расчетах. В практике проектирования автомобильных дорог все еще нередки случаи, когда при неавтоматизированных расчетах вкрадываются разного рода случайные ошибки (вплоть до арифметических) в ходе проектирования дорожных одежд и, оставаясь незамеченными, эти ошибки определяют низкую степень надежности конструкций, в результате чего они требуют капитального ремонта значительно раньше нормативного срока, т.е. дают отказ;

снижение материалоемкости и стоимости строительства дорожных одежд на 5—18%. Автомобильные дороги чрезвычайно капиталоемкие (хотя и исключительно рентабельные) сооружения. Стоимость дорожных одежд составляет наиболее весомую часть общей стоимости автомобильных дорог (в среднем 40—70%). Таким образом, применение элементарных оптимизационных программ при проектировании дорожных одежд позволяет при обеспеченной их прочности снижать материалоемкость и общую стоимость строительства автомобильных дорог от 3 до 10%. Эта составляющая экономического эффекта оказывается особенно ощутимой.

Одна из программ проектирования оптимальных дорожных одежд разработана в ГипродорНИИ. Задачей автоматизированного проектирования дорожных одежд нежесткого типа является отыскание среди равнопрочных конструкций наиболее рационального проектного решения с учетом строительной стоимости конструкции, технологии производства работ и эксплуатационных показателей. Это может быть достигнуто в результате рассмотрения нескольких допустимых вариантов конструкции с последующим определением стоимостных показателей и выбором наиболее экономичного и технологичного решения. При традиционной ручной технологии имеется возможность рассматривать в среднем от двух до пяти вариантов и среди них выбирать наиболее рациональный. Однако при таком подходе нет уверенности в том, что среди рассмотренных вариантов оказались наиболее рациональные из возможных.

Переход на компьютерный расчет конструкций дорожных одежд по специальным, разработанным для этой цели оптимизационным программам позволяет значительно снизить время, затрачиваемое на расчеты конструкций, и целенаправленно искать наиболее рациональный вариант из значительно большего рассматриваемого их числа. При этом количество целенаправленно перебираемых вариантов

равнопрочных конструкций дорожных одежд может достигать от нескольких десятков до сотен тысяч.

Типовые решения дорожных одежд позволяют значительно сузить диапазон поиска наиболее рациональной конструкции, но решают задачу оптимизации лишь частично. Каждый материал конструктивных слоев имеет свою конкретную стоимость, и эти стоимости в свою очередь зависят от района строительства дороги, расположения строительных баз, карьеров местных дорожно-строительных материалов, складов, дальности возки материалов и т.д. Грунтовые условия также различны даже при одинаковых конструкциях, и учесть все эти особенности в типовых проектах практически невозможно. Поэтому типовые проектные решения — это решения ориентировочные, которые, как правило, не являются наилучшими из возможных.

Наилучшие проектные решения могут быть получены в результате *автоматизированного проектирования оптимальных дорожных одежд*, включающего в себя конструирование, расчеты, технико-экономический анализ и выбор наиболее рационального проектного решения. Наиболее эффективным является автоматизированное проектирование с использованием специальных алгоритмов и программ математической оптимизации, одна из которых реализована в ГипродорНИИ канд.техн.наук Б.М.Наумовым.

Компьютерные программы проектирования оптимальных нежестких дорожных одежд реализуют методы расчета дорожных конструкций в соответствии с Инструкцией ОДН 218.046—01.

24.9. Проектирование оптимальных нежестких дорожных одежд

В программе ГипродорНИИ в качестве критерия оптимальности, определяющего эффективность того или иного варианта конструкции, является строительная стоимость единицы площади дорожной конструкции (1 м^2 , 100 м^2 и т.д.):

$$K_{\text{до}} = \sum_{i=1}^n h_i K_i \Rightarrow \min, \quad (24.17)$$

где h_i — толщина i -го конструктивного слоя, см; K_i — стоимость единицы толщины i -го конструктивного слоя, отнесенная к единице площади, руб/см.

Для наиболее рационального использования местных дорожно-строительных материалов проектированию дорожной конструк-

ции всегда предшествует разработка транспортной схемы строительства, что позволяет выделить на проектируемой дороге ряд характерных участков в зависимости от грунтовых и гидрогеологических условий, от зон использования источников снабжения местными дорожно-строительными материалами и производственных баз и учесть транспортные расходы на перевозку материалов.

Процесс поиска оптимальной конструкции нежесткой дорожной одежды сводится к определению такой совокупности конструктивных слоев $\{h_i^*\}$, при которой оказывается выполненным условие (24.17) и которая одновременно удовлетворяет следующему комплексу технических ограничений:

$E_{\text{общ}}^{(n+1)} \geq E_{\text{тр}}$ — обеспечение требуемой жесткости конструкции, при которой обеспечивается работа грунтового основания в стадии упругих деформаций;

$\tau_i \leq \tau_{\text{доп}i}$ — обеспечение требуемой прочности против сдвига в малосвязных конструктивных слоях и грунтовом основании;

$\sigma_{ri} \leq R_i$ — обеспечение требуемой прочности при изгибе монолитных слоев;

$\sum_{i=1}^n h_i \geq h_{\text{мз}}$ — обеспечение морозоустойчивости конструкции;

$A_i \leq h_i \leq B_i$ — обеспечение технологических требований и требований по осушению дорожной конструкции.

Здесь $E_{\text{общ}}^{(n+1)}$ и $E_{\text{тр}}$ — общий и требуемый модули упругости дорожной одежды;

τ_i и $\tau_{\text{доп}i}$ — максимальное касательное напряжение сдвига в i -м конструктивном слое и допустимое его значение;

σ_{ri} и R_i — максимальное растягивающее напряжение в i -м конструктивном слое и нормативное сопротивление растяжению материала i -го монолитного слоя;

$h_{\text{мз}}$ — минимальная толщина дорожной конструкции по условию морозоустойчивости;

A_i и B_i — ограничения толщины i -го конструктивного слоя соответственно снизу и сверху.

Ограничения толщин конструктивных слоев снизу A_i регламентируются табл. 23.2. Для дополнительного слоя основания A_i назначают из условия обеспечения осушения дорожной одежды.

Шаг перебора каждого i -го конструктивного слоя Δh_i нерационально назначать меньше, чем технологически возможная точность

устройства i -го слоя. Поэтому шаг перебора Δh_i принимают: для асфальтобетона — 0,5 см; для материалов, обработанных вяжущими, — 1,0 см; для прочих несвязных материалов — 2,0 см.

Шаг перебора Δh_i и интервалы ограничений A_i и B_i связаны зависимостью:

$$\frac{B_i - A_i}{\Delta h_i} = m_i,$$

где m_i — целое число.

Если толщину какого-либо слоя варьировать нежелательно, то задают $h_i = A_i = B_i$.

Последовательность поиска оптимальной конструкции жесткой дорожной одежды следующая:

формируется первый вариант дорожной одежды таким образом, что толщины всех конструктивных слоев принимают равными ограничению снизу $h_i = A_i$;

выполняют все расчеты на прочность снизу вверх и осуществляют проверку исходной конструкции по всем техническим ограничениям. Если по какому-либо техническому условию конструкция не проходит, то увеличивают нижний (первый) слой на величину шага перебора $h_1 = h_1 + \Delta h_1$ (рис. 24.19) и вновь выполняют все расчеты;

если в ходе расчета оказывается, что $h_i = B_i$, а по каким-либо техническим ограничениям конструкция все еще не проходит, то увеличивают толщину второго слоя на шаг

Δh_2 , а толщину первого слоя принимают $h_1 = A_1$ и вновь выполняют все расчеты, увеличивая первый слой с шагом $h_1 = h_1 + \Delta h_1$ и т.д. до тех пор, пока не будет сформирован первый вариант, удовлетворяющий всем техническим ограничениям. Вариант запоминается и подсчитывается его стоимость;

увеличивают толщину второго снизу слоя $h_2 = h_2 + \Delta h_2$ и, полагая $h_1 = A_1$, вновь с шагом Δh_1 отыскивают вариант, удовлетворяющий требованиям всех технических ограничений. Если стоимость сформированного таким образом второго варианта возросла, увеличивают тол-

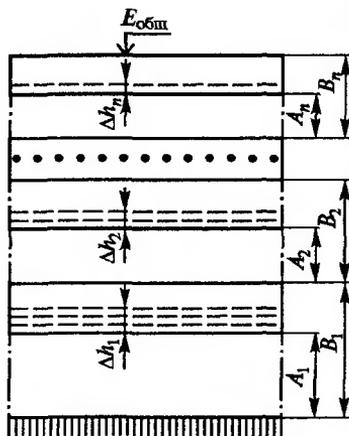


Рис. 24.19. Схема к расчету оптимальной конструкции дорожной одежды

щину третьего слоя $h_3 = h_3 + \Delta h_3$, принимая равными $h_1 = A_1$ и $h_2 = A_2$ и т.д. Вариант не запоминают. Если стоимость уменьшилась, вариант запоминают и, вновь увеличив слой $h_2 = h_2 + \Delta h_2$, снова повторяют расчеты и т.д.

В оптимизационной программе ГипроддорНИИ реализован метод последовательного анализа вариантов. Рассчитав несколько вариантов конструкции дорожной одежды, для каждого из них вычисляют дополнительно дорожно-эксплуатационные и транспортные расходы и сравнивают по чистой приведенной стоимости NPV :

$$NPV = OUTF_0 + \sum_{t=1}^{T_p} \frac{OUTF_t}{(1+R_D)^t} - \frac{OUTF'_0}{(1+R_D)^{T_p}}, \quad (24.18)$$

где NPV — чистая приведенная стоимость; $OUTF_0$ — первоначальные инвестиции в строительство дорожной одежды; $OUTF_t$ — текущие дорожно-эксплуатационные и транспортные расходы; t — текущий год эксплуатации автомобильной дороги; T_p — расчетный срок сравнения вариантов; R_D — коэффициент дисконтирования; $OUTF'_0$ — остаточная стоимость дорожной одежды.

При проектировании дорожных одежд часто приходится сравнивать равнопрочные конструкции с одинаковым типом покрытия. В этом случае при сравнении вариантов можно ограничиться лишь строительной стоимостью (первоначальными инвестициями) $OUTF_0$. По чистой приведенной стоимости NPV сравнивают лишь конструкции с различным типом покрытия либо с различной проектной прочностью.

Наибольший экономический эффект дает проектирование оптимальных дорожных одежд в пространстве (т.е. с оптимизацией транспортной схемы строительства), когда конструкцию оптимизируют по длине трассы автомобильной дороги с учетом протяженности насыпей и выемок, почвенно-грунтовых, гидрогеологических условий, местоположения карьеров местных дорожно-строительных материалов, размещения производственных баз, местоположения станций доставки фондируемых материалов и т.д. Алгоритмы и компьютерные программы пространственного расчета оптимальных дорожных одежд разработаны в Ташкентском автомобильно-дорожном институте канд.техн.наук М.Л. Гольдбергом.

Глава 25

КОНСТРУКТИВНЫЕ РАСЧЕТЫ ЖЕСТКИХ ДОРОЖНЫХ ПОКРЫТИЙ И ОСНОВАНИЙ

25.1. Область применения и основные виды жестких дорожных покрытий

Жесткими считают дорожные одежды с усовершенствованными покрытиями — цементобетонными или асфальтобетонными на основаниях из монолитного цементобетона. Их относят к категории капитальных дорожных одежд, которые проектируют в соответствии со СНиП 2.05.02—85* на автомобильных дорогах I—IV категорий общей сети РФ. Согласно методическим рекомендациям по проектированию жестких дорожных одежд цементобетонные покрытия можно применять и для дорожных одежд облегченного типа. При соответствующем технико-экономическом обосновании жесткие дорожные одежды применяют на подъездных дорогах к промышленным предприятиям, крупным строительным объектам, оборонным объектам и на внутрихозяйственных дорогах. В этом случае их применяют в соответствии со СНиП 2.05.11—83.

В настоящее время автомобильные дороги с цементобетонными покрытиями занимают всего 1,67% от общей протяженности автомобильных дорог с твердым покрытием в Российской Федерации. Однако, несмотря на относительно небольшую общую их протяженность, жесткие дорожные одежды находят эффективное применение в условиях интенсивного движения тяжелых и сверхтяжелых грузовых автомобилей и автопоездов, а также в районах, не обеспеченных местными каменными материалами, пригодными для устройства нежестких дорожных покрытий и верхних слоев оснований.

Нередко цементобетонным покрытиям отдают предпочтение по экономическим соображениям и условиям обеспечения безопасного движения на мостах и подходах к ним, в тоннелях, а также в случаях значительного роста цен на нефтепродукты.

Во всех случаях выбор в пользу жестких дорожных одежд подтверждается технико-экономическими расчетами вариантов конструкции по критерию минимума суммарных дисконтных строительных и эксплуатационных затрат.

По технологии строительства и конструктивным особенностям жесткие цементобетонные покрытия подразделяют на монолитные и сборные.

В настоящее время *монолитные покрытия* различают по технологии строительства:

комплект высокопроизводительных машин со скользящей опалубкой и автоматической системой обеспечения ровности (комплект ДС-100);

комплект машин, перемещающихся по рельс-формам, выполняющим также функции неподвижной опалубки при бетонировании покрытия (комплект с бетоноотделочной машиной Д-376 или ДВО-7,5).

Сборные покрытия состоят из бетонных плит заводского изготовления, укладываемых на дорогах кранами или другими видами монтажного оборудования. В отличие от монолитных сборные покрытия применяют на участках дорог специального назначения или временных дорог, к которым не предъявляют повышенных требований по обеспечению ровности. В частности, эти покрытия находят применение на дорогах нефтяных и газовых промыслов, в районах крупного промышленного, гидротехнического и других видов строительства, а также на подъездах к оборонным объектам, в крупных карьерах, на лесоразработках и на временных объездах в местах срочного пропуска транспортных средств при восстановительных и ремонтных работах.

По конструкции цементобетонные покрытия подразделяют на неармированные, армированные и предварительно-напряженные.

Среди *армированных покрытий* различают следующие виды по степени насыщения сечения продольной арматурой: до 0,25% — *армированные покрытия*; 0,4% — *железобетонные*; 0,4—0,7% — *непрерывно армированные*.

Особенностью непрерывно армированных покрытий является отсутствие в покрытии поперечных деформационных швов, функцию которых частично выполняет значительное число поперечных врослых трещин, образующихся в покрытии в процессе эксплуатации на расстоянии 0,3—3 м друг от друга.

Несмотря на эффективность сборных покрытий, в отечественной практике дорожного строительства автомобильных дорог они не нашли широкого применения.

Предварительно-напряженные покрытия представляют собой конструкции, обладающие повышенной трещиностойкостью и работоспособностью в процессе эксплуатации благодаря предварительному обжатию бетона (до 1 МПа) в ходе строительных работ. По способу создания предварительного напряжения монолитные покрытия де-

лят на покрытия с внешним безарматурным обжатием бетона и с предварительно напрягаемой арматурой (струны, пучки, стержни периодического профиля).

В струнобетонных покрытиях предварительное напряжение создают высокопрочной стальной проволокой диаметром 4—5 мм с пределом прочности 1600 МПа, напрягаемой до бетонирования и отпускаемой на бетон после достижения им 70—80% проектной прочности. За счет предварительного напряжения удается значительно снизить толщину этих покрытий (до 10—15 см), что позволяет рассматривать струнобетонные покрытия как весьма экономичные.

Строительство монолитных предварительно-напряженных покрытий осуществлялось в СССР в период с середины 50-х до начала 70-х гг. XX в. В настоящее время применение их сведено к минимуму из-за низких темпов строительства. Кроме того, при строительстве предварительно-напряженных покрытий требуется повышенное внимание к технике безопасности.

Большое разнообразие жестких дорожных одежд позволяет проектировщику выбирать наиболее эффективную в конкретных условиях строительства конструкцию с обоснованием ее технико-экономическими расчетами.

25.2. Общие требования к жестким дорожным одеждам

Опыт эксплуатации автомобильных дорог с жесткими дорожными одеждами свидетельствует, что под воздействием автомобильного движения и погодно-климатических факторов происходит постепенное ухудшение состояния покрытия в результате образования различных дефектов и переход его к концу расчетного, межремонтного срока службы в предельное состояние.

В общем случае в цементобетонных покрытиях, после ввода их в эксплуатацию, развиваются повышенные напряжения от сил сопротивления основания температурным перемещениям и при этом срываются отдельные температурные поперечные швы. Затем начинают существенно влиять температурные напряжения, возникающие от невозможности коробления покрытия, и динамические нагрузки от движущихся автомобилей. В результате появления поперечных трещин происходит процесс постепенного уменьшения длины частей цементобетонного покрытия. На участках покрытия длиной менее 10 м растрескивание вызывается совместным действием температуры и нагрузки. При этом воздействие температуры обуславливает появ-

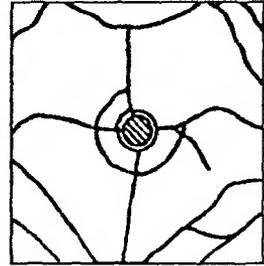
ление поперечных трещин, а многократно повторяющиеся проезды автомобилей способствуют местному перенапряжению и усталостному разрушению бетона покрытия. Со временем, когда длина вновь образованных трещинами частей плит будет превышать их ширину, в них начинают появляться продольные трещины. В дальнейшем с ростом количества проездов автомобилей по дороге поперечные и продольные трещины целиком разрушают цементобетонное покрытие, образуя сетку трещин (рис. 25.1).

Одновременно с образованием трещин в покрытии начинается процесс постепенного смещения частей плит по вертикали с образованием ступеней и перекосов плит. В асфальтобетонных покрытиях на цементобетонных основаниях развиваются «отраженные» трещины. В результате ровность покрытий становится неудовлетворительной и требуется их капитальный ремонт или реконструкция.

На транспортно-эксплуатационное состояние жестких дорожных одежд существенное влияние оказывают их конструктивные особенности, физико-механические свойства материалов конструктивных слоев и в огромной степени состояние грунтов земляного полотна. Для длительного сохранения необходимых транспортно-эксплуатационных качеств покрытия к конструкциям жестких дорожных одежд предъявляют следующие требования:

по прочности, трещиностойкости покрытия и конструктивных слоев, воспринимающих изгибающие моменты. В качестве критерия прочности используют допускаемые растягивающие напряжения, возникающие при изгибах монолитных слоев, появляющихся в результате температурных воздействий и динамических нагрузок от подвижного состава в течение расчетных, межремонтных сроков службы;

по прочности дорожной конструкции сдвигу. В качестве критерия прочности используют допускаемые напряжения сдвигу в грунтах земляного полотна и в несвязных конструктивных слоях, а также допустимые величины деформаций по торцам плит в соответствии с накопленными величинами уступов между плитами в поперечных швах. Проверку прочности дорожной одежды по критерию сдвига



Р и с. 25.1. Сетка трещин в цементобетонной плите при загрузке ее в центре до предела прочности

осуществляют методами, аналогичными для нежестких дорожных одежд (см. гл. 24);

по продольной устойчивости покрытия. В качестве критерия используют критическое напряжение сжатия, возникающее в покрытии при повышении его температуры;

по морозоустойчивости дорожной одежды. В качестве критерия обеспечения морозоустойчивости используют допускаемое зимнее вспучивание (вертикальный подъем) покрытия, возникающее в результате зимнего влагонакопления в грунтовом основании конструкции. Расчет морозоустойчивости одежды осуществляют методами, аналогичными используемым при проектировании нежестких дорожных одежд (см. гл. 24);

по обеспечению водоотвода в основании. В качестве критерия используют необходимую величину коэффициента фильтрации материала дополнительного слоя основания (фильтра) и его толщину;

по шероховатости поверхности покрытия. В качестве критерия используют допускаемый коэффициент сцепления колеса с покрытием или необходимую среднюю высоту выступов шероховатости. Требования по обеспечению необходимой шероховатости поверхности покрытия обеспечивают соответствующими технологическими приемами при строительстве автомобильной дороги.

Учет всех указанных требований приводит к конструированию жестких дорожных одежд в виде многослойных систем.

В соответствии с методическими рекомендациями по проектированию жестких дорожных одежд конструкцию жесткой дорожной одежды выбирают в результате технико-экономического сравнения вариантов, рассчитанных на прочность, деформативность, морозоустойчивость и осушение. При этом расчет осуществляют с учетом надежности (вероятности безотказной работы) конструкции (табл. 25.1) в пределах расчетного срока службы. Расчетный срок службы при определении конструкции дорожной одежды и расчетных параметров конструктивных слоев принимают равным 25 годам или менее, с учетом воздействия построечного транспорта.

Таблица 25.1. Уровни надежности и коэффициенты прочности

Интенсивность движения расчетной нагрузки, ед/сут	Уровень надежности	Коэффициент прочности, K_{np}
Более 1000	0,95	1,00
500—1000	0,90	0,94
Менее 500	0,80	0,87

Конструкция современных жестких дорожных одежд включает покрытие, выравнивающий слой, основание и дополнительный слой основания.

Покрытие предназначено для обеспечения безопасного круглогодичного проезда автомобилей и автопоездов с расчетными скоростями и осевыми (колесными) нагрузками. Толщину покрытий устанавливают расчетом и ее принимают, как правило, одинаковой по всей ширине проезжей части.

Выравнивающий слой между покрытием и основанием предназначен для обеспечения наилучшего контакта покрытия с основанием при воздействии температур и внешних нагрузок. Выравнивающий слой обеспечивает равномерное опирание плит на основание и устраняет отдельные неровности. Его устраивают из обработанных органическими вяжущими зернистых материалов и принимают без расчета в качестве конструктивного слоя толщиной 3—5 см. Выравнивающий слой могут не устраивать на основаниях из низкомарочного бетона или грунта и каменных материалов, укрепленных цементом, при условии, если ровность основания соответствует требованиям строительных норм и правил по производству и приемке работ при строительстве автомобильных дорог.

Основание под цементобетонное покрытие устраивают для уменьшения давления на подстилающий грунт от движущихся автомобилей, а также комплекта машин, используемых при устройстве покрытий в скользящей опалубке. В зависимости от условий строительства и эксплуатации основания устраивают: из бетона низких марок по прочности; из нерудных материалов и грунтов, укрепленных неорганическим вяжущим; из щебня, шлака, гравия или песка. Толщину основания назначают по расчету, но не менее 14, 16 и 15 см, соответственно, для указанных выше видов основания.

На автомобильных дорогах I—III категорий для оснований применяют: бетоны низких марок по прочности (класса $B_{тб}08$; $B_{тб}1,2$); каменные материалы или грунты, укрепленные цементом и другими неорганическими вяжущими. Основания из щебня, шлака и грунтов, укрепленных органическими вяжущими, целесообразно устраивать на дорогах II—IV категорий. Песок и гравийно-песчаные смеси применяют на дорогах III—V категорий.

Во избежание образования случайных трещин в цементобетонных покрытиях в нижнюю часть основания, укрепленного неорганическим вяжущим, закладывают деревянные бруски высотой 4—7 см через каждые 20—30 м, а между покрытием и основанием устраивают трещинопрерывающие прослойки.

При бетонировании покрытия гусеничными бетоноукладчиками со скользящими формами ширину укрепленного основания устраивают шире покрытия на 0,8—1,05 м с каждой стороны. В случае применения комплекта машин, передвигающихся по рельс-формам, основание устраивают шире покрытия не менее чем на 0,5 м с каждой стороны, но не менее ширины краевых полос.

Дополнительный слой основания наряду с передачей нагрузок на земляное полотно выполняет функции теплоизолирующего, морозозащитного и дренирующего слоя. В зависимости от климатических, гидрологических и гидрогеологических условий указанные функции могут совмещаться. Дополнительный слой основания устраивают из морозостойких и дренирующих материалов с высокими коэффициентами фильтрации (песок, шлак, высевки, ракушечник и т.д.), рассчитывая параметры слоя методами, принятыми при проектировании дорожных одежд нежесткого типа (см. гл. 24).

При проектировании асфальтобетонных покрытий на основаниях из цементобетона для предотвращения появления «отраженных» трещин между покрытием и основанием применяют *трещинопрерывающие прослойки* — специальный конструктивный элемент дорожной одежды, представляющий собой композицию из армирующего полотна (геосетки) и вяжущего. В качестве геосетки применяют сетки типа ССНП (сетка стеклянная нитепробивная пропитанная) и зарубежные типа «HaTellit». Применяют или сплошное армирование, или армирование над зонами основания, в которых предполагается развитие трещин.

Краевые полосы устраивают из цементобетона или асфальтобетона на бетонном основании. Толщину полос принимают равной толщине покрытия проезжей части. В цементобетонных краевых полосах устраивают поперечные швы, которые являются продолжением поперечных швов основного покрытия.

25.3. Особенности конструкций жестких дорожных одежд

Монолитные цементобетонные покрытия. Покрытия из неармированного цементобетона устраивают либо однослойными, либо двухслойными с верхним слоем толщиной не менее 6 см. Двухслойные покрытия обычно применяют при строительстве комплектов машин, передвигающихся по рельс-формам, с целью использования в бетоне для нижнего слоя менее прочных и морозостойких местных каменных материалов. Общую толщину покрытия устанавливают расчетом в зависимости от категории автомобильной дороги, интен-

сивности и состава движения автомобилей и вида материала основания, но не менее величин в соответствии с табл. 25.2.

Т а б л и ц а 25.2. Минимальная толщина цементобетонных покрытий

Основание	Минимальная толщина покрытия (см) при интенсивности движения расчетной нагрузки на полосу (ед/сут)				
	более 2000	1000—2000	500—1000	100—500	менее 100**
Бетонное (мелкозернистый бетон, шлакобетон)	22	20	18 (16)	18* (16)	15*
Из материалов, укрепленных вяжущими	22	20	18 (16)	18* (16)	15*
Из щебня, гравия, шлака	—	22	20 (18)	18* (16)	16*
Из песка, песчано-гравийной смеси	—	—	20 (18)	18 (16)	16*

*Толщина основания может быть уменьшена на 2 см от минимально допускаемой величины.

**Требуется технико-экономическое обоснование.

П р и м е ч а н и я: 1. В скобках приведена толщина покрытия для облегченной дорожной одежды. 2. При отсутствии штырей в поперечных швах толщину увеличивают на 2 см.

Бетонные покрытия устраивают одинаковой толщины по всей ширине проезжей части. На дорогах с шестью полосами движения и более толщину плит можно увеличивать на 2 см для крайних наиболее нагруженных полос.

Для предотвращения образования случайных трещин в покрытии устраивают продольные и поперечные швы (см. рис. 23.4). Среди поперечных швов различают швы расширения, сжатия, контрольные и рабочие (см. рис. 23.5).

Продольный шов устраивают при ширине покрытия более 23 м (3,5—5,5 м), чтобы предупредить появление извилистых продольных трещин от воздействия транспортных средств, морозного пучения и местных просадок земляного полотна.

Швы расширения повышают продольную устойчивость бетонного покрытия при максимальном нагреве летом (см. рис. 23.5, а). Их всегда устраивают на примыканиях покрытий к мостам, путепроводам и в местах пересечения автомобильных дорог с бетонными покрытиями в одном уровне. *Швы сжатия* устраивают между швами расширения с целью предупреждения образования случайных поперечных трещин при совместном действии температуры, усадки бетона и нагрузок от движущихся автомобилей (см. рис. 23.5, б). Расстояние между швами

сжатия (длину плиты) назначают по расчету в зависимости от толщины плиты и климатических факторов, но не более:

25 *h* — на укрепленном основании и на устойчивом земляном полотне;

22 *h* — на земляном полотне с ожидаемыми неравномерными осадками, включая насыпи высотой более 3 м;

20 *h* — в местах перехода из выемок в высокие насыпи, в местах примыкания к искусственным сооружениям и в покрытиях шириной 6 м и менее.

Расстояние между швами расширения назначают согласно методическим рекомендациям Росавтодора в зависимости от температуры воздуха во время бетонирования, толщины покрытия и климатических условий района расположения дороги (табл. 25.3).

Таблица 25.3. Число плит между швами расширения

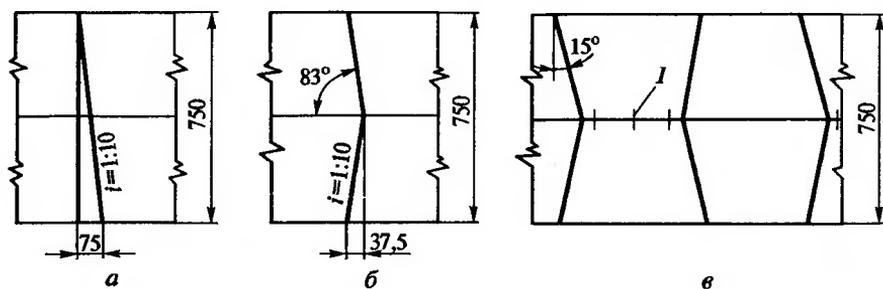
Ожидаемая температура нагрева покрытия, °С	Толщина покрытия, см	Число плит между швами расширения при температуре воздуха во время бетонирования, °С				
		менее 5	5—10	10—15	15—20	более 20
Менее 40	20—24	10	10	—	—	—
	Менее 20	10	10	10	—	—
Более 40	20—24	10	10	10	—	—
	Менее 20	10	10	10	10	—

Контрольные швы устраивают в свежееуложенном бетоне через каждые 2—3 плиты по типу поперечных швов сжатия для предотвращения растрескивания покрытия в раннем возрасте.

Рабочие швы устраивают по типу швов сжатия в конце рабочей смены или при перерыве бетонирования покрытия более чем на 2—4 ч.

Для исключения образования значительных уступов в швах и обеспечения передачи нагрузки с одной плиты на другую края плит вдоль швов, как правило, соединяют стальными штырями (см. рис. 23.4 и 23.5).

При устройстве швов сжатия и расширения не допускается перекосов и наклонов штырей и прокладок более чем на 1 см от проектного положения. Длина зоны обмазки штырей в поперечных швах разжиженным битумом составляет 2/3 длины штырей. Штыри в продольных швах устанавливают без битумной обмазки с допущением перекосов не более 5 см. Сечение паза швов сжатия в зависимости от герметизирующего материала устраивают прямоугольным, ступенчатым или с наклонными стенками. Ширина паза швов сжатия допус-



Р и с. 25.2. Варианты расположения поперечных швов (размеры — в см):

I — штыри

кается от 4 до 15 мм, глубина — не менее $0,25 h$. При меньшей глубине возможно появление извилистых трещин рядом со швом в результате несрабатывания шва. Ширину паза шва расширения принимают равной 33—35 мм при глубине до верха доски 40—60 мм.

Для повышения продольной устойчивости плит и улучшения транспортно-эксплуатационных качеств покрытия поперечные швы, согласно методическим рекомендациям Росавтодора, рекомендуется устраивать под углом к продольному шву (рис. 25.2).

Количество штырей в продольном шве рассчитывают с учетом массы соседних плит без штырей в продольном шве.

Армированные покрытия согласно ВСН 139—80 преимущественно используют на автомобильных дорогах I, II категорий при интенсивности движения более 5000 авт/сут, а также на участках дорог с насыпями высотой более 3—5 м или на участках земляного полотна индивидуального проектирования, где ожидается в процессе эксплуатации неравномерная осадка земляного полотна.

Благодаря армированию покрытия удается увеличить длину плит до 20 м или несколько снизить их толщину (на 1—2 см), нередко даже с улучшением транспортно-эксплуатационных качеств покрытий.

В условиях повышенной интенсивности движения используют армированные плиты длиной 10—20 м, а на участках высоких насыпей покрытие устраивают из плит длиной 5—7 м. Армирование осуществляют стальными плоскими сетками с расходом арматуры диаметром 8—16 мм согласно табл. 25.4.

Для армирования покрытий применяют плоские сварные сетки заводского изготовления или изготавливаемые на месте строительства, с продольной арматурой из горячекатаной стали периодического профиля класса А-II (ГОСТ 5781—82).

Таблица 25.4. Расход продольной арматуры

Толщина плиты, см	Расход продольной арматуры на 1 м ² покрытия, кг				
	Длина плиты, м				
	5	8	10	15	20
24	2,3	2,3	2,8	4,1	—
20—22	1,8	2,0	2,5	3,7	4,5
18	1,2	1,4	1,7	2,7	3,4

Примечание. Количество арматуры установлено из условия раскрытия трещин до 0,2 мм для предотвращения коррозии стали.

Покрытие шириной 7—7,5 м армируют сетками шириной до 2300 мм. Минимальное и максимальное расстояния между осями рабочих продольных стержней сеток допускают соответственно 100 и 200 мм. Наибольшее расстояние между осями поперечной гладкой арматуры диаметром до 6 мм принимают не более 50 см. Сетки располагают в однослойных покрытиях на глубине не менее 8 см от поверхности покрытия. В однослойных покрытиях можно располагать сетки на уровне половины толщины покрытия, а в двухслойных — между верхним и нижним слоями.

Для более эффективной работы плит длиной 4; 5 и 6—7 м применяют плоские сетки длиной соответственно 2,5; 3 и 3,5 м, укладываемые в средней части плиты с равным удалением концов сетки от середины плиты. В плитах длиной до 10 м можно применять несплошное армирование. В плитах длиннее 10 м сетки размещают равномерно по ширине покрытия, не доводя до поперечных швов на 50 см.

При строительстве покрытий машинами со скользящими формами для армирования используют только продольные стержни, располагая их в середине покрытия.

Сборные покрытия. Конструкцию дорожной одежды со сборным покрытием определяют на основании типовых проектных решений (типовой проект Серии 503-0-42) с учетом имеющихся на месте дорожно-строительных материалов для устройства основания, а также исходя из назначения и условий работы плит в дорожной одежде.

Основание дорожной одежды со сборным покрытием, согласно методическим рекомендациям Росавтодора, рекомендуется устраивать из песка, шлака, из песка со слоем геотекстиля, сухой цементно-песчаной смеси и грунтов, укрепленных вяжущими.

Опыт эксплуатации сборных покрытий свидетельствует, что для обеспечения требуемого контакта плит с основанием поверх укреп-

ленных слоев основания целесообразно укладывать выравнивающий слой толщиной 3—5 см из смеси песка с цементом (в пропорции 8:1). В случае применения основания из гравийно-песчаных смесей устраивают выравнивающий слой из песка.

Колейные покрытия в виде полос бетона можно устраивать, согласно методическим рекомендациям Росавтодора, на временных дорогах с интенсивностью движения расчетной нагрузки менее 100 ед./сут. Толщину колеяного покрытия определяют расчетом, но принимают не ниже величин, указанных в табл. 25.5.

Таблица 25.5. Минимальные толщины колеяных бетонных покрытий

Основание	Толщина колеяного покрытия (см) при проектном классе бетона			
	B15	B20	B25	B30
Песчаное	20	19	18	17
Цементогрунтовое, шлаковосе, щебеночное толщиной 14 см	18	17	16	16

Асфальтобетонные покрытия на цементобетонном основании. Толщина слоя асфальто- и цементобетона определяют расчетом, но принимают не менее значений, приведенных в табл. 25.6.

Таблица 25.6. Минимальные толщины асфальтобетонных и цементобетонных покрытий

Класс бетона	Предел прочности бетона на растяжение при изгибе, МПа	Толщина (см) асфальтобетона и цементобетона (в знаменателе) при интенсивности движения расчетной нагрузки, авт/сут			
		более 2000	1000—2000	500—1000	100—500
B_{hb} 1,5	2,0	18/22	17/21	17/20	16/19
B_{hb} 1,75	2,5	18/19	18/18	18/17	16/17
B_{hb} 2,4	3,0	17/18	16,5/17	16,5/16	16/16
B_{hb} 2,8	3,5	16,5/17	16/17	16/16	14/16

Примечания: 1. Значения толщины соответствуют районам с суточным колебанием на поверхности покрытия $t = 15^\circ\text{C}$. При других значениях температуры вносятся (методические рекомендации Росавтодора) поправка к толщине. 2. При устройстве трещино-прерывающих слоев толщину слоя асфальтобетона уменьшают на 30%.

Асфальтобетонные покрытия устраивают одно-, двух- и трех-слойными. В слое цементобетонного основания поперечные швы устраивают как контрольные, без армирования, через 15 м.

Для повышения трещиностойкости асфальтобетонного покрытия его армируют над поперечными швами специальными сетками (сталь, стекловолокно, стеклопластик) шириной 80—160 см. Сетки размещают в слое асфальтобетона не ближе 8 см от поверхности покрытия.

25.4. Основные положения расчета жестких дорожных одежд

Дорожные одежды рассчитывают с учетом перспективной (к концу срока службы) интенсивности движения и состава транспортного потока, грунтовых и природно-климатических условий. Расчет выполняют по предельным состояниям, определяющим потерю работоспособности конструкции, основываясь на требованиях к жесткой дорожной одежде (см. § 25.2). Расчеты ведут, согласно методическим рекомендациям Росавтодора, путем проверок предварительно назначенной конструкции.

Нормативные и расчетные нагрузки. В соответствии с изменением № 5 СНиП 2.05.02—85* для расчета жестких дорожных одежд на дорогах общей сети I—II категорий в качестве нормативной принимают нагрузку от двухосного грузового автомобиля с давлением на заднюю наиболее нагруженную ось 115 кН, а на дорогах III—IV категорий — 100 кН. Для промышленных дорог нередко используют более высокие нагрузки, превышающие нормативную до 30% при соответствующем обосновании.

Расчетную нагрузку на колесо P_p принимают с учетом динамического воздействия и перегрузки автомобилей:

$$P_p = P_k K_d K_n, \quad (25.1)$$

где P_k — нормативная нагрузка на колесо, равная 57,5 кН для дорог I—II категорий и 50 кН — для дорог III—IV категорий; K_d — коэффициент динамичности, принимаемый в зависимости от осевой массы 10—12 т, равным соответственно 1,06—1,04; K_n — коэффициент перегрузки 1,25, принимаемый только для промышленных дорог.

В расчете учитывают долю суточной интенсивности, приходящуюся на расчетную наиболее загруженную полосу покрытия.

Приведение состава движения к расчетным нагрузкам осуществляют с использованием коэффициента K_i . Приведения автомобиля с нагрузкой P_i к нормативной P_k рассматривают по следующему выражению:

$$K_i = \left(\frac{P_i}{P_k} \right)^{4,4}. \quad (25.2)$$

Осевые нагрузки отдельных грузовых автомобилей в составе транспортного потока определяют из паспортных данных на автомобиль или пользуются данными соответствующих справочников.

Расчет монолитных цементобетонных покрытий. Покрытия рассчитывают из условия обеспечения требуемого качества производства работ и наличия полного контакта плит покрытия с основанием.

По исходным данным об ожидаемых размерах движения на проектируемой автомобильной дороге назначают толщину цементобетонного покрытия (см. табл. 25.2), длину плиты и необходимые расчетные характеристики материалов конструктивных слоев дорожной одежды и грунтов земляного полотна. Рассчитывают основание дорожной одежды методами, аналогичными принятым для нежестких дорожных одежд из условия прочности, морозоустойчивости и обеспечения водоотвода, и окончательно проверяют конструкцию на соответствие требованиям нормативного коэффициента прочности (см. табл. 25.1). При несоответствии рассчитываемой конструкции предъявляемым требованиям уточняют расчетные параметры конструкции и повторяют расчеты.

Расчетная прочность (трещиностойкость) и надежность покрытия в соответствии с методическими указаниями Росавтодора обеспечивается при следующем условии:

$$K_{пр} \leq \frac{R_{пр}}{\sigma_{пр}}, \quad (25.3)$$

где $\sigma_{пр}$ — напряжения растяжения при изгибе, возникающие в бетонном покрытии от совместного действия нагрузки и перепада температуры по толщине плиты; $R_{пр}$ — расчетная прочность бетона на растяжение при изгибе, определяемая с учетом нарастания прочности бетона во времени и коэффициента усталости бетона при повторном нагружении K_y :

$$R_{пр} = R_b K_{нп} K_y K_y; \quad K_y = 1,08 N_{пр}^{-0,063}, \quad (25.4)$$

где $K_{нп}$ — коэффициент нарастания прочности бетона ($K_{нп} = 1,2$); R_b — средняя прочность бетона на растяжение при изгибе, соответствующая принятому классу бетона по прочности B_b и принимаемая по табл. 25.7; K_y — коэффициент, учитывающий воздействие переменного замораживания-оттаивания, равный 0,95.

В качестве расчетного места приложения нагрузок рассматривают прилегающий к обочине внешний край середины плиты покрытия. Расчетную повторяемость нагружения на полосу покрытия N_{pr} определяют с учетом роста интенсивности движения во времени по геометрической прогрессии:

$$N_{pr} = N_1 n_c \frac{q^T - 1}{q - 1}, \quad (25.5)$$

где N_1 — среднегодовая интенсивность движения, приведенная к расчетным нагрузкам в первый год эксплуатации конструкции; n_c — количество дней в году с положительной температурой воздуха; q — показатель роста интенсивности движения ($q \geq 1$, обычно $1,03 \div 1,12$); T — расчетный срок службы покрытия (лет).

Т а б л и ц а 25.7. Средняя прочность бетона при расчете на растяжение при изгибе

Назначение слоя	Интенсивность движения расчетной нагрузки, ед/сут	Класс бетона по прочности на растяжение при изгибе	Средняя прочность R_{fb} , МПа
Однослойное покрытие или верхний слой двухслойного цементобетонного покрытия	Более 2000	B_{fb} 4,4	5,76
	1000—2000	B_{fb} 4,0	5,24
	500—1000	B_{fb} 3,6	4,72
	Менее 500	B_{fb} 3,2	4,19
Нижний слой двухслойного цементобетонного покрытия	Более 2000	B_{fb} 3,6	4,72
	1000—2000	B_{fb} 3,2	4,19
	500—1000	B_{fb} 2,8	3,67
	Менее 500	B_{fb} 2,4	3,14
Основание под цементобетонное покрытие	—	B_{fb} 0,8	1,05
		B_{fb} 1,2	1,57
		B_{fb} 1,6	2,09
Основание под асфальтобетонное покрытие	—	B_{fb} 1,6	2,09
		B_{fb} 3,6	4,72

П р и м е ч а н и е. Для покрытий и оснований используют тяжелый бетон, соответствующий требованиям ГОСТ 26633—91.

Температурные напряжения и напряжения от вертикальной нагрузки рассчитывают по формулам теории упругости для плит, лежащих на упругом основании или опирающихся на него частично. Напряжениями в плитах от сил сопротивления основания температурным перемещениям ввиду их малости пренебрегают для плит длиной менее 9 м.

Расчетное значение модуля упругости E выбирают в зависимости от используемого класса бетона по прочности по табл. 25.8.

Т а б л и ц а 25.8. Расчетные значения модулей упругости E

B_{fb}	4,4	4,0	3,6	3,2	2,8	2,4	1,6	1,2
E , МПа	36 000	33 000	32 000	30 000	28 000	26 000	19 000	16 000

Расчетные значения коэффициента Пуассона и коэффициента линейного температурного расширения бетона принимают соответственно равными $\mu = 0,2$ и $\alpha_t = 1 \cdot 10^{-5}$.

Расчетную прочность бетона на растяжение при изгибе уточняют с учетом нормативной надежности покрытия:

$$R_{рн}^* = R_{рн}(1 - b_r C_r),$$

где b_r — коэффициент, зависящий от заданного уровня надежности покрытия; C_r — коэффициент вариации прочности бетона на растяжение при изгибе, устанавливаемый по результатам испытания бетона.

Жесткие дорожные одежды рассчитывают на:

растяжение при изгибе;

активные напряжения сдвига в дренарующем слое;

допустимый упругий прогиб в расчетный период;

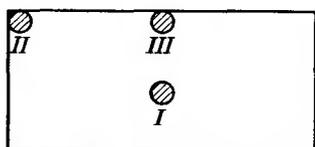
температурные напряжения.

Толщину плиты, полученную расчетом, увеличивают еще на 1 см для учета износа и неровностей.

25.5. Расчет цементобетонных плит на внешние нагрузки

Для расчета жестких дорожных одежд на внешние нагрузки используют методы строительной механики расчета балок и плит на упругом основании. Известные предложения разных авторов исходят из общего дифференциального уравнения, связывающего прогиб плиты под нагрузкой и осадку поверхности основания. Предложения разных авторов в связи с этим различаются главным образом разными видами функций, характеризующих отпор грунта. Наибольшее распространение получила гипотеза Винклера, согласно которой отпор грунтового основания пропорционален его осадке, и гипотеза линейно деформируемого полупространства теории упругости.

При расчетах плит на внешние нагрузки обычно рассматривают три схемы приложения нагрузки колеса автомобиля на прямоугольную плиту: в центре плиты, в середине края и на углу (рис. 25.3).



Р и с. 25.3. Схемы приложения нагрузки колеса автомобиля на прямоугольную плиту

В одиночной прямоугольной бетонной плите наибольшие напряжения возникают при приложении расчетной нагрузки на угол и в середине края.

С точки зрения расчета толщины цементобетонной плиты от нагрузки спаренного колеса расчетного автомобиля (именно эта схема и используется при расчетах жестких покрытий автомобильных дорог), физически наиболее обоснованным является решение проф. И.А. Медникова, дающее возможность расчета жестких одежд для любой схемы приложения расчетной нагрузки:

колесо в центре плиты

$$h = \sqrt{0,275(1 + \mu_6) \frac{P}{10,2R_{\text{пр}}} \alpha_0 K_{\text{н}}}; \quad (25.6)$$

колесо в середине края плиты

$$h = \sqrt{0,529(1 + 0,54\mu_6) \frac{P}{10,2R_{\text{пр}}} (\alpha_0 - 0,71) K_{\text{н}}}; \quad (25.7)$$

колесо на углу плиты

$$h = \sqrt{3 \frac{P}{10,2R_{\text{пр}}} \left\{ 1 - 1,23 \left[\frac{12(1 - \mu_6^2)}{10\alpha_0} \right]^{0,15} \right\} K_{\text{н}}}; \quad (25.8)$$

где h — толщина плиты, см; μ_6 — коэффициент Пуассона для бетона (обычно $\mu_6 = 0,15 - 0,2$); $P = p\pi R^2$ — равнодействующая равномерно распределенного давления пневматика; $R = D_{\text{д}}/2$ — радиус эквивалентного отпечатка пневматика расчетного автомобиля; p — давление пневматика, МПа; $R_{\text{пр}}$ — прочность бетона на растяжение при изгибе, МПа, определяемая по формуле (25.4); $K_{\text{н}} = K_6 K_y K_0 K_b$ — нормативный коэффициент увеличения изгибающих моментов; K_6 — коэффициент условий работы цементобетона в дорожном покрытии, учитывающий температурные напряжения и влияние зазоров в периферийной части плит, образующихся между плитой и основанием (табл. 25.9); $K_y = 1,08 (N_{\text{пр}})^{-0,063}$ — коэффициент, учитывающий влияние усталости бетона при повторяющихся нагружениях; $N_{\text{пр}}$ — расчетная повторяемость нагружения на полосу покрытия, определяемая по формуле (25.5); $K_0 = 0,80$ — коэффициент неоднородности

бетона по прочности; $K_b = 1,25$ — коэффициент, учитывающий увеличение прочности бетона к концу срока службы покрытия; α_0 — коэффициент, зависящий от отношений E_6/E_0 и h/R (табл. 25.10); E_0 — модуль упругости грунта (см. табл. 23.5).

Расчетные формулы (25.6)—(25.8) решают подбором и они действительны при $h/R \geq 0,5$.

Таблица 25.9. Значения коэффициентов условий работы цементобетона K_6

Толщина плиты h , см	Значения K_6 в дорожно-климатических зонах	
	II	V
20	0,84	0,80
22	0,76	0,73
24	0,67	0,65

Таблица 25.10. Значения коэффициентов α_0

E_6/E_0	Коэффициенты α_0 при отношении h/R								
	2,0	1,8	1,6	1,4	1,2	1,0	0,8	0,6	0,5
2000	5,50	5,26	5,06	4,85	4,58	4,30	3,89	3,42	3,14
1500	5,29	5,15	4,94	4,73	4,46	4,12	3,70	3,29	3,01
1000	5,11	4,92	4,72	4,46	4,21	3,86	3,51	3,08	2,79
800	4,97	4,77	4,55	4,35	4,05	3,72	3,39	2,96	2,66
600	4,79	4,62	4,41	4,16	3,87	3,56	3,24	2,80	2,52
400	4,55	4,36	4,15	3,84	3,65	3,38	3,04	2,58	2,29
300	4,38	4,22	3,99	3,74	3,52	3,24	2,90	2,44	2,14
200	4,16	3,95	3,74	3,54	3,31	3,03	2,68	2,21	1,92
150	3,96	3,77	3,57	3,38	3,15	2,88	2,53	2,05	1,77
100	3,74	3,56	3,41	3,20	2,97	2,67	2,32	1,84	1,58
80	3,60	3,45	3,28	3,06	2,85	2,55	2,18	1,73	1,46

Результаты систематических наблюдений на дорогах и испытания покрытий на опытных участках показывают, что жесткие дорожные одежды, рассчитанные из предположения об упругом характере деформаций одежд и подстилающего грунта, все же подвержены трещинообразованию. Развитие трещин в жестких покрытиях автомобильных дорог связано прежде всего с недостаточно обоснованным учетом работы грунтового основания, учетом особенностей динами-

ческих воздействий подвижных нагрузок и многократности их воздействия.

В связи с этим в последнее время появились предложения рассчитывать жесткие дорожные одежды с использованием следующих обязательных принципов:

при статических расчетах жестких конструкций взамен модели грунтового основания по схеме упругого полупространства использовать модель местных деформаций (модель Винклера), поскольку модель упругого полупространства преувеличивает распределительную площадь нагрузки на грунтовое основание, особенно в расчетный весенний период;

выполнять динамические расчеты покрытий при воздействии подвижных нагрузок с целью определения действительных напряжений в покрытиях и параметров грунтового основания (коэффициентов сцепления и трения) с учетом снижения их нормативных значений, определяемых динамическим воздействием подвижных нагрузок;

учитывать интенсивность движения автомобилей, поскольку в результате многократного приложения нагрузок появляются остаточные осадки основания и образуются зазоры на контактах плиты с грунтовым основанием. Таким образом, плита, имеющая непрерывный контакт с основанием при первых проходах нагрузки, превращается в плиту, частично контактирующую с основанием при дальнейшем ее приложении, что приводит к существенному возрастанию изгибающих моментов, не учитываемому современными расчетами.

Учет при проектировании фактических условий работы жестких дорожных покрытий и грунтового основания позволяет существенно повысить надежность и долговечность дорожных цементобетонных покрытий.

25.6. Расчет жестких дорожных одежд на температурные напряжения

В ходе изменений температуры в цементобетонных плитах жестких дорожных одежд возникают температурные напряжения, которые могут привести к появлению температурных трещин. Различают два вида температурных напряжений:

напряжения, связанные с изменением длины плит в результате нагревания или охлаждения от сопротивления перемещению сил трения, сцепления, а в отдельных случаях и смерзания, возникающих при взаимодействии плиты с основанием (рис. 25.4);

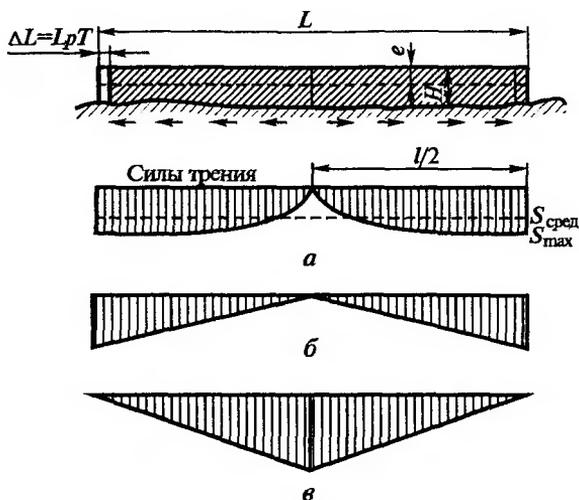


Рис 25.4. Схема к расчету плиты на температурные напряжения:

а — возникновение сил трения по подошве плиты; *б* — эпюра сопротивления грунта сдвигу под действием плиты; *в* — изменение сопротивления сдвигу по мере деформации

напряжения, связанные с короблением плит в связи с неравномерным распределением температуры по толщине плиты, возникающим в результате противодействия собственного веса и в связи с заклиной краев в швах (рис. 25.5).

При температурном сжатии или расширении плиты ее центр практически остается на месте, а края перемещаются, в результате чего абсолютное значение деформаций нарастает от центра плиты к ее краям. При этом в центре ее возникают опасные напряжения внецентренного сжатия (см. рис. 25.4, в).

При понижении температуры происходит укорочение плиты и появляются растягивающие напряжения в нижней зоне. Этот случай является расчетным, так как возникающие растягивающие напряжения в нижней части плиты при понижении температуры в 2 раза больше растягивающих напряжений в верхней ее части в случае удлинения плиты при повышении температуры. Кроме того, напряжения, возникающие при понижении температуры в нижней зоне, имеют тот же знак и суммируются с напряжениями от внешней нагрузки. При укорочении плиты перемещения возраст-

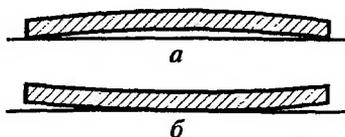


Рис 25.5. Схема температурного коробления плиты:

а — днем; *б* — ночью

тают от середины плиты до максимального значения на краях по прямой зависимости (см. рис. 25.4, б). Температурным перемещениям плиты препятствуют силы трения, сцепления и в ряде случаев смерзания между цементобетонной плитой и основанием. При этом силы сопротивления перемещению нарастают от нуля в центре плиты по параболическому закону (согласно предложению проф. В.Ф. Бабкова) до сечения, в котором происходит срыв плиты при некоторых значениях перемещений. За пределами этих сечений силы трения остаются практически постоянными (см. рис. 25.4, а). Растягивающие напряжения по нижним волокнам плит, возникающие при этом, имеют максимальное значение в центре плиты и равны нулю на краях ее.

Расчет плиты для этого случая температурных деформаций сводится к определению такой наибольшей ее длины, при которой напряжения, возникающие от совместного действия подвижной нагрузки и температурных деформаций, не превысят допустимые растягивающие напряжения в бетоне $R_{\text{рн}}$, определяемые по формуле (25.4). Максимальная длины плиты, по формуле проф. В.Ф. Бабкова:

$$L = \frac{10,2\sigma_{\tau} h}{1,4(h\gamma_6 f' + 10,2c)},$$

где $\sigma_{\tau} = 0,3 R_{\text{рн}}$ — максимально допустимые растягивающие температурные напряжения в бетоне, назначаемые с учетом возможного совпадения с напряжениями от подвижной нагрузки и принимаемые равными 30% от предела прочности $R_{\text{рн}}$, МПа; h — толщина плиты, см; γ_6 — плотность цементобетона, кг/см³ ($\gamma_6 = 0,0023$); f' — коэффициент трения плиты по материалу основания; c — сцепление, МПа.

Значения коэффициентов трения f' и сцепления грунта основания c принимают по опытным данным проф. Б.С. Раева—Богословского (табл. 25.11).

При нагревании поверхности плиты солнечными лучами и охлаждении ее ночью возникает разница температур верхней и нижней поверхностей плит, достигающая в отдельных случаях 20°. Более нагретая поверхность плиты испытывает удлинение, в результате чего происходит коробление плиты. При этом в случае нагревания поверхности плиты она выпучивается верхней частью вверх (см. рис. 25.5, а), а при охлаждении образует вогнутую поверхность с приподнятыми краями (см. рис. 25.5, б). Однако свободному короблению плиты препятствуют собственный ее вес и заклинка в температурных швах ввиду наличия соединительных штырей.

Т а б л и ц а 25.11. Значения коэффициентов трения и сцепления

Материал основания	Коэффициенты	
	трения f'	сцепления c , МПа
Песок крупный	0,91—1,10	—
» среднезернистый	0,66—0,92	—
» мелкозернистый и пылеватый	0,51—0,66	—
Супесь сухая	0,44—0,56	0,10—0,20
» влажная	0,44—0,56	0,05—0,10
Суглинок сухой	0,32—0,44	0,25—0,40
» влажный	0,32—0,44	0,05—0,10
Глина сухая	0,10—0,25	0,60—1,00
» влажная	0,10—0,25	0—0,50
Крупный песок и гравий	0,80—1,20	—
Галька, щебень	1,00—1,40	—

Температурные напряжения, возникающие в результате коробления плит в связи с разницей температур на верхней и нижней их поверхностях, определяют исходя из невозможности коробления с достаточной для практики точностью по формулам Х. Уэстергарда:

$$\sigma_y = \sigma_0 \left\{ 1 - \frac{2 \cos \lambda \operatorname{ch} \lambda}{\sin 2\lambda + \operatorname{ch} \lambda} \left[(\operatorname{tg} \lambda + \operatorname{th} \lambda) \cos \frac{y}{l\sqrt{2}} \operatorname{ch} \frac{y}{l\sqrt{2}} + (\operatorname{tg} \lambda - \operatorname{th} \lambda) \sin \frac{y}{l\sqrt{2}} \operatorname{ch} \frac{y}{l\sqrt{2}} \right] \right\};$$

$$\sigma_0 = \frac{E_6 \varepsilon_t \Delta t}{2(1 - \mu_6)};$$

$$\sigma_x = \sigma_0 + \mu_6 (\sigma_y - \sigma_0);$$

$$\lambda = \frac{b}{l\sqrt{8}};$$

$$l = 0,6h \sqrt{\frac{E_6}{E_0}},$$

где σ_x и σ_y — температурные напряжения коробления соответственно в продольном и поперечном направлениях, МПа; σ_0 — напряжения температурного коробления в плите бесконечной в плане, МПа; E_6 — модуль упругости бетона, МПа; E_0 — модуль упругости грунта, МПа;

ϵ_t — коэффициент температурного расширения бетона (обычно $\epsilon_t = 0,00001$); Δt — разница температур верхней и нижней поверхностей плиты; $\mu_6 = 0,15$ — коэффициент Пуассона для бетона; l — упругая характеристика плиты; b — ширина плиты, м; h — толщина плиты, м.

В правильно запроектированных жестких покрытиях дополнительные напряжения в связи с короблением плит не должны превышать 20—30% нормативной прочности бетона на растяжение при изгибе для случая охлаждения плит ночью, когда напряжения от внешней нагрузки совпадают по знаку и суммируются с напряжениями коробления. Более точный метод расчета жестких покрытий на температурные напряжения разработан проф. Л.И. Горецким.

В связи с возможностями современной компьютерной техники в последние годы появились расчетные математические модели жестких одежд, максимально учитывающие реальные условия работы покрытий. Так, в настоящее время реализована расчетная математическая модель работы жестких дорожных одежд и аэродромных покрытий на основе использования энергетического принципа — минимума потенциальной энергии конструкции. В качестве аппарата решения указанной задачи использован численный метод локальных вариаций, практическая реализация которого немислима без использования компьютерной техники. При этом рассматривается выражение потенциальной энергии системы «плита — основание — внешнее воздействие» с учетом силовых и температурных факторов.

Модель учитывает основные расчетные схемы нагружения (рис. 25.6), соответствующие приложению нагрузки P в центре плиты, на середине края и на углу. Рассмотренные схемы пригодны для расчета бесконечной, полубесконечной и четвертьбесконечной плит для случая, когда размеры a и b расчетной плиты удовлетворяют условиям:

при действии только силовой нагрузки $\min(a, b) \geq 2l$;

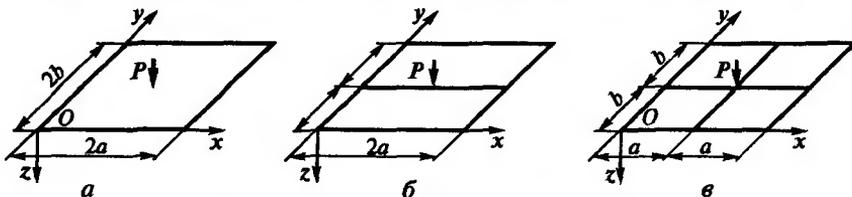


Рис. 25.6. Расчетные схемы при нагружениях:

a — центральном; b — краевом; v — угловом

при совместном силовом и температурном воздействии $\min(a, b) \geq 5,5l$ (где l — упругая характеристика плиты для модели основания типа Винклера):

$$l = \sqrt[4]{\frac{E_6 h^3}{12C(1-\mu_6^2)}},$$

где C — коэффициент постели основания.

Использование этого единого численного алгоритма при автоматизированном проектировании дорожных одежд позволяет моделировать работу жестких конструкций для любых расчетных ситуаций (при центральном, краевом и угловом нагружениях, как при температурном короблении, так и при его отсутствии, а также для различных моделей основания и прежде всего для моделей с односторонней связью, т.е. упругой при сжатии и отсутствующей, когда усилия равны нулю или отрицательны).

25.7. Упрощенный расчет толщины цементобетонных покрытий

В практике проектирования автомобильных дорог нередко возникает потребность в быстрой оценке необходимой ориентировочной толщины цементобетонных покрытий, не прибегая к изложенным выше многодельным расчетам. Схема упрощенного расчета толщины цементобетонных покрытий, предложенная проф. О.В. Андреевым, следующая.

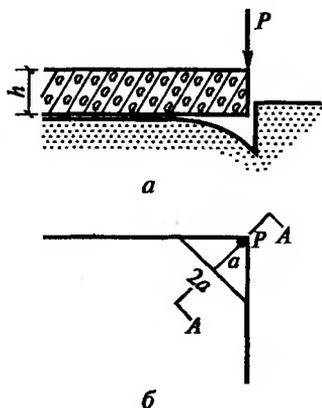
1. Если рассмотреть случай возможной потери упругого основания под углом плиты, когда может наступить его облом, что может случиться в случае вдавливания угла в грунт или песчаный фильтр (рис. 25.7), то напряжение при изгибе составит:

$$\sigma_{\text{и}} = \frac{M}{W}, \quad (25.9)$$

где $M = \alpha P$ — изгибающий момент в сечении возможного облома;
 $W = \frac{2ah^2}{6} = \frac{ah^2}{3}$ — момент инерции сечения.

Тогда из формулы (25.9) следует:

$$\sigma_{\text{и}} = \frac{3P}{h^2} = \frac{\alpha P}{h^2}. \quad (25.10)$$



Р и с. 25.7. Схема к упрощенному расчету толщины цементобетонных покрытий:

a — схема потери упругого основания; b — план

Выражение (25.10) — общая формула проф. И.А. Медникова, независимо от места приложения нагрузки, верна также и для случая сохранения упругого основания.

Если в формуле (25.10) проф. И.А. Медникова $\sigma_{и}$ заменить на допустимые растягивающие напряжения при изгибе $R_{ри}$, определяемые по формуле (25.4), то необходимую толщину цементобетонного по-

крытия окончательно получим

$$h = \sqrt{\frac{\alpha P}{R_{ри}}}. \quad (25.11)$$

Как следует из выражения (25.10), для случая потери упругого основания на углу плиты $\alpha = 3,0$.

2. По И.А. Медникову, для случая сохранения упругого основания в зависимости от места приложения нагрузки для определения расчетной толщины цементобетонного покрытия по формуле (25.11) получим при обычных соотношениях h/D и E_6/E_0 :

в центре плиты $\alpha = 1,21$;

в середине края $\alpha = 1,80$;

в углу плиты $\alpha = 1,57$.

3. Для случая потери упругого основания самым опасным является случай приложения расчетной нагрузки в углу плиты, в случае сохранения упругого основания самым опасным является случай приложения расчетной нагрузки в середине края. Для того чтобы рассчитывать толщины цементобетонных плит h по $\alpha = 1,80$, а не по $\alpha = 3,0$ для передачи нагрузки «с угла на угол» в поперечных швах расширения и сжатия, необходимо предусматривать металлические штыри.

СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

Бабков В.Ф., Андреев О.В. Проектирование автомобильных дорог. Ч. 1. 2-е изд. перераб. и доп. М.: Транспорт, 1987.

Бабков В.Ф. Ландшафтное проектирование автомобильных дорог. М.: Транспорт, 1980.

Бабков В.Ф. Дорожные условия и безопасность движения. М.: Транспорт, 1982.

Безбородова Г.Б., Галушко В.Г. Моделирование движения автомобиля. Киев: Вища школа, 1978.

Беллман Р. Динамическое программирование. М.: Иностранная литература, 1960.

Богомолов А.И., Михайлов К.А. Гидравлика. М.: Стройиздат, 1972.

Бойков В.Н., Федотов Г.А., Пуркин В.И. Автоматизированное проектирование автомобильных дорог на примере IndorCAD/Road. М.: МАДИ(ГТУ), 2005.

Бусленко Н.П. Моделирование сложных систем. М.: Наука, 1968.

Краткий автомобильный справочник/А.Н. Понизовкин и др. М.: АО «Трансконсалтинг», НИИАТ, 1994.

Моисеев Н.И., Иванюков Ю.П., Столярова Е.М. Методы оптимизации. М.: Наука, 1978.

Горецкий Л.И. Теория и расчет цементобетонных покрытий на температурные напряжения. М.: Транспорт, 1965.

Дорожные одежды автомобильных дорог общей сети Союза ССР. Серия 503-0-11. М.: Союздорпроект, 1976.

Дрю Д.Р. Теория транспортных потоков и управление ими. М.: Транспорт, 1972.

Классификация автомобильных дорог. Основные параметры и требования. ГОСТ Р 52398—2005. М.: Стандартинформ, 2005.

Кучмент Л.С. Модели процессов формирования речного стока. Л.: Гидрометеоздат, 1980.

Лобанов Е.М. Проектирование дорог и организация движения с учетом психофизиологии водителя. М.: Транспорт, 1980.

Маслов Н.Н. Механика грунтов в практике строительства. М.: Стройиздат, 1977.

Методические рекомендации по проектированию геометрических элементов автомобильных дорог общего пользования. М.: ФГУП «Иформавтодор», 2003.

Методические рекомендации по проектированию жестких дорожных одежд. М.: ФГУП «Информавтодор», 2004.

Проектирование автомобильных дорог. Справочник инженера-дорожника/Под ред. д-ра техн. наук Г.А. Федотова. М.: Транспорт, 1989.

Сегерлинд Л. Применение метода конечных элементов. М.: Мир, 1979.

Сильянов В.В. Теория транспортных потоков в проектировании дорог и организации движения. М.: Транспорт, 1977.

Сильянов В.В. Транспортно-эксплуатационные качества автомобильных дорог. М.: Транспорт, 1984.

Справочная энциклопедия дорожника. Т. 5. Проектирование автомобильных дорог/Под ред. заслуженного деятеля науки и техники РСФСР, д-ра техн. наук, проф. Г.А. Федотова и д-ра техн. наук, проф. П.И. Поспелова. М.: ФГУП «Информавтодор», 2007.

Стенбринк П.А. Оптимизация транспортных сетей. М.: Транспорт, 1981.

Стренг Г. Линейная алгебра и ее применение. М.: Мир, 1980.

Строительные нормы и правила. Автомобильные дороги. Нормы проектирования (СНиП 2.05.02—85). М.: Стройиздат, 1986.

Уайт Д. Оптимальное проектирование. М.: Мир, 1981.

Федотов Г.А. Автоматизированное проектирование автомобильных дорог. М.: Транспорт, 1986.

Химмельблау Д. Прикладное нелинейное программирование. М.: Мир, 1975.

Хомяк Я.В. Проектирование сетей автомобильных дорог. М.: Транспорт, 1983.

Цветков В.Я. Геоинформационные системы и технологии. М.: Финансы и статистика, 1998.

Оглавление

Предисловие	3
РАЗДЕЛ ПЕРВЫЙ. АВТОМОБИЛЬНЫЕ ДОРОГИ И ИХ РОЛЬ В НАРОДНОМ ХОЗЯЙСТВЕ	
Глава 1. Общие понятия об автомобильных дорогах	13
1.1. Единая транспортная сеть страны	13
1.2. Роль автомобильных дорог и автомобильного транспорта в экономике и социальном развитии страны	17
1.3. Сеть автомобильных дорог	18
1.4. Подвижной состав автомобильных дорог	20
1.5. Основные характеристики движения по автомобильным дорогам	22
1.6. Классификация автомобильных дорог	26
Глава 2. Элементы автомобильных дорог и сооружений на них	29
2.1. Основные элементы автомобильных дорог	29
2.2. Элементы плана автомобильных дорог	32
2.3. Элементы поперечных профилей	34
2.4. Элементы продольного профиля	37
Глава 3. Движение автомобиля по дороге	43
3.1. Уравнение тягового баланса автомобиля	43
3.2. Сопротивления движению автомобиля	45
3.3. Сцепление колеса с покрытием	50
3.4. Задачи, решаемые с использованием уравнения тягового баланса	53
3.5. Торможение автомобиля	59
3.6. Тяговые расчеты автопоездов	62
3.7. Расчетное расстояние видимости на дорогах	64
Глава 4. Закономерности движения транспортных потоков	68
4.1. Транспортный поток и режимы его движения	68
4.2. Скоростные характеристики движения автомобилей	71
4.3. Математическое моделирование транспортных потоков	74
4.4. Пропускная способность дороги	79
	641

Глава 5. Кривые автомобильных дорог в плане	82
5.1. Движение автомобиля по кривой	82
5.2. Коэффициент поперечной силы и его нормирование	84
5.3. Определение радиусов горизонтальных кривых	86
5.4. Переходные кривые и их типы.	89
5.5. Уширение проезжей части на кривых.	93
5.6. Вирази	96
5.7. Обеспечение видимости на кривых в плане	99
Глава 6. Поперечные профили дорог	103
6.1. Обоснование ширины проезжей части и обочин	103
6.2. Остановочные и переходно-скоростные полосы	112
6.3. Поперечные уклоны	114
6.4. Велосипедные дорожки, тротуары и бордюры	116
6.5. Полоса отвода	117
Глава 7. Продольный профиль автомобильных дорог	120
7.1. Типы вертикальных кривых.	120
7.2. Нормирование продольных уклонов	122
7.3. Обоснование минимальных радиусов вертикальных кривых.	122
Глава 8. Нормы проектирования автомобильных дорог	126
8.1. История развития.	126
8.2. Современные нормы проектирования автомобильных дорог.	130
8.3. Расчетные скорости и нагрузки.	131
8.4. Категория автомобильных дорог	133
8.5. Мероприятия по охране окружающей среды.	134
 РАЗДЕЛ ВТОРОЙ. ПОНЯТИЕ О СОВРЕМЕННОЙ ТЕХНОЛОГИИ ПРОИЗВОДСТВА ПРОЕКТНЫХ РАБОТ	
Глава 9. Принципиальные основы построения систем автоматизированного проектирования автомобильных дорог и сооружений на них (САПР-АД)	141
9.1. Понятие о системах автоматизированного проектирования (САПР)	141
9.2. Средства обеспечения САПР	145
9.3. Функциональная структура САПР	150
9.4. Принципы оптимизации и моделирования при проектировании автомобильных дорог	153
9.5. Понятие о геоинформационных системах (ГИС)	158
Глава 10. Технология производства проектных работ при системном автоматизированном проектировании	161
10.1. ГИС-технологии в автоматизированном проектировании	161
10.2. Цифровое и математическое моделирование местности.	165
10.3. Виды цифровых моделей местности (ЦММ)	166
10.4. Методы построения цифровых моделей местности и их точность	170
10.5. Математические модели местности (МММ).	173

10.6. Задачи, решаемые с использованием цифровых и математических моделей.	176
10.7. Технология автоматизированного проектирования автомобильных дорог	177
Глава 11. Система автоматизированного проектирования CAD «CREDO»	181
11.1. История развития	181
11.2. Функциональная структура подсистемы «Линейные изыскания»	182
11.3. Функциональная структура подсистемы «Дороги»	183
Глава 12. Система автоматизированного проектирования «IndorCAD/Road»	187
12.1. История развития	187
12.2. Функциональная структура системы автоматизированного проектирования «IndorCad/Road». Раздел «План».	190
12.3. Раздел «Продольный профиль»	191
12.4. Раздел «Верх земляного полотна»	192
12.5. Раздел «Поперечный профиль»	192
12.6. Графический редактор «IndorDrawing»	194

РАЗДЕЛ ТРЕТИЙ. УЧЕТ ПРИРОДНЫХ ФАКТОРОВ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ

Глава 13. Природные факторы и их влияние на функционирование дороги	196
13.1. Основные природные факторы, учитываемые при проектировании	196
13.2. Источники увлажнения земляного полотна	202
13.3. Водно-тепловой режим земляного полотна	204
13.4. Прогноз пучинообразования	205
13.5. Дорожно-климатическое районирование	213
13.6. Обоснование возвышения бровки земляного полотна над поверхностью грунта.	218
13.7. Регулирование водно-теплого режима земляного полотна	221
Глава 14. Прогноз поверхностного стока с водосборов	222
14.1. Виды поверхностного стока	222
14.2. Расчет ливневого стока с малых водосборов	226
14.3. Расчет стока талых вод с малых водосборов	233
14.4. Математическое моделирование стока с водосборов.	236
14.5. Региональные нормы стока	247

РАЗДЕЛ ЧЕТВЕРТЫЙ. СИСТЕМА ДОРОЖНОГО ВОДООТВОДА

Глава 15. Дорожный водоотвод	255
15.1. Система поверхностного и подземного дорожного водоотвода.	255
15.2. Нормы допускаемых скоростей течения	267
15.3. Гидравлический расчет дорожных канав.	274
15.4. Косогорные сооружения поверхностного водоотвода.	278
15.5. Расчет дренажа.	283

Глава 16. Малые водопропускные сооружения	286
16.1. Виды малых водопропускных сооружений и требования к ним	286
16.2. Расчет пропускной способности дорожных труб	290
16.3. Пропускная способность малых мостов	299
16.4. Расчет размывов и укреплений русел за трубами и малыми мостами	300
16.5. Математическое моделирование работы водопропускных труб и малых мостов	306
16.6. Учет аккумуляции части стока перед трубами и малыми мостами	312
16.7. Проектирование оптимальных водопропускных труб	319

РАЗДЕЛ ПЯТЫЙ. ТРАССА АВТОМОБИЛЬНОЙ ДОРОГИ

Глава 17. Проектирование плана трассы	326
17.1. Основные правила трассирования автомобильных дорог	326
17.2. Учет природных условий при выборе направления трассы	327
17.3. Положение трассы на местности	330
17.4. Принципы трассирования	331
17.5. Элементы клотоидной трассы	334
17.6. Метод «опорных элементов»	336
17.7. Метод «сглаживания эскизной линии трассы»	341
17.8. Сплайн-трассирование	344
Глава 18. Определение положения проектной линии продольного профиля	347
18.1. Принципы проектирования продольного профиля автомобильных дорог	347
18.2. Критерии оптимальности	349
18.3. Комплекс технических ограничений	353
18.4. Техника традиционного проектирования продольного профиля	354
18.5. Метод «опорных точек»	358
18.6. Метод «проекции градиента»	360
18.7. Метод «граничных итераций»	363
18.8. Методы «свободной геометрии»	372
Глава 19. Архитектурно-ландшафтное проектирование автомобильных дорог	377
19.1. Цели и задачи ландшафтного проектирования	377
19.2. Согласование элементов трассы с ландшафтом	381
19.3. Особенности трассирования автомобильных дорог в характерных ландшафтах	383
19.4. Согласование земельного полотна с ландшафтом	392
19.5. Правила обеспечения зрительной плавности и ясности трассы	395
19.6. Построение перспективных изображений автомобильных дорог	406
19.7. Перцептивные изображения автомобильных дорог	411
Глава 20. Пересечения и примыкания автомобильных дорог	414
20.1. Общие положения по проектированию пересечений и примыканий автомобильных дорог в одном уровне	414
20.2. Классификация пересечений автомобильных дорог в разных уровнях	419

20.3. Элементы пересечений автомобильных дорог в разных уровнях . . .	425
20.4. Анализ условий пересечений при проектировании транспортных развязок.	429
20.5. Пропускная способность развязок в разных уровнях и оценка безопасности движения	434
20.6. Принципы конструктивного решения участков ответвлений и примыканий на съездах развязок движения	441
20.7. Переходные кривые на развязках движения, требования к ним и методы их расчета	445
20.8. Расчеты элементов соединительных съездов.	452
20.9. Проектирование продольного профиля по соединительным съездам	467
20.10. Плано-высотные решения соединительных съездов	470
Глава 21. Оборудование и обустройство автомобильных дорог.	474
21.1. Обслуживание дорожного движения	474
21.2. Дорожные знаки	483
21.3. Дорожная разметка	489
21.4. Направляющие устройства	493
21.5. Дорожные ограждения	495
21.6. Освещение автомобильных дорог	499

РАЗДЕЛ ШЕСТОЙ. ЗЕМЛЯНОЕ ПОЛОТНО И ДОРОЖНЫЕ ОДЕЖДЫ

Глава 22. Проектирование земляного полотна дорог.	504
22.1. Элементы земляного полотна и общие требования к нему	504
22.2. Грунты для возведения земляного полотна	507
22.3. Виды деформаций земляного полотна и грунтового основания. . .	512
22.4. Устойчивость земляного полотна на косогоре	515
22.5. Расчет осадки земляного полотна на слабом основании	517
22.6. Расчет скорости осадки насыпи на слабом основании. Регулирование скорости осадки	523
22.7. Расчет общей устойчивости откосов земляного полотна	528
22.8. Расчет хода глубины промерзания и оттаивания грунта	535
22.9. Метод конечных элементов (МКЭ) при проектировании земляного полотна	538
Глава 23. Конструирование дорожных одежд.	542
23.1. Общие сведения о дорожных одеждах	542
23.2. Конструктивные слои дорожных одежд и их назначение.	545
23.3. Основные типы дорожных одежд	548
23.4. Принципы конструирования дорожных одежд	552
23.5. Прочностные характеристики грунтов и материалов конструктивных слоев.	557
Глава 24. Конструктивные расчеты нежестких дорожных одежд.	568
24.1. Нагрузки на дорожную одежду	568
	645

24.2. Расчеты нежестких дорожных одежд на прочность	575
24.3. Расчет нежестких дорожных одежд по допускаемому упругому прогибу	579
24.4. Расчет несвязных конструктивных слоев и подстилающего грунта на устойчивость против сдвига	584
24.5. Расчет конструктивных материалов на сопротивление монолитных слоев усталостному разрушению от растяжения при изгибе	588
24.6. Обеспечение морозоустойчивости дорожных одежд	592
24.7. Осушение дорожной одежды и земляного полотна	598
24.8. Особенности автоматизированного проектирования оптимальных нежестких дорожных одежд	608
24.9. Проектирование оптимальных нежестких дорожных одежд	610
Глава 25. Конструктивные расчеты жестких дорожных покрытий и оснований	614
25.1. Область применения и основные виды жестких дорожных покрытий	614
25.2. Общие требования к жестким дорожным одеждам	616
25.3. Особенности конструкций жестких дорожных одежд	620
25.4. Основные положения расчета жестких дорожных одежд	626
25.5. Расчет цементобетонных плит на внешние нагрузки	629
25.6. Расчет жестких дорожных одежд на температурные напряжения	632
25.7. Упрощенный расчет толщины цементобетонных покрытий	637
Список рекомендуемой литературы	639

Учебное издание

**Федотов Григорий Афанасьевич,
Поспелов Павел Иванович**

**ИЗЫСКАНИЯ И ПРОЕКТИРОВАНИЕ
АВТОМОБИЛЬНЫХ ДОРОГ**

В 2 книгах

Книга 1

Редактор *Л.А. Савина*
Внешнее оформление *К.И. Мандель*
Технический редактор *Л.А. Маркова*
Корректор *Г.Н. Петрова*
Компьютерная верстка *Е.М. Есаковой*

Изд. № РЕНТ-545. Подп. в печать 16.06.09. Формат 60 × 88¹/₁₆.
Бум. офсетная. Гарнитура «Ньютон». Печать офсетная.
Объем 39,69 усл. печ. л. 40,43 усл. кр.-отт.
Тираж 4000 экз. Заказ № 1305.

ОАО «Издательство «Высшая школа»,
127994, Москва, Неглинная ул., 29/14, стр. 1.
Тел.: (495) 694-04-56
<http://www.vshkola.ru>. E-mail: info_vshkola@mail.ru

Отдел реализации: (495) 694-07-69, 694-31-47, факс: (495) 694-34-86
E-mail: sales_vshkola@mail.ru

Отпечатано в ООО «Великолукская городская типография».
182100, Псковская область, г. Великие Луки, ул. Полиграфистов, 78/12
Тел./факс: (811-53) 3-62-95. E-mail: zakaz@veltip.ru

В издательстве «Высшая школа» имеются в продаже:

Перфилов В.Ф., Скогорова Р.Н., Усова Н.В. Геодезия: Учебник. — 3-е изд., перераб. и доп. — 2008. — 350 с.: ил.

В книге дано описание принципов работы современных геодезических приборов и инструментов, геодезических и фотограмметрических работ при изысканиях, проектировании, строительстве и эксплуатации архитектурных сооружений, освещены основы обмеров зданий и сооружений геодезическими и фотограмметрическими методами.

Рассмотрено содержание информационных систем ГИС градостроительно-земельного и других кадастров, цели и задачи кадастрового деления территории, а также виды кадастровых съемок и составление кадастровых карт. Особое внимание уделено новейшим цифровым фотограмметрическим системам, применяемым в процессе исследования и обмеров памятников архитектуры при их реставрации и реконструкции.

Для студентов архитектурно-строительных вузов.

Федотов Г.А. Инженерная геодезия: Учебник. — 4-е изд., стер. — 2007. — 463 с.: ил.

В учебнике изложены основы инженерной геодезии, показано ее значение в экономике. В отличие от ранее изданных учебников, в настоящем издании кроме традиционных сведений по инженерной геодезии впервые дана информация по их электронным аналогам — электронным картам, используемым в географических информационных системах ГИС, а также цифровым и математическим моделям местности, являющимся основой современного системного автоматизированного проектирования инженерных сооружений САПР.

Обобщен опыт работ ведущих проектно-изыскательских организаций России при изысканиях и строительстве автомобильных дорог и сооружений на них.

Для студентов автомобильно-дорожных и строительных специальностей вузов.

Потапов А.Д., Ревелис И.Л. Землетрясения: причины и последствия: Учеб. пособие. — 2008. — 7 л.: ил.

В книге изложены основные закономерности и причины сейсмических процессов и явлений в ряду природных стихийных бедствий, дана классификация землетрясений, оценка сейсмической опасности, обоснована необходимость подготовки к землетрясениям на различных уровнях, а также приведены конкретные примеры действий по локализации и устранению последствий землетрясений и сопутствующих негативных природных и техногенных чрезвычайных ситуаций.

Для студентов, обучающихся по программе подготовки дипломированных специалистов (инженеров) по всем строительным специальностям направления «Строительство», а также подготовки бакалавров по направлениям «Строительство», «Защита окружающей среды» и «Водные ресурсы и водопользование». Пособие рекомендовано инженерам-строителям для практического использования.

Г.А. Федотов, П.И. Поспелов

Изыскания и проектирование автомобильных дорог

Книга 1



ISBN 978-5-06-006056-0



9 785060 006056