

Г. А. ФЕДОТОВ

ИЗЫСКАНИЯ И ПРОЕКТИРОВАНИЕ МОСТОВЫХ ПЕРЕХОДОВ

*Рекомендовано
Учебно-методическим объединением по образованию
в области железнодорожного транспорта
и транспортного строительства
в качестве учебного пособия
для вузов железнодорожного транспорта
и транспортного строительства*

2-е издание, стереотипное

УДК 625.06/.07(075.8)

ББК 38.74я73

Ф342

Рецензенты:

зав. кафедрой автомобильных дорог Архангельского государственного технического университета, д-р техн. наук, профессор *А. М. Кулиженков*;
профессор кафедры «Изыскания и проектирование дорог»
МАДИ (ГТУ) *В. И. Пуркин*

Федотов Г. А.

Ф342

Изыскания и проектирование мостовых переходов : учеб. пособие для студ. учреждений высш. проф. образования / Г. А. Федотов. — М. : Издательский центр «Академия», 2010. — 304 с.

ISBN 978-5-7695-4277-0

Даны сведения о проектировании мостовых переходов, о реках и теории руслового процесса. Изложены основополагающие принципы гидрологических и морфометрических расчетов, новые универсальные методы обоснования расчетных гидрометрических величин: расчета уширений подмостовых русел и отверстий мостов, комплексного расчета глубинных деформаций русел и свободной поверхности потока на мостовых переходах, комплексного расчета мостовых переходов с использованием уравнений жидкости переменной массы. Приведены результаты исследований работы мостовых переходов в особых условиях их эксплуатации.

Для студентов учреждений высшего профессионального образования.

УДК 625.06/.07(075.8)

ББК 38.74я73

*Оригинал-макет данного издания является собственностью
Издательского центра «Академия», и его воспроизведение любым способом
без согласия правообладателя запрещается*

© Федотов Г. А., 2010

© Образовательно-издательский центр «Академия», 2010

© Оформление. Издательский центр «Академия», 2010

ISBN 978-5-7695-4277-0

ПРЕДИСЛОВИЕ

Начавшийся экономический подъем в России требует уже сейчас и тем более потребует в ближайшем будущем строительства и реконструкции тысяч километров автомобильных дорог. Неотъемлемой и весьма дорогостоящей их частью являются мостовые переходы — комплексы специальных сооружений, возводимых на пересечениях дорог с постоянными водотоками.

Методы обоснования размеров сооружений мостовых переходов в последние десятилетия претерпели принципиальные изменения. На смену эмпирическим и часто умозрительным методам проектирования пришли и нашли широкое применение строго научные решения, базирующиеся на использовании систем дифференциальных уравнений, которые представляют собой математическую запись самых общих законов природы — законов сохранения материи, энергии и количества движения.

Технические трудности, связанные с решением систем дифференциальных уравнений, описывающих развивающиеся во времени и пространстве процессы на мостовых переходах, вынуждали в 1950—1970-х гг. использовать теоретически правильные, но весьма упрощенные способы расчета мостовых переходов. Они основывались на ряде существенных допущений и предпосылок, нередко не реализуемых на конкретных объектах (использование предельных общих размывов при определении глубин фундаментов опор мостов, неучет неизбежных русловых деформаций при расчетах характерных подпоров на мостовых переходах и т.д.).

Появление современной вычислительной техники (особенно персональных компьютеров) во многом сняло проблему как объемов оперативной и внешней памяти компьютеров, так и их быстродействия.

В связи с этим исключительно многодетальные алгоритмы и программы, представляющие собой математические модели сложнейших природных явлений и процессов, а также само математическое моделирование как объективный аппарат познания окружающего мира стали доступны рядовому пользователю. Обобщение результатов многочисленных расчетов (материалов математического моделирования) позволило сделать ряд важных практических выводов и разработать принципиально новые реко-

мендации по проектированию мостовых переходов как в простых, так и в сложнейших условиях их эксплуатации.

Произошедшие в последние годы изменения в нормативной базе проектирования мостовых переходов также потребовали их учета при разработке нового учебного пособия по изысканиям и проектированию мостовых переходов. В связи с этим в настоящем учебном пособии нашли отражение следующие темы:

новые универсальные методы обоснования расчетных гидрометеорологических величин (расходы, уровни, толщины снега и льда, скорости ветра, осадки и т.д.) и, в частности, программа «Gist»;

методы расчета уширений подмостовых русел и отверстий мостов и детального расчета уширений русел на мостовых переходах (программа «Рур-1»);

универсальная методика комплексного расчета глубинных деформаций русел и свободной поверхности потока на мостовых переходах (программа «Рома»);

методика комплексного расчета мостовых переходов с использованием уравнений жидкости переменной массы (программа «Рома-2»);

упрощенные методы расчета срезок, общих и местных размывов на мостовых переходах, а также характерных подпоров;

новые методы проектирования подходов к мостам и системы регуляционных сооружений;

алгоритмы расчета мостовых переходов с использованием уравнений жидкости переменной массы и уравнений двух- и трехмерной гидравлики;

методы изысканий мостовых переходов с использованием современных технологий сбора исходной информации (системы спутниковой навигации GPS, современные геофизические методы инженерно-геологической разведки, электронная и ультразвуковая гидрометрия, аэрогидрометрия, цифровая наземная и аэрокосмическая фотограмметрия и т.д.).

ГЛАВА 1

ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О ПРОЕКТИРОВАНИИ МОСТОВЫХ ПЕРЕХОДОВ

1.1. Виды переходов через водотоки

Автомобильные дороги пересекают многочисленные периодические водотоки: ручьи, речки, реки, пруды и водохранилища.

Для перехода через водные преграды строят систему инженерных сооружений, называемую *переходом водотока*.

Переходы через водотоки классифицируют по типам основного искусственного сооружения. Для непосредственного пересечения водотока могут быть построены: *постоянный мост* — сооружение для пропуска дороги над водным препятствием (рис. 1.1); *транспортный тоннель* — сооружение для пропуска дороги под водным препятствием (рис. 1.2); *наплавной мост* для пропуска дороги по понтонам в течение значительной части года с положительными температурами; *паром* — специальное подвижное плавсредство, предназначенное для перевозки автомобилей и автопоездов через водное препятствие; *ледовая переправа* — временное сооружение для пропуска дороги по льду и являющееся заменой наплавному мосту или парому в зимнее время.

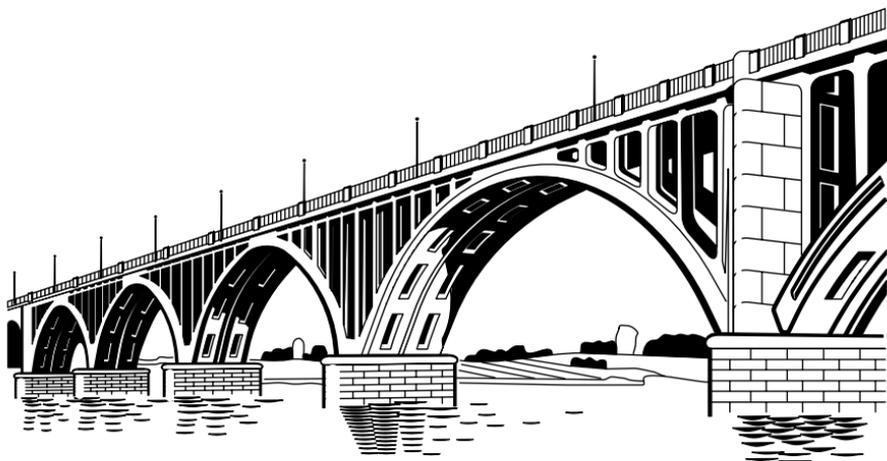


Рис. 1.1. Постоянный мост

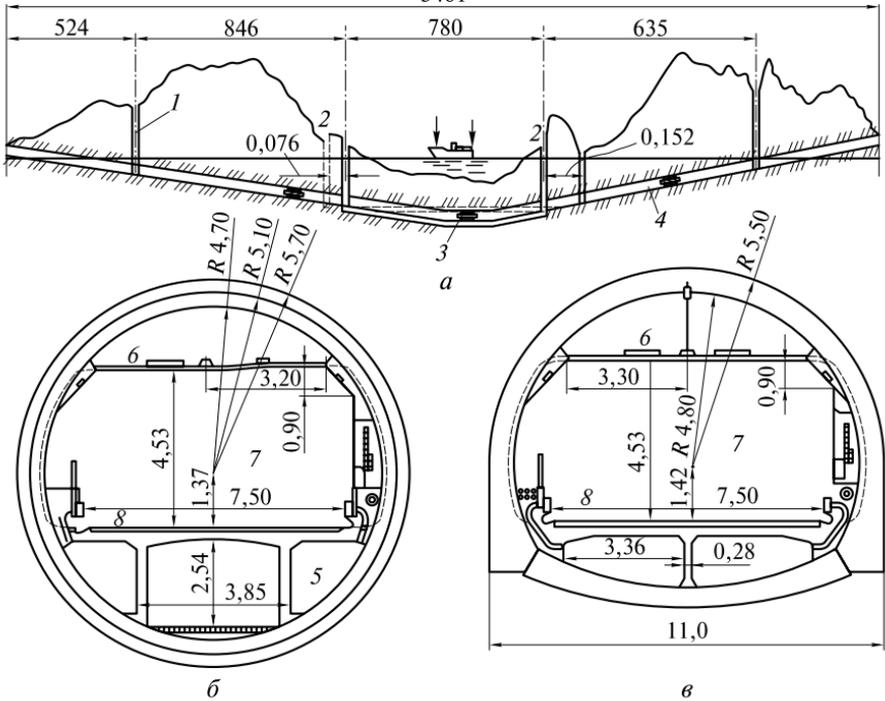


Рис. 1.2. Транспортный тоннель:

a — продольный профиль тоннельного перехода; *б* — поперечный профиль подводного участка; *в* — поперечный профиль сухопутного участка; 1 — шахта; 2 — пионерная шахта и штольня; 3 — пешеходный проход; 4 — тоннель для автотранспорта; 5 — вентиляционные каналы; 6 — вытяжной канал; 7 — проезжая часть; 8 — покрытие

Мостовой переход — это часть автомобильной дороги, представляющая собой комплекс сооружений (рис. 1.3), в который входят: мост, пересекающий собственно водоток; подходы к мосту — не переливаемые насыпи с укрепленными откосами, периодически подтапливаемые паводковыми водами; регулиционные и защитные сооружения, предохраняющие мост и подходы к нему от вредного воздействия водного потока.

Мост и подходы к нему являются основными сооружениями транспортного назначения, по которым осуществляется круглогодичное движение транспортных потоков. Регуляционные и защитные вспомогательные сооружения — неотъемлемая часть мостового перехода, без которой в большинстве случаев невозможно обеспечить сохранность и нормальную работу основных сооружений перехода.

Для обеспечения круглогодичного проезда транспортных потоков мосты и подходы к ним устраивают, как правило, не пере-

ливаемыми даже в самые высокие паводки (рис. 1.4, а). На реках с большой шириной разлива нередко кроме основного моста, перекрывающего главное русло реки, дополнительно устраивают один или несколько мостов на пойме (рис. 1.4, б).

Опоры мостов сооружают обычно из сборного или сборно-монолитного железобетона (рис. 1.5), а пролетные строения с ездой поверху или понизу делают металлическими, сталежелезобетонными или железобетонными.

Опоры мостов фундируют на безопасную глубину с учетом неизбежных понижений отметок дна подмостового русла (размывов). Проектные высоты проезда по насыпям подходов и пролетам мостов должны обеспечивать мостовой переход от переливов в высокие паводки и беспрепятственный пропуск судов под судоводными пролетами.

Насыпи подходов и регулиционных сооружений подвержены воздействию водного потока (волнобой и ледоход, продольные течения вдоль насыпей, размывы их подошв и т.д.), поэтому их

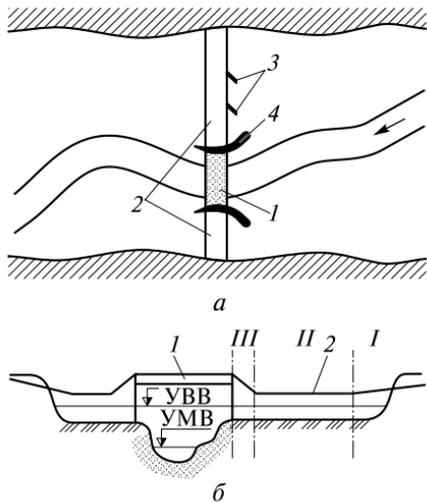


Рис. 1.3. План (а) и продольный профиль (б) мостового перехода: 1 — мост; 2 — подходы к мосту; 3 — струеотбойные траверсы; 4 — струенаправляющие дамбы; I—III — характерные участки продольного профиля

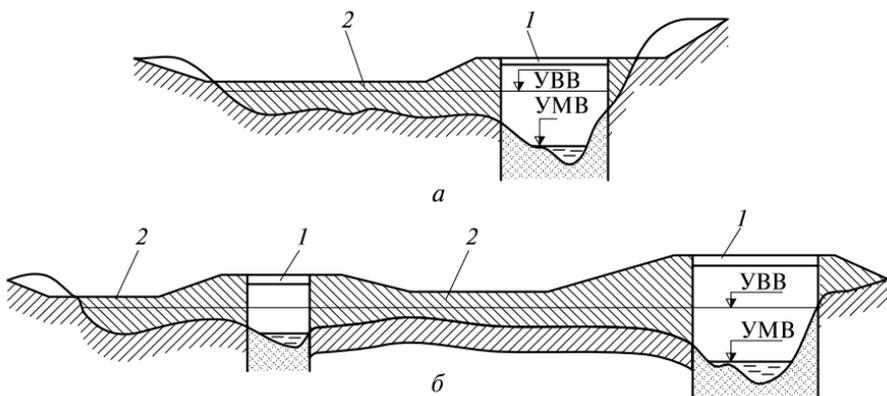


Рис. 1.4. Продольный профиль мостового перехода: а — с одним мостом; б — с двумя мостами; 1 — мост; 2 — подходы

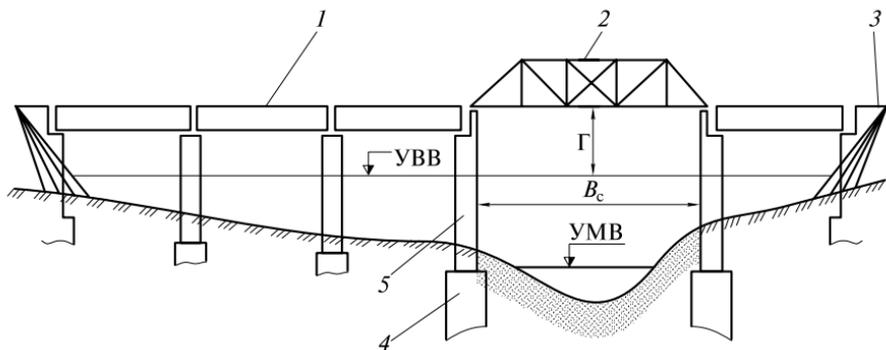


Рис. 1.5. Схема постоянного моста через реку:

1 — железобетонное пролетное строение с ездой поверху; 2 — металлическое пролетное строение с ездой понизу; 3 — береговой устой; 4 — фундамент опоры; 5 — опора моста; Γ — габарит; B_c — судовой пролет

откосы и подошвы укрепляют специальными защитными сооружениями (плоскими сборными железобетонными или бетонными, монолитными покрытиями, каменными призмами — рисбермами и т. д.).

1.2. Расчеты при проектировании мостовых переходов

Мостовые переходы должны удовлетворять целому ряду требований и прежде всего обеспечивать беспрепятственный пропуск транспортных потоков в любое время года, быть устойчивыми в течение всего расчетного срока службы, т. е. противостоять разрушающему воздействию паводков, и при русловых деформациях: природных, общих и местных.

Определенные требования предъявляются к мостовым переходам по обеспечению необходимых условий судоходства. Должны быть выдержаны минимальные подмостовые габариты при расчетных судовых уровнях воды (PCY), а также выполнены требования, при которых не будут нарушаться условия прохождения судов в паводки из-за увеличения скоростей течения в руслах рек на участках влияния мостовых переходов при высоких уровнях воды и в межень после паводков в результате занесения судовых прорезей продуктами размыва. Строительство мостовых переходов не должно приводить к подтоплению или разрушению других народнохозяйственных объектов, населенных пунктов, переходов коммуникаций и т. д. Кроме того, общая строительная стоимость мостовых переходов должна быть по возможности минимальной.

При проектировании мостовых переходов приходится решать два взаимосвязанных вопроса — назначение таких генеральных размеров сооружений мостового перехода, которые обеспечивали бы его безаварийную работу в течение всего расчетного срока службы, и прогноз вредных последствий мостового строительства, связанных с неизбежным нарушением бытового режима водотока.

Гидрологические, гидравлические и русловые расчеты мостовых переходов представляют собой одну из наиболее сложных и важных частей их проектов, поскольку во многом определяют не только их генеральные размеры (отверстия мостов, глубины фундаментирования опор, размеры искусственных уширений подмостовых русел, размеры струенаправляющих дамб, отметки бровок земляного полотна на подходах и отметки проезда на мостах, конструкции и размеры укрепительных сооружений и т.д.), но и дают возможность оценить те последствия, которые будут проявляться при эксплуатации мостовых переходов из-за нарушения бытового режима протекания речного потока (ухудшение условий судоходства на участках русел рек, прилегающих к мостовым переходам, ухудшение условий работы других инженерных сооружений на реках и т.д.).

Подобные расчеты до недавнего времени выполняли исключительно на основе предположения об установившемся течении паводкового потока, т.е. по некоторому расчетному расходу и уровню и лишь для створа самого моста. Такой подход вынуждал ориентироваться на некоторые предельные значения русловых деформаций, нередко недостижимых на реальных водотоках, а также рассматривать ряд взаимно влияющих друг на друга явлений (например, деформации свободной поверхности потока и деформации русел) раздельно.

При проектировании мостовых переходов часто возникают важные инженерные задачи, которые вообще не могут быть решены с использованием уравнений установившегося течения речного потока, например, прогнозы условий судоходства, размывов переходов коммуникаций, расположенных в верхнем или нижнем бьефах мостовых переходов и т.д. Поэтому переход на компьютерные методы математического моделирования мостовых переходов на основе решения в конечных разностях строгих уравнений баланса наносов и неустановившегося течения потока (представляющих собой математическую запись самых общих законов природы — законов сохранения материи, энергии и количества движения) оказался неизбежным.

Гидрологические расчеты — это прежде всего определение расходов и соответствующих им уровней воды расчетной вероятности превышения (ВП). Значения ВП обычно нормируют в зависимости от типа искусственного сооружения, категории дороги и

плотности дорожной сети в районе проектируемого объекта. Ежегодные колебания наибольших расходов и уровней воды, несмотря на их опосредованную связь с ходом солнечной активности (5...6-, 11-, 22-, 44-, 88...89-летними (вековыми) и т.д. периодами солнечной активности), все же подчиняются законам больших чисел, поэтому для вычисления расчетных расходов и соответствующих им уровней воды используют уравнения теории вероятностей. Наблюдения за максимальными годовыми расходами и уровнями воды обрабатывают на компьютере.

Для комплексного проектировании мостовых переходов, особенно в рамках систем автоматизированного проектирования автомобильных дорог и сооружений на них (САПР-АД), требуется знание не только наивысших годовых расходов и уровней заданной ВП, но и ход их во времени — расчетных гидрографов и водомерных графиков паводков.

При детальном комплексных компьютерных расчетах мостовых переходов нередко используют всю совокупность паводков в наблюдаемой на водомерных постах последовательности с пропуском паводка расчетной ВП в наиболее напряженный период работы мостового перехода.

Морфометрическими расчетами определяют расходы, уровни и скорости течения с использованием уравнения равномерного течения жидкости по известным морфологическим и геометрическим характеристикам расчетного сечения долины реки (морфоствора).

Морфометрические расчеты необходимы для установления расчетного уровня воды по известному расчетному расходу (как правило, в тех случаях, когда на водотоке отсутствуют систематические гидрометрические наблюдения за расходами и соответствующими им уровнями на водомерных постах), иногда для определения расхода воды по зафиксированному на местности уровню воды и, наконец, самое главное, для оценки распределения расчетного расхода между характерными элементами живого сечения долины реки (руслом и поймами).

Величина распределения расчетного расхода — одна из самых важных гидравлических характеристик створа перехода, которая в конечном итоге во многом определяет генеральные размеры всех его сооружений. Учитывая возможность появления ощутимой погрешности и, следовательно, необходимость введения гарантийных запасов устойчивости сооружений, к морфометрическим расчетам прибегают лишь при невозможности проведения натурных гидрометрических наблюдений или их недостаточном объеме.

Всегда нужно стремиться выполнять гидрометрические наблюдения в створе мостового перехода, особенно при высоких уровнях воды, с последующим построением натурной кривой расхо-

дов $H=f(Q)$. Затраты на гидрометрические работы, как правило, с лихвой окупают себя на снижении строительной стоимости и последующих эксплуатационных расходах в связи с исключением бросовых затрат и повышением надежности проектируемых объектов.

Расчет отверстия моста — это назначение глубины фундирования опор по известной величине отверстия или (в редких случаях) определение размера отверстия при заданном размыве. Назначая размер отверстия или (что более правильно) определяя его расчетом, нужно учитывать неизбежные природные деформации русел, которые происходят на водотоках в бытовых условиях и часто еще усиливаются после строительства мостовых переходов.

Необходимо также прогнозировать закономерные боковые деформации русел (их уширения), связанные со стеснением паводкового потока подходами к мостам, т. е. с искусственным изменением руслоформирующих расходов на участках влияния мостовых переходов. При этом отверстие моста назначают обычно не меньше, чем максимально возможное (без заилиения в течение десятилетий) уширенное подмостовое русло.

При назначении глубин фундирования опор мостов прогнозируют те наибольшие глубины общего размыва, которые могут развиваться в один из наиболее напряженных периодов работы мостового перехода в течение расчетного срока его службы. Прогноз глубинных деформаций русел и фундирование опор осуществляют обязательно с учетом природных русловых деформаций, которые приводят к дополнительному углублению русла, а также боковых деформаций — естественных или искусственных (срезок пойменных берегов подмостовых русел), существенно ограничивающих развитие глубинных размывов.

Местные размывы, развивающиеся у передних граней опор мостов и голов регуляционных сооружений, являются следствием нарушения локальной гидравлической структуры потока этими элементами мостовых переходов и приводят к дополнительному увеличению глубин в русле и на поймах. Глубины местного размыва, вычисляемые обычно по эмпирическим или теоретико-эмпирическим зависимостям, обязательно учитывают при обосновании размеров сооружений мостовых переходов.

Таким образом, минимальные размеры отверстий мостов часто определяются возможными боковыми деформациями русел под мостами (естественными или искусственными уширениями русел), а глубины фундирования опор — природными, общими (глубинными) и местными деформациями.

Расчет судоходного уровня (PCY) — одна из наиболее ответственных задач, которую всегда приходится решать при проектировании мостовых переходов через судоходные реки. Этими рас-

четами, с одной стороны, определяется тот наивысший уровень, при котором еще возможны под мостом проходы судов с заданными высотными габаритами, и, с другой, устанавливаются абсолютные высоты низа конструкций пролетных строений, высоты опор и уровни проезда на мосту и подходах. Элементы расчета судоходных уровней, минимальные длины и число судоходных пролетов, а также высоты подмостовых габаритов нормирует ГОСТ 26775—97 в зависимости от класса судоходной реки.

Проектирование продольного профиля подходов к мостам осуществляют с учетом тех минимальных высот бровок земляного полотна, при которых не будет переливов через насыпь даже в самые высокие паводки. Требование о недопущении переливов обычно предъявляют также и к струенаправляющим дамбам и траверсам.

Минимальные высоты бровок земляного полотна подходов, струенаправляющих дамб и траверсов определяются прежде всего уровнем высокой воды в реке расчетной ВП, величиной подпора в данном месте насыпи, возможной высотой набега волны на откос и нормируемым конструктивным запасом, принимаемым большим для сооружений транспортного назначения (насыпей подходов) и меньшим для вспомогательных сооружений (струенаправляющих дамб и траверсов).

Высоту расчетного уровня воды заданной вероятности превышения ($P_{УВВ_{p\%}}$) определяют гидрологическими расчетами. Для определения подпоров в любом месте насыпи требуется построение кривых свободной поверхности потока с верховой и нижней сторон насыпей, а со стороны речного откоса струенаправляющих дамб с использованием уравнения неравномерного течения жидкости.

Определение возможной высоты набега волны на откосы также поддается аналитическим расчетам.

Проектирование регуляционных и защитных сооружений — струенаправляющих дамб, траверсов, полузапруд, спрямлений и уширений русел, укреплений — сопровождается специальными расчетами. Ориентировочные размеры струенаправляющих дамб и траверсов рассчитывают аналитически. Эти размеры в дальнейшем корректируют в зависимости от конкретных особенностей места перехода, учитывают также опасные местные размывы, развивающиеся у голов струенаправляющих дамб, траверсов и полузапруд. Укрепления откосов и подошв насыпей рассчитывают на ледовые воздействия, волнобой, продольные течения и местные размывы.

Размеры спрямлений русел определяют из условия их наименьшей деформируемости во времени.

Размеры и плановые контуры искусственных уширений подмостовых русел — срезок — устанавливают из условия их незано-

симости в течение длительного периода времени, а также из условия плавного подвода воды и руслоформирующих наносов под мост и их отвода.

Специальные инженерные задачи при проектировании мостовых переходов часто решают в связи с необходимостью учета их взаимодействия с другими гидротехническими сооружениями, расположенными в пределах зоны влияния (другими мостовыми переходами, плотинами, переходами коммуникаций, русловыми карьерами грунта и т. д.), а также для установления вредного воздействия мостовых переходов на другие стороны народнохозяйственной деятельности и объекты. Наиболее часто выполняют расчеты взаимодействия мостовых переходов с другими гидротехническими сооружениями, прогноз изменения условий судоходства на участках русел рек у мостовых переходов, прогноз размывов переходов коммуникаций, оценку подтопления вышележащей местности и т. д.

При решении перечисленных выше задач рассматривают протекающие на мостовых переходах процессы на участках русел рек значительной протяженности и за многолетний период времени, охватывающий десятилетия. Эти расчеты выполняют на компьютерах с использованием комплексных методологий и программ, представляющих собой математические модели мостовых переходов.

1.3. Методика экономического сравнения вариантов мостовых переходов

Как и для всяких других сложных инженерных объектов, наилучшее проектное решение при проектировании мостовых переходов основывается на технико-экономическом сравнении различных вариантов.

При этом решают две основные задачи. Первая задача состоит в технико-экономической оценке самых общих решений по проектированию сооружения — выбору наилучшего варианта места перехода. Вторая задача заключается в максимальном сокращении капитальных вложений в строительство в пределах принятого варианта.

При решении первой задачи экономическое сравнение вариантов принципиальных проектных решений осуществляют не только по прямым капитальным вложениям (инвестициям) K в строительство, но и по ежегодным эксплуатационным затратам \mathcal{E} , связанным со стоимостью транспортных перевозок и содержанием самого перехода.

Если принять капитальные вложения по вариантам мостового перехода (руб.)

$$K_1, K_2, K_3, \dots, K_{\text{сущ}},$$

а соответствующие им эксплуатационные расходы (руб./год)

$$\Theta_1, \Theta_2, \Theta_3, \dots, \Theta_{\text{сущ}},$$

то, делая капитальные вложения в конкретные варианты, получают соответствующие потери на капитальных вложениях тем большие, чем дороже вариант. Однако при этом выгадывают на ежегодных эксплуатационных затратах, которые будут тем меньше, чем большие капитальные вложения были сделаны в новое строительство или реконструкцию существующего перехода.

Приступать к проектированию и последующему строительству того или иного мостового перехода целесообразно лишь в тех случаях, когда капитальные вложения в их сооружение дадут не меньший экономический эффект, чем вложение тех же средств в другие отрасли народного хозяйства.

Эффективность капитальных вложений (инвестиций) в строительство мостовых переходов может быть оценена *коэффициентом эффективности*, равным отношению годовой экономии, достигаемой при возведении мостового перехода, к первоначальной стоимости строительства (реконструкции):

$$E = \frac{\Theta_{\text{сущ}} - \Theta}{K - K_{\text{сущ}}} \geq E_n,$$

где $\Theta_{\text{сущ}}$, Θ — ежегодные эксплуатационные затраты соответственно до и после строительства мостового перехода, руб./год; K , $K_{\text{сущ}}$ — капитальные вложения соответственно в строительство (реконструкцию) мостового перехода и в существующий переход, руб.; E_n — нормативный коэффициент эффективности капитальных вложений (инвестиций), принимаемый равным 0,14.

Величину, обратную коэффициенту эффективности капитальных вложений (инвестиций), называют *сроком окупаемости*

$$t_{\text{ок}} = \frac{1}{E}.$$

Общий экономический эффект, получаемый в результате строительства мостового перехода, складывается из следующих составляющих:

экономический эффект на автомобильном транспорте при перевозках грузов и пассажиров, которые в случае отказа от строительства (реконструкции) мостового перехода также перевозились бы автомобильным транспортом, но по менее совершенным дорогам и далеко расположенным мостовым переходам (с большими перепробегам);

экономический эффект от более рационального распределения перспективного грузооборота между различными видами

транспорта и переключения на автомобильный транспорт грузов, ранее перевозимых другим транспортом (железнодорожным, водным, трубопроводным, авиационным);

экономический эффект, который получают предприятия, обслуживаемые автомобильным транспортом, в результате своевременной доставки грузов, сокращения потерь грузов и своевременного вывоза промышленной и сельскохозяйственной продукции;

экономический эффект, связанный с развитием новых производительных сил в районе тяготения, которое стало возможным и целесообразным благодаря строительству (реконструкции) мостового перехода;

экономический эффект в непроеизводственной сфере;

экономический эффект, получаемый в результате сокращения потерь от дорожно-транспортных происшествий.

Круг факторов, подлежащих учету при оценке экономической эффективности капитальных вложений (инвестиций) в строительство (реконструкцию) мостовых переходов, зависит от конкретных местных условий района тяготения.

Принципиальные варианты проектных решений сравнивают по приведенным к году строительства затратам:

$$P_{\text{пр}} = K + \sum_{t=1}^{T_p} \frac{\Delta \mathcal{E}_t}{(1 + E_n)^t},$$

где K — первоначальные капитальные вложения (инвестиции); T_p — расчетный срок сравнения вариантов, принимаемый равным 30...35 лет.

Наилучший вариант места перехода выбирают по минимальным приведенным затратам $P_{\text{пр}}$, при этом размеры капитальных вложений K в строительство (реконструкцию) могут оказаться значительными. Однако большой экономический эффект на сокращении эксплуатационных расходов $\Delta \mathcal{E}$ оправдывает эти инвестиции.

С точки зрения экономики лучшим местом для размещения створов мостовых переходов являются участки русел рек вблизи городов.

При решении второй экономической задачи, связанной с сокращением капитальных вложений в строительство (когда оптимальное место мостового перехода уже выбрано), варианты проектных решений, мало влияющие на общие эксплуатационные затраты (конструкции фундаментов, опор, пролетных строений, подходов, системы регуляционных сооружений, типов укреплений, способы организации строительства и т.д.), сравнивают уже в основном по минимуму капитальных вложений (инвестиций) K в новое строительство или реконструкцию существующего объекта.

1.4. Исторический очерк о методах проектирования мостовых переходов

Наука о проектировании мостовых переходов родилась на стыке многих научных дисциплин: математики, теории моделирования, изысканий и проектирования мостов и дорог, гидрологии, гидравлики и теории русловых процессов. Она относится к очень сложной области человеческих знаний и требует от специалиста широчайшего научного кругозора и большого практического опыта.

Под проектированием мостовых переходов понимают прежде всего гидролого-гидравлическую часть проектов, во многом определяющую генеральные размеры всех сооружений мостовых переходов и условия их последующей эксплуатации. Последствия ошибок на этой стадии проектирования уже не могут быть компенсированы даже при самом современном и рациональном проектировании опор мостов и пролетных строений.

Способы проектирования мостовых переходов менялись по мере развития науки и техники, и, в частности, средства автоматизации и вычислительной техники радикальным образом повлияли на совершенствование методов и расчетных схем, используемых при проектировании.

Во второй половине XIX столетия в России, особенно после отмены крепостного права в 1861 г. и в связи с развитием капитализма, началось интенсивное железнодорожное строительство, потребовавшее возведения большого количества мостовых переходов.

Мостовые переходы в то время строили без надлежащего расчетного обоснования их генеральных размеров. Инженеры при проектировании руководствовались самыми общими соображениями. При этом в комплекс сооружений мостового перехода входили только два типа сооружений прямого транспортного назначения: мосты и подходы к мостам.

Многочисленные случаи размывов, повреждений речными потоками в паводки и даже случаи разрушения мостовых переходов, связанные со стеснением рек подходами к мостам, вынуждали инженеров стремиться как можно меньше изменять бытовой режим рек.

Для сохранившихся мостовых переходов того времени весьма специфично наличие кроме мостов на основном русле дополнительных мостов на поймах, староречьях и протоках (например, мостовые переходы через р. Днепр в Киеве, р. Дон в Ростове-на-Дону, р. Клязьму у г. Мячикова и т. д.). Однако, как показал опыт эксплуатации мостовых переходов с дополнительными пойменными мостами, последние чаще всего нуждались в защите от размывов даже в большей степени, чем основные мосты на главном русле.

Обратив внимание на опасную концентрацию сливающихся пойменных потоков у береговых устоев мостов, инженеры стали проектировать специальные регуляционные сооружения, плавно направляющие пойменные потоки под мосты и перемещающие опасные местные размывы от основных сооружений транспортного назначения вверх по течению. Так, в 1865 г. при строительстве мостовых переходов на железной дороге Москва — Н. Новгород под руководством инженера О. П. Григоровича были возведены струенаправляющие дамбы, которые к 80-м годам XIX столетия стали повсеместно включаться в состав сооружений мостовых переходов. Таким образом, начиная с этого периода, в состав мостовых переходов обязательно стали входить такие основные инженерные сооружения, как мост, подходы к мосту и регуляционные сооружения.

В 1875 г. великий русский инженер и мостостроитель, профессор Н. А. Белелюбский (1845—1922) при строительстве мостового перехода через р. Волгу в Сызрани положил начало расчетному обоснованию отверстий мостов, впервые сформулировав принцип расчета общих размывов в подмостовых руслах рек, согласно которому размывы под мостами, связанные с общим стеснением потока подходами, завершаются, как только скорости течения, уменьшающиеся в процессе размыва, не снизятся до их бытового значения в русле. Этот принцип, получивший название «постулата Белелюбского», долгое время оставался неизвестным мостостроителям и только в 1897 г. был доложен им на «IV Съезде русских деятелей по улучшению водяных путей сообщения» и с тех пор почти до 60-х годов XX столетия широко использовался в практике отечественного мостостроения. Принцип расчета отверстий мостов по Н. А. Белелюбскому требовал обязательного проведения гидрометрических работ в створах проектируемых переходов по определению бытовых скоростей, расходов и уровней воды в руслах рек.

В 1903 г. инженер А. А. Гельфер предложил первый метод установления величин местных размывов (равных ширине опоры по фасаду моста) и первый метод превентивной защиты опор от местного размыва каменной наброской.

В 1908 г. академик А. М. Фролов провел крупнейшие по тому времени натурные гидрометрические наблюдения на существующем мостовом переходе через р. Волгу у Астрахани во время прохода исторического в Волжском бассейне паводка. В ходе этого обследования А. М. Фролов обнаружил важнейшие особенности протекания речных потоков в паводки на мостовых переходах, которые послужили толчком для разработки теории гидравлических расчетов мостовых переходов. Главными из них являются наличие перед мостом водной воронки, а за мостом — водного бугра, расположение створа с наибольшим подпором вдали выше

моста, определяющее влияние сил трения (потерь энергии сжатого потока по его длине) на величины подпоров, влияние регулиционных сооружений на пропускную способность мостов и т.д. Результаты этих натуральных наблюдений с обобщениями и выводами Фролов опубликовал в 1912 г. в четырехтомном труде «О переходах через водотоки».

В 1914 г. А. А. Каншин, используя принцип Н. А. Белелюбского, на основе преобразования уравнения равномерного течения жидкости Шези разработал относительно простой метод расчетного обоснования отверстий мостов (метод «гидравлических эквивалентов»), не требующий обязательного проведения гидрометрических работ при изысканиях, предшествующих проектированию мостовых переходов. Метод Каншина позволял инженерам в течение почти 45 лет рассчитывать мостовые переходы, в частности, на реках с неизученным в гидрологическом отношении режимом. А. А. Каншин, сам того не ведая, нанес ощутимый удар по качеству проведения гидрометрических работ при изысканиях мостовых переходов.

После фундаментальных работ в речной гидрологии конца XIX — начала XX столетия В. М. Лохтина, Н. С. Лелявского, Л. Фарга, Жирардона и ряда других ученых в изучении законов, по которым живут реки, наступило затишье, связанное с развитием землечерпания на судоходных реках.

В 1930—1935 гг. были пересмотрены все существовавшие до этого времени методы и нормы проектирования. В 1931 г. главный гидролог Гидропроекта Н. М. Бернадский разработал метод построения планов течений при проектировании прудов-холодильников электростанций.

Таким образом, была впервые решена и доведена до практической реализации задача двухмерной гидравлики.

В 1932 г. Н. М. Бернадский и М. А. Великанов почти одновременно решили в конечных разностях дифференциальное уравнение баланса австрийского ученого М. Ф. Экснера (1926) применительно к русловым потокам у плотин ГЭС. Его стали использовать, с одной стороны, для прогноза заиления водохранилищ и, с другой, для прогноза опасных русловых деформаций в нижних бьефах плотин. С этого времени большая гидротехника перешла на строго научные методы прогноза деформаций русел и кривых свободной поверхности потока по уравнениям баланса наносов (закон сохранения твердой фазы руслового потока) и неравномерного течения жидкости (закон сохранения энергии потока).

В этом же году М. Ф. Срибным были разработаны нормы оценки коэффициентов шероховатости естественных русел рек и пойм, что позволило существенно уточнить метод расчета отверстий мостов А. А. Каншина.

В 1933—1936 гг. В. М. Маккавеев, С. Т. Алтунин, Е. В. Болдаков и О. В. Андреев провели исследования по установлению оптимальных форм и размеров струенаправляющих дамб на мостовых переходах.

Взамен методов проектирования гидротехнических сооружений на пропуск случайных наивысших паводков, наблюдавшихся в течение ограниченного срока наблюдений, в 1936 г. были признаны обязательными методы вероятностного прогноза паводков различной вероятности превышения. Введение их в практику транспортного проектирования подготовили работы известных советских гидрологов Д. Л. Соколовского, С. Н. Крицкого и М. Ф. Менкеля.

Основные исследования в области проектирования мостовых переходов в послевоенный период проводились в лаборатории речных сооружений ВНИИ транспортного строительства. В этой лаборатории О. В. Андреев и И. А. Ярославцев провели натурные и лабораторные наблюдения за процессами размывов на мостовых переходах, на основе полевых измерений они установили связь расхода руслоформирующих наносов с параметрами речного потока, изучили русла рек с различным типом руслового процесса, разработали методы расчета размывов в руслах рек и на поймах, исследовали природу развития местного размыва у опор мостов, выработали приемы расчета подпоров и изучили общие принципы регулирования русел рек на мостовых переходах. В результате этих исследований, а также использования научных разработок в области гидротехнического проектирования отечественных ученых М. А. Великанова, В. Н. Гончарова, И. И. Леви, К. И. Россинского, И. А. Кузьмина и других оказалось возможным существенно развить методы проектирования мостовых переходов на основе использования уравнения баланса наносов.

В 1949 г. выдающийся русский ученый и основоположник отечественной школы проектирования мостовых переходов профессор О. В. Андреев (1911—1990) предложил использовать уравнение В. И. Чарномского применительно к построению кривых свободной поверхности на мостовых переходах, и, таким образом, один из основополагающих расчетов мостовых переходов — расчет подпоров — был поставлен на строгую научную основу (закон сохранения энергии потока).

В 1953 г. И. А. Ярославцев разработал теоретико-эмпирический метод расчета местного размыва у опор мостов на основе ноль-балансной схемы, когда перед опорой устанавливается подвалье гряды руслоформирующих наносов и последние в воронку местного размыва не поступают.

Метод И. А. Ярославцева позволил учесть влияние всего многообразия возможных форм опор мостов на величины местных размывов.

В 1955 г. профессор О. В. Андреев решил уравнение баланса наносов М. Ф. Экснера применительно к мостовым переходам для случая завершения размыва на пике расчетного паводка и получил простые расчетные зависимости для определения предельного общего размыва под мостами через реки с различным типом руслового процесса. В 1958 г. он же сформулировал принципы расчета мостовых переходов в конечных разностях по элементам длины и времени. Расчеты полного и подмостового подпоры были также поставлены на строгую научную основу (решение уравнения неравномерного течения сжатого речного потока для непризматических русел). При этом были разработаны упрощенные формулы для расчета некоторых характерных подпоры.

В 1969 г. Т. Н. Глаголева разработала первый теоретико-эмпирический метод обоснования размеров срезов (искусственных уширений подмостовых русел) на мостовых переходах, не заиляемых в течение десятилетий.

С середины 60-х годов истекшего столетия, когда в практику исследовательских и проектных работ стали внедрять компьютерную технику, наука о проектировании мостовых переходов получила новое качественное развитие. Так, Союздорпроект, Гипротрансмост и МАДИ выработали новые принципы гидрологических, гидравлических и русловых расчетов мостовых переходов.

Именно невозможность широкого использования компьютерной техники, а также краткость цикла проектирования мостовых переходов привели к тому, что в этой области укоренился ряд некорректных, умозрительных приемов расчета мостовых переходов. При этом некоторые основополагающие расчеты (например, расчет уширений подмостовых русел) не выполняли вообще, и отверстия мостов (а следовательно, и их длины) назначали на основе лишь самых общих соображений и инженерной интуиции. Результатом этого были многочисленные случаи повреждения и разрушения мостов вскоре после их строительства, а также случаи необоснованного завышения стоимости и без того весьма дорогого комплекса сооружений.

При проектировании мостовых переходов почти всегда возникают инженерные задачи, которые с позиций установившегося течения речного потока вообще решены быть не могут, например, такие как: прогноз условий судоходства на мостовых переходах; прогноз размывов переходов коммуникаций, расположенных в верхнем или в нижнем бьефах мостовых переходов; расчеты мостовых переходов в нижних бьефах капитальных плотин, в подпоре, в условиях регрессивной эрозии; оценка вредного воздействия мостового строительства на окружающую среду и объекты и т. д.

В 1970—1980-х гг. в СоюздорНИИ д-р техн. наук М. М. Журавлев провел технико-экономическое обоснование вероятностей пре-

вышения расчетных паводков на автодорожных переходах через водотоки. Было установлено огромное влияние на общие экономические потери, связанные с повреждениями или разрушениями переходов, потери в народном хозяйстве от перерывов движения.

Новое нормирование расчетных вероятностей превышения теперь увязывалось не только с категориями автомобильных дорог, но и с плотностью дорожной сети в районе проектирования, обеспечивающую ту или иную возможность организации объездов при повреждениях и разрушениях мостовых переходов в высокие паводки.

В 1971 г. в Гипротрансмосте Г. А. Федотов разработал программу для ЭВМ второго поколения типа М-20, М-220 и БЭСМ-4 «Гидрам-3» (гидравлические и русловые расчеты мостовых переходов), а затем и применительно к компьютерам третьего поколения типа ЕС ЭВМ. Эта программа была основана на решении в конечных разностях (с минимумом допущений) системы трех дифференциальных уравнений: баланса наносов Экснера (закон сохранения материи твердой фазы руслового потока) и уравнений неустановившегося течения жидкости Сен-Венана — неразрывности (закон сохранения материи жидкой фазы руслового потока) и неравномерного течения потока (законы сохранения энергии и количества движения жидкой фазы руслового потока). В 1973 г. в Гипротрансмосте ученый предложил теоретический метод обоснования размеров срезок (искусственных уширений подмостовых русел), основанный уже на решении строгого уравнения баланса наносов (равенства объемов среднемноголетнего притока руслоформирующих наносов к мосту и среднемноголетнего выноса из-под моста). Он разработал программу для практического применения «Рур-1» (расчет уширений русел). Федотов сформулировал новые принципы расчетного обоснования рациональных отверстий (длин) мостов.

В 1976—1977 гг. в результате массового математического моделирования работы мостовых переходов с использованием программ «Гидрам-3» и «Рур-1» и привлечения данных натуральных наблюдений Г. А. Федотову удалось исследовать основные процессы, развивающиеся на мостовых переходах, и разработать упрощенные методы расчета уширений подмостовых русел и отверстий мостов, глубин общего размыва и всех характерных подпоров на мостовых переходах.

Таким образом, во всех основополагающих расчетах мостовых переходов к этому времени были задействованы уравнения, представляющие собой математическую запись самых общих законов природы — сохранения материи, энергии и количества движения.

В 1975—1980 гг. во ВНИИ транспортного строительства канд. техн. наук Г. С. Пичугов провел обширные экспериментальные ис-

следования по формированию местного размыва у переливаемых преград и установил превалирующее влияние на величины местного размыва нижних частей препятствия (на 0,4 части глубины от дна), что позволило существенно уточнить прогнозы глубин местных размывов, вводя в расчетные зависимости ширину опор, определяемую только на 0,4 придонной части глубины, а не средние размеры ширины опор, определяемые на всей глубине потока.

В 1977 г. во ВНИИ транспортного строительства И. А. Ярославцев выполнил фундаментальные экспериментальные и теоретические исследования по местной устойчивости подтопленных откосов пойменных насыпей, защищаемых капитальными плитными конструкциями, к волновым воздействиям. Внедрение в практику мостового проектирования этих исследований позволило резко повысить эксплуатационную надежность сооружений мостовых переходов и исключить необоснованные затраты и омертвление капитальных вложений в защитные конструкции при проектировании подходов к мостам и регуляционных сооружений.

В 1979 г. Нгуен Суан Трук успешно реализовал первую попытку построения планов течений в верхних бьефах мостовых переходов.

В 1983 г. О. В. Андреевым и Г. А. Федотовым было дано принципиальное решение задачи построения планов течений на мостовых переходах (фрагментарная двумерная модель), открывшее качественно новое направление в мостовой гидравлике. В ходе традиционных расчетов по одномерным уравнениям неустановившегося потока (программы «Гидрам-3» и «Рома») проектировщики вынужденно задают ориентировочные значения длин зон сжатия и растекания потока на мостовых переходах, а также очертания граничных с водоворотами струй на поймах, которые принимаются фиксированными в ходе всего расчета. Длины зон сжатия и растекания потока, а также положение границ транзитных потоков с водоворотными зонами оказывают сильнейшее влияние на величины и ход во времени деформаций русел и свободной поверхности потока и, в свою очередь, сами сильно зависят и меняются в ходе этих деформаций. Открытое в результате этих исследований направление снимает острейшую проблему проектирования мостовых переходов.

В 1984 г. М. М. Журавлев опубликовал монографию «Местный размыв у опор мостов», в которой помещены кадастры по натурным местным размывам в несвязных грунтах (257 точек) и в связных грунтах (23 точки) и разработанный им в 1978 г. новый теоретико-эмпирический метод расчета местного размыва у опор мостов, основанный на широком привлечении собранных натурных данных о местных размывах. Метод Журавлева не страдает недостатками использовавшихся до этого эмпирических формул местного размыва, которые были получены на основе обоб-

шения результатов лотковых экспериментов, и освобожден от пагубного влияния масштабных эффектов на конечные результаты расчетов.

Проведенные в 80-х годах истекшего столетия канд. техн. наук Ю. А. Андриановым исследования основных возможных способов превентивной защиты мостовых опор от местного размыва, позволяют уже на стадии проектирования определять наилучшие проектные решения, рассматривая варианты разных глубин фундирования опор мостов.

В 1982—1987 гг. В. П. Баховчук на восьми мостовых переходах Белоруссии провел с использованием специально разработанного для этих целей гидрометрического оборудования систематические натурные измерения. Были установлены необходимые параметры для решения дифференциальных уравнений жидкости переменной массы применительно к расчетам мостовых переходов, использование которых в практике проектирования мостовых переходов позволит исключить грубые допущения одномерных расчетных схем, связанные с осреднением скоростей течения по ширине всего речного потока (с руслом и поймами).

В 1985 г. Г. А. Федотов и Г. Г. Наумов разработали универсальный аналитический метод аппроксимации гидрометеорологических величин независимо от их генетического происхождения (расходы, уровни, толщины снега и льда, осадки, скорости ветра и т. д.), основанный на использовании метода наименьших квадратов и реализованный впоследствии инженером С. Э. Шпаком в виде программы «Gist» для персональных компьютеров с графической интерпретацией результатов. Таким образом, практическое использование этого метода существенно повысило надежность и объективность вероятностных прогнозов расчетных гидрометеорологических характеристик.

В 1990 г. программы «Гидрам-3» и «Рур-1» были модернизированы С. Э. Шпаком в программы «Рома» и «Рур» применительно к персональным компьютерам типа РС IT с организацией интерактивного режима работы проектировщика с компьютером и с графической интерпретацией результатов расчета.

В последние годы наука о проектировании мостовых переходов развивается в двух направлениях: создание методов проектирования мостовых переходов на основе решения дифференциальных уравнений жидкости переменной массы, применяемых только для русловой части сжатого потока выше и ниже мостов; разработка методов расчета мостовых переходов, основанных на решении двумерных дифференциальных уравнений речной гидравлики (построение планов течений).

Работа в этих направлениях позволит существенно усовершенствовать методы проектирования мостовых переходов и повысить надежность инженерных прогнозов.

Контрольные вопросы

1. Перечислите виды переходов через водотоки.
2. Перечислите сооружения, входящие в состав мостового перехода, и укажите их назначение.
3. Сформулируйте смысл основных расчетов, выполняемых при проектировании мостовых переходов.
4. Назовите составляющие строительной стоимости мостовых переходов.
5. Что такое коэффициент эффективности капитальных вложений и срок окупаемости мостового перехода?
6. Какими основными составляющими представлены приведенные затраты мостовых переходов?