

**МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО
ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ УЗБЕКИСТАН
ТАШКЕНТСКИЙ АРХИТЕКТУРНО-СТРОИТЕЛЬНЫЙ ИНСТИТУТ**

**На правах рукописи
УДК: 691.327:666.972.5**

ХОДЖАЕВ Саидаглам Аглович

**СТРУКТУРА, ТЕХНОЛОГИЯ И СВОЙСТВА
БЕТОНА ДЛЯ КРОВЕЛЬНЫХ ПОКРЫТИЙ**

Специальность 05.23.05 «Строительные материалы и изделия»

**А в т о р е ф е р а т
диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук**

Ташкент - 2001

Работа выполнена в Акционерном обществе «Узбекский научно-исследовательский и проектный институт типового и экспериментального проектирования жилых и общественных зданий им.Х.Асамова» АО «ЭЛИТТИ» (б.ТашЗНИИЭП) Госархитектстроя Республики Узбекистан

ОФИЦИАЛЬНЫЕ ОППОНЕНТЫ:

Доктор технических наук,
профессор **Адылходжаев А.И.**

Доктор технических наук -
Тешабаяв Р.Д.

Доктор технических наук -
Искандарова М.И.

ВЕДУЩАЯ ОРГАНИЗАЦИЯ: АООТ «Тошкурулиш материаллари ЛИТТИ»
(НИИСтромпроект)

Защита диссертации состоится « 21 » декабря 2001 г. на заседании специализированного разового совета (приказ ВАК Республики Узбекистан № 249-с от 16.10.2001г.) на базе специализированного совета К.067.03.01 при Ташкентском архитектурно-строительном институте по адресу: 700011, Ташкент, ул. Навои, 13.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Ташкентского архитектурно-строительного института.

Автореферат разослан « ____ » ноября 2001г.

Ученый секретарь
специализированного разового совета,
кандидат технических наук, доцент

С.И.Ахмедов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность. Строительство в современных условиях немислимо без применения передовых технологий, эффективных конструкций и материалов, обеспечивающих как надежность и долговечность возводимых зданий и сооружений, так и их экономичность. Вместе с тем методы защиты зданий от атмосферных воздействий в массовом строительстве не претерпели особых изменений: по-прежнему применяются в основном кровли из малоэффективных рулонных материалов на битумной основе, отличающиеся низкой долговечностью и значительными затратами при эксплуатации.

В последние годы определилось перспективное направление - применение сборных крыш с железобетонной (безрулонной) кровлей, возводимой из крупноразмерных кровельных покрытий полной заводской готовности. Наметилась тенденция применения монолитного водонепроницаемого железобетона в устройстве эксплуатируемых кровель. Однако и в этих направлениях вопросы обеспечения эксплуатационной надежности и долговечности остаются проблематичными из-за несовершенства конструкций и технологии железобетонных кровельных покрытий, применения традиционных подходов к подбору состава бетона и назначения требований к его физико-механическим свойствам без должного учета его поведения в кровельных конструкциях при климатических воздействиях, в частности, в условиях сухого жаркого климата.

Если о влиянии сухого жаркого климата на поведение бетона в раннем возрасте сложились общепризнанные представления, то результаты исследований поведения зрелого бетона носят противоречивый характер, что затрудняет их практическое использование и требует развития физических представлений о стойкости бетона при атмосферных воздействиях, установления его структурных и физико-механических характеристик, определяющих её.

Актуальной научной проблемой в обеспечении эксплуатационной надежности и эффективности железобетонных кровель является улучшение структуры, физико-механических свойств, поиск новых подходов к подбору составов бетона и разработка эффективной технологии, снижающей негативное влияние температурно-влажностных деформаций и напряжений на различных уровнях его структуры на стойкость при термодинамическом взаимодействии с внешней средой. Учитывая то, что большее число железобетонных конструкций эксплуатируется под неблагоприятным воздействием климатических факторов, решение этой проблемы имеет важное народнохозяйственное значение.

Цель работы. Развитие представлений о формировании структуры и физико-механических свойств, создание основ технологии бетона для кровли с заданными свойствами, разработка эффективных конструктивно-технологических решений железобетонных кровель повышенной эксплуатационной надежности и их внедрение в жилищно-гражданское строительство.

Автор защищает:

- физические представления о стойкости бетона при атмосферных воздействиях и требования к его структуре и физико-механическим свойствам;
- результаты экспериментально-теоретических исследований закономерностей формирования структуры и физико-механических свойств бетона кровли на различных вяжущих и заполнителях;
- принципиальный подход к подбору составов тяжелых и легких бетонов, заключающийся в повышении содержания крупного заполнителя, основанный на теоретических представлениях о вовлечении его в работу бетона;
- эффективность использования напрягающего цемента (НЦ) для улучшения физико-механических свойств, повышения трещиностойкости и атмосферостойкости бетонов в условиях сухого жаркого климата;
- режимы твердения напрягающих бетонов на плотных и пористых заполнителях, обеспечивающие согласованное развитие процессов самоупрочнения и упрочнения бетона без водного ухода;
- новый способ формирования ребристых кровельных покрытий "лицом вниз", обеспечивающий высокое качество лицевых поверхностей и бетона в изделиях при максимальной механизации технологического процесса;
- нормативные требования к проектированию, производству и возведению сборных и монолитных железобетонных кровель.

Научная новизна. Развита и экспериментально подтверждена теоретические представления о формировании структуры и физико-механических свойств тяжелого и легкого бетонов на обычном и напрягающем цементах и разработаны принципы конструирования и технологии изготовления на их основе кровельных покрытий повышенной эксплуатационной надежности.

Сформулированы физические представления о стойкости бетона в условиях резко континентального сухого жаркого климата, основанные на выявленных закономерностях поведения бетона при циклических температурно-влажностных воздействиях. Установлено, что решающее влияние на стойкость зрелого бетона в указанных условиях оказывает не столько циклический нагрев, сколько циклические влажностные и низкотемпературные воздействия.

Разработана физическая модель, позволяющая оценить взаимное влияние компонентов бетона и изменения в его структуре при увеличении содержания крупного заполнителя, сформулированы теоретические представления о механизме вовлечения его в работу бетона. Предложена аналитическая формула, с помощью которой можно качественно оценить влияние на прочность различных бетонов прочностных и деформационных свойств составляющих, их объемной концентрации, прочности сжатия, а также структурных напряжений, обусловленных стесненной усадкой и расширением цементного камня при применении, соответственно, обычного и напрягающего цемента.

Разработан принципиальный подход к подбору составов тяжелых и легких бетонов с повышенным содержанием крупного заполнителя (НСК), характеризующихся регулируемым структурными напряжениями, прочностью, тре-

щиностойкостью, водонепроницаемостью и морозостойкостью. Выявлены закономерности формирования их структуры в зависимости от различных технологических факторов. Показано, что оптимальное сочетание технологических и физико-механических свойств бетона при экономичных расходах вяжущего достигается при принятии контактной структуры для крупного заполнителя и "плавающей" - для мелкого.

Развита представления о формировании микроструктуры цементного камня НЦ и о характере строения его пор, объясняющие высокие показатели прочности и трещиностойкости, непроницаемости и морозостойкости напрягающих бетонов. Показано, что улучшению физико-механических свойств и повышению долговечности напрягающего бетона также способствует благоприятное напряженное состояние его компонентов, обусловленное самоупрочнением. Выявлены закономерности и определены условия твердения напрягающих бетонов с учетом согласованного развития процессов самоупрочнения и упрочнения структуры бетона без дополнительного водного твердения, заключающиеся в использовании низкотемпературного прогрева и водопоглощения пористых заполнителей. Усовершенствована методика определения и регулирования величины $W/C_{\text{ист}}$ (истинного водоцементного отношения) и резервной влаги, учитывающая способность керамзита интенсивно поглощать воду из смеси и впоследствии отдавать ее твердеющему цементному камню.

Определены условия обеспечения трещиностойкости кровельных покрытий, заключающиеся в создании благоприятных сжимающих напряжений в поверхностных слоях конструкций, подверженных атмосферным воздействиям. Выявлены особенности формирования кровельных покрытий в режиме совместного воздействия вибрации и внешнего механического давления. Разработаны и проверены рекомендации по технологии изготовления железобетонных конструкций сложной конфигурации улучшенного качества с повышенной степенью заводской готовности, а также эксплуатируемых кровель из монолитного самоупрочненного железобетона в условиях сухого жаркого климата.

Практическая ценность. Разработаны рекомендации по подбору составов и технологии бетона с НСК, позволяющие обеспечить его высокие физико-механические свойства при снижении расхода цемента до 20%, а при использовании НЦ - до 30%. Предложены новые составы бетонов с широким диапазоном прочности (30,0÷60,0 МПа), водонепроницаемости (0,6÷2,4 МПа) и морозостойкости (F200÷F400) на плотных и пористых заполнителях и с низкой плотностью (1200÷1600 кг/м³) при использовании последних.

Обоснованы нормативные требования к физико-механическим свойствам бетона для кровли, а также предельные уровни сжимающих напряжений в поверхностных слоях бетона кровельных покрытий, обеспечивающих трещиностойкость и долговечность конструкций. Разработаны принципиальные положения и практические рекомендации по конструированию и технологии изготовления сборных и монолитных железобетонных кровель с высокой эксплуатационной надежностью, а также нормативная база по их проектированию,

производству и возведению. Определены области рационального использования результатов настоящего исследования в других областях строительства.

Внедрение. Основные результаты работы использованы:

в строительных нормах и правилах - КМК 2.03.10-95 «Крыши и кровли», КМК 3.03.04-98 «Производство сборных железобетонных конструкций и изделий», КМК 2.01.01-94 «Климатические и физико-геологические данные для проектирования», КМК 2.03.01-96 «Бетонные и железобетонные конструкции»;

в государственных стандартах - РСТ Уз 707-96; РСТ Уз 709-96; РСТ Уз 868-98; РСТ Уз 856-98; РСТ Уз 869-98, регламентирующих технические требования к бетонам и их испытаниям;

в нормативно-рекомендательных документах - Рекомендации по проектированию крыш с теплым (1977г.) и открытым (1986г.) чердаком (ЦНИИЭПЖилища, ТашЗНИИЭП); пособие «Производство сборных самонапряженных железобетонных конструкций и изделий» к СНиП 3.09.01-85 (НИИЖБ);

при экспериментальном и типовом проектировании, строительстве сборных железобетонных кровель для жилых домов серий Уз500, 76, 77, 146, 148, 148П; эксплуатируемых кровель из монолитного железобетона спортивных сооружений (стадион «Трудовые резервы» 1986-1987 гг., теннисный клуб «Динамо» - 1993-1994 гг., СК «Джар» - 1996-1997 гг.), возведенных строительными организациями Ташжилинвестстроя и Узагостроя. Экономический эффект составляет: для сборной кровли $13,5 \div 15,82$ руб/м² и $19,2 \div 21,8$ руб/м² - для монолитной в ценах 1984 года. При этом среднегодовой экономический эффект за 1982-1991 годы равен 1,25 млн. руб. В период с 1991-1999 гг. крыши с железобетонной кровлей на основе атмосферостойкого бетона массово возводятся домостроительными предприятиями столицы - АО «Жилстрой» и «ЭК ОБД», а также Самаркандским ДСК. Экономический эффект только по г. Ташкенту за 1999 год составил 22,3 млн. сумов в ценах на начало 2000 года.

Расширение рациональных областей использования результатов работы характеризуется опытным применением составов бетона с ПСК в железобетонных конструкциях промышленных зданий и метро, выпускаемых АО ЖБИ №2, напрягающего бетона в монолитных покрытиях полов завода «Алгоритм»

Апробация работы. Основные положения и результаты работы доложены:

- на международных конференциях, симпозиумах, семинарах: по бетону и железобетону (Москва-Ленинград, 1991г.); «Архитектурно-строительная наука в развитии экономики Узбекистана» (Ташкент, 1994 г.); по методам восстановления архитектурных памятников: строительным материалам "Ibausil" (Германия 1995,2000 гг.); по стандартизации в строительстве (США, 1996 г.); по строительным материалам и технологиям (Италия, 1998 г.); «Архитектура и строительство на пороге XXI века» (Китай, 1999 г.);

- на всесоюзных и республиканских конференциях, совещаниях, семинарах: по проблеме «Технология бетонных работ в условиях сухого жаркого климата» (Ташкент, 1980 г.); по безрулонным и беспокровным крышам (Москва, 1978, 1991 гг.; Калинин, 1979г.; Ташкент, 1980г.; Душанбе, 1985г.); по бетону и железобетону (Ташкент, 1983г.; Москва, 2001г.); по расчету железобетонных

конструкций в условиях сухого, жаркого климата (Фергана, 1982г.; Ташкент, 1984г.); по легким бетонам (Ереван, 1985г.); по влиянию климата на свойства бетона и железобетона (Тбилиси, 1985г.); по самонапряженному железобетону (Москва, 1982 и 1992 годы; Грозный, 1989г.); по эксплуатационной надежности сооружений при воздействиях внешней среды (Ташкент, 1990г.); по преднапряженному железобетону (Москва, 2000 г.);

- на заседаниях секции НТС ЦНИИЭПЖилища и НИИЖБ (1977, 1980, 1999 гг.); НТС УзЛИГТИ и его секциях (1976-2000 гг.), секции НТС Госархитектстроя Республики Узбекистан (1986 и 1995 гг.).

Публикации. Основные научные результаты, изложенные в диссертации, опубликованы в 63 печатных работах, включая 6 авторских свидетельств и предварительных патентов на изобретения, а также материалы научных журналов, конференций и семинаров.

Объем работы. Диссертация состоит из введения, шести глав, общих выводов, списка литературы из 373 наименований и приложений; изложена на 229 стр. основного текста, содержит 24 таблицы и 82 рисунка.

Работа выполнялась с 1976 по 2000 гг. в АО «УзЛИГТИ» им. Х.Асамова (б. ТашЗНИИЭП). Отдельные исследования проведены в НИИЖБе. Исследования осуществлялись в рамках Государственных и отраслевых научно-технических программ Госстроя СССР (1976-1991гг.) и ГКНТ Республики Узбекистан 16.12.4 и 29.9 в 1992-1999 гг. Положения диссертации основываются на результатах экспериментальных исследований, проведенных непосредственно автором, а также выполненных под его руководством инженерами А.Мусурманкуловым, Т.А.Мухамедбаевым и при участии кандидатов технических наук У.Фазылова, Д.Ш.Исламова, Г.М.Мартиросова, Л.В.Никитиной, Р.Р.Юсупова, Ш.Шаджалилова, М.Н.Абдуллаева и инженера Ю.Ф.Шума, которым автор выражает искреннюю признательность за помощь, оказанную при выполнении работы.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В жилищно-гражданском строительстве до настоящего времени широко применяются кровли из малоэффективных рулонных материалов на битумной основе, отличающиеся низкими эксплуатационными показателями и неподходящими сроками службы, особенно в условиях резко континентального климата. В последние годы определено перспективное направление в повышении эксплуатационной надежности и долговечности крыш, заключающееся в применении сборных и монолитных железобетонных кровель на основе водонепроницаемого бетона. Разработаны эффективные конструкции чердачных крыш с "теплым" и "открытым" чердаком взамен ненадежных бесчердачных.

Исследованию и разработке крыш с железобетонной кровлей посвящены работы Г.А.Айрапетова, И.М.Головачева, Б.А.Данояна, М.И.Диаманта, А.И.Звездова, К.З.Зуфарова, Д.Ш.Исламова, А.Н.Мазалова, Г.М.Мартиросова.

У.Ф.Фазылова, И.И.Шамрикова, Ю.Ф.Шума. К настоящему времени уже накоплен значительный опыт применения таких крыш в жилищном строительстве. К достоинствам чердачных крыш с железобетонной кровлей следует отнести возможность обеспечения их высокой индустриальности, исключение сезонности работ и снижения затрат на содержание, ремонт и эксплуатацию.

Вместе с тем, получившие широкое распространение различные варианты железобетонных кровельных покрытий отличаются несовершенством конструкции и технологии изготовления, что отрицательно сказалось на их эксплуатационных показателях и долговечности. Положение усугублялось отсутствием научно обоснованных рекомендаций по назначению физико-механических свойств бетонов для кровли и их составов, а также четкой нормативной базы по проектированию и производству кровельных конструкций. Недостаточно изучены вопросы улучшения структуры и строительно-технических свойств, стойкости бетона для кровли, технологии его получения с заданными свойствами.

Значительный вклад в исследования структуры и свойств, создание основ технологии цементных бетонов внесли С.В.Александровский, И.Н.Ахвердов, А.Б.Ашрабов, Ю.М.Баженов, О.Я.Берг, М.В.Бунин, А.И.Ваганов, А.А.Гвоздев, А.Б.Гольшнев, С.С.Гордон, Г.И.Горчаков, И.М.Грушко, А.Е.Десов, В.Г.Довжик, Ю.В.Зайцев, И.А.Иванов, В.В.Михайлов, С.А.Мионов, В.М.Москвин, Н.А.Попов, И.А.Рыбьев, В.П.Сизов, М.З.Симонов, И.И.Сытник, Б.Г.Скрамтаев, В.И.Соломагов, В.В.Стольников, А.Е.Федоров, И.М.Френкель, З.Н.Цилосани, Ю.В.Чеховский, А.Е.Шейкин, С.В.Щестоперов, а также Бехгольд, И.Бриджмен, К.Веше, И.Вебер, Лажнар, Пауэрс, Г.Рюш и многие другие.

Анализ современных представлений о прочности бетона и факторах, ее определяющих, показывает, что большинство исследователей связывают ее в основном с микроструктурой и прочностью цементного камня. Значительно меньше работ посвящено исследованию влияния особенностей макроструктуры на прочность бетона, причем и в них она связывается главным образом со свойствами раствора. Остается малоизученным существенный резерв повышения прочности бетона за счет использования высокой прочности крупного заполнителя из плотных горных пород, а в легких бетонах - взаимовлияния пористого заполнителя и раствора на формирование их свойств в бетоне.

Такое положение сложилось в связи с тем, что в традиционной технологии для обеспечения пластичности бетонных смесей применяется структура с "плавающим" крупным заполнителем (по И.М.Френкелю) с относительно большим коэффициентом раздвижки зерен ($\alpha = 1,31-1,56$), предохраняющим повышенные расходы вяжущего. В то же время современный уровень развития методов уплотнения бетонных смесей требует изменения принципиальных подходов к подбору состава бетона. Большой интерес представляет применение бетонов с повышенным содержанием крупного заполнителя, при котором является возможность вовлечения его в работу бетона.

Другим перспективным направлением в улучшении свойств и повышении стойкости бетона является применение напрягающего цемента, разработанного в НИИЖБ под руководством профессора В.В.Михайлова. Развитию этого направления посвящены работы Т.А.Атакузиева, Л.И.Будагянца, Г.Г.Габадалзе, Ф.Л.Глекель, А.И.Звездова, В.А.Загурского, М.И.Искандаровой, И.В.Кравченко, К.Г.Красильникова, Т.В.Кузнецовой, С.Л.Литвера, Г.М.Мартиросова, Л.В.Никигиной, Б.И.Нудельмана, Л.А.Титовой, У.Фазылова, И.Я.Харченко, Е.Н.Щербакова, Р.Р.Юсупова, Ю.Ваганбе, Г.Калаусека, А.Клеина, Г.Лоссье, П.Мета, М.Поливка и других. Способность самонапрягать железобетон, повышать его трещиностойкость, и непроницаемость предопределяет эффективность использования напрягающих бетонов в различных областях строительства. Однако следует отметить малую изученность применения НЦ в легких бетонах, а также особенностей технологии и формирования структуры и свойств напрягающих бетонов в условиях сухого жаркого климата.

Исследованиям технологии и физико-механических свойств бетонов в условиях сухого жаркого климата посвящены работы Б.А.Аскарова, А.И.Адылходжаева, А.Г.Алиева, Э.Х.Аминова, А.Б.Ашрабова, А.А.Ашрабова, Ю.М.Баженова, М.М.Вахитова, А.С.Дмитриева, В.В.Жукова, И.Б.Заседателя, Б.А.Крылова, И.К.Касимова, Х.Камбарова, Р.К.Мамажанова, С.А.Мионова, Л.А.Малининой, Е.Н.Малинского, А.Ф.Милованова, А.М.Мухитдинова, А.М.Подвального, К.И.Пунагина, С.Р.Разакова, Н.А.Самигова, Г.И.Ступакова, О.Г.Тарасова, М.К.Тахирова, Е.С.Темкина, Р.Д.Тешабаева, Т.И.Фазилова, А.Е.Федорова, Б.Б.Хасанова, К.Ч.Чошиева, А.Е.Шейкина, В.А.Шмидта, Е.Н.Щербакова, М.Венюа, Д.Глюклича, Р.Дютрона, Л.Лермига, Р.Миллса, А.Невилля, Р.Шалона и других. Из анализа этих работ следует, что у большинства исследователей сложились единые представления о влиянии физико-климатических воздействий на процессы формирования структуры и свойств твердеющего бетона в раннем возрасте. По влиянию же климата на стойкость затвердевшего, то есть зрелого бетона, имеются самые противоречивые данные, отсутствуют обоснованные методы и критерии ее определения.

В последние годы наметилась тенденция к поиску связи долговечности бетона с воздействием нескольких климатических факторов и разработке специальных комбинированных методов испытаний, а также введения единого комплексного показателя стойкости бетона в условиях сухого жаркого климата. При этом, как наиболее существенный среди факторов выделяется циклический нагрев в интервале $20-70^{\circ}\text{C}$ со значительными суточными перепадами температур, приводящими к образованию трещин и снижению долговечности конструкций даже при $50-150$ циклах нагревания, несмотря на то, что в нормативном возрасте бетон отвечал предъявляемым требованиям по прочности и морозостойкости. Такой вывод противоречит практике эксплуатации различных железобетонных конструкций, в том числе кровельных, в условиях сухого жаркого климата. Как нам представляется, стойкость бетона при воздействии климатических факторов целесообразно оценивать единым комплексным ко-

личественным показателем, поскольку это усложнило бы его практическое использование, а должна определяться частными характеристиками физико-механических свойств материала.

В результате анализа и обобщения исследований структуры, физико-механических свойств и технологии цементных бетонов, накопленного опыта применения крыш с безрулонной кровлей, многочисленных обследований их состояния, проведенных автором в городах различных климатических регионов (Ашхабаде, Душанбе, Москве, Новосибирске, Калинин, Карши, Ташкенте, Ургенче, Фергане, Чирчике и других), сформулирована комплексная научная проблема создания эффективных и надежных в эксплуатации железобетонных кровель. Определена базовая концепция ее решения, включающая вопросы улучшения структуры, строительно-технических свойств и повышения атмосферостойкости бетона для кровли, разработки технологии его получения с заданными свойствами, рационального конструирования кровельных покрытий, их технологической обеспеченности, учета неблагоприятного воздействия климатических факторов на долговременную работу как материала, так и непосредственно конструкций.

При проведении экспериментальных исследований применялись главным образом стандартные и известные методы, отдельные из которых в необходимых случаях были усовершенствованы. Для обеспечения статистической однородности и сопоставимости результатов экспериментов в основном использовались материалы, отвечающие требованиям соответствующих стандартов.

Для формирования более полного физического представления о природе стойкости бетона, установления критериев ее определения и оценки были изучены закономерности влияния различных физико-климатических факторов на поведение и изменение свойств бетона в условиях сухого жаркого климата. Исследования проводились как в лабораторных условиях с использованием климатической камеры "Фейтрон-3001", так и в натуральных - на испытательном полигоне УзЛИТТИ. Кроме того, накоплен обширный экспериментальный материал по результатам систематических наблюдений за поведением и состоянием кровельных конструкций и бетона в них при эксплуатации жилых домов с безрулонной кровлей. В течение двадцати с лишним лет они подвергались в летнее время 1800±2000 циклам нагрева и охлаждения при температуре в среднем, соответственно, 70±75°C и 18±23°C, а также примерно 1300 циклам воздействия отрицательной температуры с переходом через нулевую температуру, с амплитудой колебаний в пределах 8,9±9,8°C. При этом средняя минимальная температура наиболее холодного месяца составляет -4,2°C и абсолютная минимальная -29,5°C, а средняя максимальная температура наиболее жаркого месяца - 35,4°C и абсолютная максимальная - 44,5°C.

Экспериментально-теоретические исследования показали, что при циклическом нагреве и охлаждении зрелого бетона в интервале температур 20±75°C возникающие температурные напряжения в его структуре, обусловленные его композитным строением и различием коэффициентов линейного температур-

ного расширения, не приводят к образованию трещин. Деструкция бетона обусловлена в основном циклическими низкотемпературными и влажностными воздействиями. При этом преобладающее влияние оказывают усадочные деформации и напряжения. Так, величина не проявившихся температурных деформаций бетона ($1 \cdot 10^{-5} \div 12 \cdot 10^{-5}$) при циклическом нагреве и охлаждении в несколько раз меньше его не проявившихся усадочных деформаций ($20 \cdot 10^{-5} \div 40 \cdot 10^{-5}$), которые и являются основной причиной микротрещинообразования в структуре бетона. Наши выводы находятся в определенном согласии с данными Р.И.Аронова, А.Б.Голышева, В.В.Жукова, И.Н.Заславского, К.Д.Некрасова, А.Е.Федорова и других.

Сопоставление результатов комплексных испытаний стойкости бетона в климатической камере на воздействие циклического нагревания и охлаждения, попеременного замораживания и оттаивания с результатами стандартных испытаний бетона на морозостойкость показало их незначительное отличие. Это говорит о том, что стандартная методика испытаний бетона на морозостойкость по существу является универсальной, так как учитывает действие мороза и температурно-влажностные колебания среды. Поэтому ряд положений и выводов, полученных при исследовании морозостойкости, можно распространить и на другие случаи повреждения бетона под воздействием физических факторов внешней среды, в том числе и сухого жаркого климата. Этот вывод согласуется с результатами исследований А.М.Подвального.

В результате многочисленных экспериментальных исследований и наблюдений установлено, что в оценке стойкости бетона для кровли выбор в качестве критериев ее определения таких свойств, как прочность при сжатии и растяжении, водонепроницаемость и морозостойкость, является необходимой и достаточной номенклатурой его качественных показателей. Вопрос заключается лишь в правильном назначении их величин в зависимости от климатических условий, наличия или отсутствия защитных покрытий бетона.

В инструкции ВСН 35-77, являющейся первым нормативным документом по проектированию крыш с безрулонной кровлей, практически для всех климатических районов бывшего Союза были назначены единые требования к физико-механическим свойствам бетона (прочность - не менее М400, водонепроницаемость - не менее W6 и морозостойкость F200) и предусматривалась защита его поверхности окрасочными или мастичными составами. Совершенство норм и уточнение требований к бетону для кровли по мере развития исследований и накопления экспериментальных данных и опыта применения нашли отражение в нормативных документах нашей республики - РСН 20-80, РСН 20-86 и КМК 2.03.10-95 «Крыши и кровли», разработанных под руководством и при непосредственном участии автора в УзЛИТТИ. В них уточнены требования к бетону с защитным покрытием и впервые сформулированы требования к бетону кровельных покрытий без поверхностной изоляции: класс бетона по прочности на сжатие - не ниже В25; марка бетона по водонепроницаемости - не менее W8, по морозостойкости - не менее F300. При этом минимально допустимая прочность бетона снижена с В30 (М400) до В25 (М300), а

ранее принятая марка по водонепроницаемости W10 - до W8. Увеличение указанных характеристик бетона сверх минимально допустимых является одним из перспективных путей повышения эксплуатационной надежности железобетонной кровли, в особенности без поверхностной гидроизоляции. Причем это повышение должно быть обеспечено не за счет увеличения расхода вяжущего, а за счет оптимизации структуры и состава бетона.

Одной из главных задач технологии бетона является получение его заданных свойств при минимальных расходах цемента. Это обусловлено не только экономическими, но и техническими соображениями, поскольку наименее стойкой и малопрочной его составляющей является цементный камень. Вместе с тем, этот важный принцип в традиционной технологии бетонов остается без должного внимания, о чем свидетельствует преимущественное применение бетонных смесей с "плавающим" крупным заполнителем, что не позволяет использовать его высокие прочностные и деформационные показатели. За основным фактор, определяющий прочность бетона, принимается прочность цементного камня, причем при получении бетона с определенной прочностью рекомендуется более высокая марка цемента.

Наши исследования показали, что на цемент с определенной прочностью можно получать бетон не только с той же прочностью, но и с более высокой. Это стало возможным благодаря изменению принципиального подхода к выбору структуры и подбору состава бетона, заключающегося в повышении содержания в нем крупного заполнителя и вовлечении его в работу бетона. Бетоном с ПСК условимся называть бетон с таким строением, когда при его уплотнении крупный заполнитель создает устойчивый каркас, в котором зерна соприкасаются друг с другом при минимальной толщине обмазки, соответствующей коэффициенту раздвижки $\alpha = 1,0 \div 1,24$ и расходу крупного заполнителя: $900 \leq V_{ар} \leq 1000 \text{ л/м}^3$; песок плотно заполняет пустоты крупного заполнителя: цементное тесто заполняет пустоты песка с переменной раздвижкой его зерен в зависимости от расходов цемента и воды, выбираемых в зависимости от прочности и консистенции бетона.

Действующая методика подбора состава бетона, основанная на законе цементно-водного отношения, предусматривает определение необходимого количества и качества цементного теста, а затем оптимального содержания песка для обеспечения необходимой подвижности смеси. При этом заранее задается коэффициент раздвижки зерен, чаще в пределах $\alpha = 1,36 \div 1,52$, что налагает определенное условие на расход цемента, не отвечающее минимальному.

Как нам представляется, для подбора эффективного состава бетона с учетом современных методов уплотнения необходимо исходить из предпосылки о том, что оптимальной является смесь крупных и мелких заполнителей, имеющая наименьшую пустотность или наибольшую плотность в уплотненном состоянии. При заданной прочности бетона и требуемой консистенции смеси минимуму расхода цемента или цементного теста соответствует опреде-

ленное значение отношения объемов мелкого и крупного заполнителей ($K = \frac{V_s}{V_{ар}}$), обеспечивающее минимальную удельную поверхность смеси заполнителей (u). Как показали наши исследования, относительной характеристикой содержания цементного теста в бетоне, определяющей его эффективность, может служить также отношение объемов цементного теста и крупного заполнителя ($Q = \frac{V_c}{V_{ар}}$). При этом в отличие от известного подхода, сохраняя постоянным отношение K , но изменяя степень заполнения пустот мелкого и крупного заполнителей цементным тестом, можно регулировать прочность и подвижность смеси при минимальных расходах цемента. Путем расчетных преобразований K и Q выражаем через удельное содержание цементного теста α_1^* и α_2^{**} , которое требуется для обмазки зерен, соответственно, мелкого и крупного заполнителей с некоторой толщиной δ_1 и δ_2 и определяется их удельной поверхностью u_1 и u_2 , соответственно, $\alpha_1^* = u_1 \delta_1$ и $\alpha_2^{**} = u_2 \delta_2$.

Для бетона с ПСК минимальный расход цемента соответствует случаю, когда все межзерновые пустоты крупного заполнителя при плотной его упаковке или минимальной раздвижке заполнены мелким заполнителем при:

$$K = \frac{\alpha_2(1+\alpha_2^{**})}{1+\alpha_1^*} \quad (1)$$

При этом минимальное относительное содержание цементного теста с учетом (1) будет равно:

$$Q_{\min} = \alpha_1^{**}(1-\alpha_2) + K(\alpha_1 + \alpha_1^*) = \alpha_1^{**}(1-\alpha_2) + \frac{\alpha_2(1+\alpha_2^{**})(\alpha_1 + \alpha_1^*)}{1+\alpha_1^*}, \quad (2)$$

где: α_1 и α_2 - коэффициенты пустотности мелкого и крупного заполнителей.

Использование формул (1) и (2) по сравнению с отношениями $\frac{V_s}{V_{ар}}$ и $\frac{V_c}{V_{ар}}$ значительно облегчает выбор оптимальной структуры бетона по минимальному расходу цемента, так как они учитывают пустотность и удельную поверхность заполнителей. Структура бетона с ПСК является оптимальной с позиции достижения минимальной удельной поверхности смеси заполнителей и, соответственно, необходимой прочности при минимальном расходе цемента.

При заводском производстве железобетонных изделий из пластичных бетонных смесей с умеренной подвижностью ($1 \div 6$ см) эффективные границы расхода крупного заполнителя находятся в пределах $925 \div 975 \text{ л/м}^3$. В более подвижных бетонных смесях ($8 \div 12$ см) для возведения монолитных конструкций требуются более высокие значения коэффициентов α и K :

$$\alpha \geq 1,24; \quad K > \frac{\alpha_2(1+\alpha_2^{**})}{1+\alpha_1^*} \quad (3)$$

Вместе с тем и в этом случае эффективные границы расхода крупного заполнителя превышают традиционные и находятся в пределах $875 \div 900 \text{ л/м}^3$ при $1,24 \leq \alpha \leq 1,31$. Как показали многочисленные опыты, дальнейшее увеличение α при постоянном расходе цемента, не приводя к заметному улучшению

реологических характеристик бетонной смеси, увеличивает ее водопотребность и ухудшает свойства бетона.

Учитывая, что $\delta_2 \approx (0,1+0,2)\delta_1$, а величина α_2^* на порядок меньше α_1^* из-за малой удельной поверхности крупного заполнителя по сравнению с мелким, в приближенных расчетах состава бетона для их упрощения величиной α_2^* можно пренебречь. В этом случае выражения (1) и (2) примут вид:

$$K = \frac{\alpha_2}{1+\alpha_2^*} \quad (4)$$

$$Q_{\min} = \frac{\alpha_2(\alpha_1+\alpha_2^*)}{1+\alpha_2^*} \quad (5)$$

При практическом подборе составов бетона с ПСК в качестве исходного условия необходимо принимать расход крупного заполнителя, а затем определять оптимальные значения K и Q . Дальнейшие расчеты, экспериментальная проверка состава и испытания должны проводиться в соответствии с действующей, достаточно проверенной, методикой для тяжелого и легкого бетонов.

В принципиальную основу предлагаемого подхода к подбору состава бетона с ПСК положена гипотеза о том, что создание его рациональной макроструктуры из плотного каркаса крупного заполнителя с регулируемыми структурными напряжениями будет способствовать наиболее полному использованию прочностных и деформационных свойств заполнителя за счет вовлечения его в работу бетона, а также некоторому разгрузению раствора и повышению его предельной растяжимости. Другим важным аспектом повышения прочности бетона с контактной структурой является возможность улучшения реологии, качества и повышения прочности растворной составляющей, а также прочности ее сцепления с заполнителем за счет увеличения в ней удельного содержания цементного камня при экономичных расходах цемента.

Анализ применения к бетону феноменологической (А.А.Гвоздев, О.Я.Берг, А.Е.Шейкин), статистической (Л.Т.Седракан и другие), структурной (Б.Г.Скрамтаев, А.Е.Десов и другие) теорий прочности показал, что для объяснения механизма вовлечения крупного заполнителя в работу бетона и обоснования предлагаемого подхода к подбору его состава наиболее целесообразным является использование феноменологической теории прочности. В соответствии с ней разрушение бетона наступает при исчерпании предельной растяжимости растворной составляющей в направлении, нормальном к действию внешней нагрузки, и когда реализованы возможности его структуры, препятствующие слиянию отдельных микроразрушений в одну быстрорастущую магистральную трещину. На основе этого можно предположить, что в бетоне с увеличением объемной концентрации высокомодульного крупного заполнителя и регулированием структурных напряжений вышеуказанные возможности его структуры повышаются, что и должно способствовать увеличению его прочности и сопротивлению трещинообразованию.

В качестве теоретической основы для изучения и прогнозирования прочности бетона предложена физическая модель его структуры в виде двухфазной неоднородной среды, состоящей из условно однородной матрицы (растворная

составляющая) и включения (крупный заполнитель). Матрица и включение имеют различные прочностные и деформационные свойства, удовлетворяющие условию совместности деформаций этих материалов, а также имеют постоянные модули упругости, обладают однородностью и изотропностью строения. При этом величины модуля упругости и прочности матрицы меньше, чем у включения. В отличие от известных, разработанная модель позволяет качественно оценить взаимное влияние деформационных характеристик компонентов бетона при его работе под нагрузкой с учетом изменения объемной концентрации, коэффициента раздвижки и расхода крупного заполнителя в пределах $\phi=0,39\div 0,67$, $\alpha=0,89\div 1,63$ и $V_{ar}=750\div 1050$ л/м³.

На основе обработки, анализа и обобщения экспериментальных данных автора (более 1300) и сопоставления их с данными других исследователей (М.Н.Абдуллаева, О.Я.Берга, А.С.Дмитриева, А.И.Звездова, Р.К.Мамажанова, Н.И.Сытника, А.Е.Шейкина, Е.И.Щербакова, Р.Р.Юсупова и др.) были проведены экспериментально-теоретические исследования основных закономерностей сопротивления бетона при осевом сжатии с учетом влияния прочностных и деформационных характеристик его составляющих, их объемной концентрации, вида вяжущего и крупного заполнителя, условий твердения. В результате были сформулированы теоретические представления о механизме разрушения при осевом сжатии бетона в зависимости от принятой структуры (с "плавающим" заполнителем или контактной) и экспериментально подтверждена высказанная гипотеза об эффективности применения структуры бетона с ПСК с регулируемыми структурными напряжениями от усадки и расширения.

При принятии структуры с "плавающим" заполнителем, последний практически не участвует в работе бетона. Напротив, роль заполнителя ограничивается лишь концентрацией структурных напряжений (σ_0), связанных как с непроявившейся усадкой раствора, так и с отличием деформационных свойств заполнителя и раствора. Зерна заполнителя можно рассматривать с точки зрения механики материала как включения, создающие неоднородность и понижающие прочность матрицы. Таким образом, прочность бетона при такой структуре будет зависеть главным образом от прочностных (R_p) и деформационных характеристик (E_p , μ_p) раствора и структурных напряжений (σ_0), в данном случае растягивающих: $R = f(R_p, E_p, \mu_p, \sigma_0)$. В свою очередь σ_0 будет зависеть от величины усадочных деформаций раствора (ε_y^p) и модуля упругости крупного заполнителя (E_a), оказывающего сопротивление проявлению усадки $\sigma_0 = f(\varepsilon_y^p, E_a)$.

При переходе к контактной макроструктуре бетона с повышенной объемной концентрацией высокомодульного крупного заполнителя развитие деформаций и, в первую очередь, трещинообразования при его нагружении, подчиняясь общеизвестным закономерностям, будет иметь несколько иную картину. Так, начало микротрещинообразования и процессы его развития по мере увеличения нагрузки будут зависеть уже не только от свойств раствора, но и от

деформационных свойств крупного заполнителя и его объемной концентрации. Это обусловлено активным влиянием крупного заполнителя ("армирующий эффект") на работу раствора, в особенности в контактной зоне, в которой предельные деформации включений и матрицы будут равны и потребуется более высокий уровень усилий для достижения предельной растяжимости раствора, а следовательно прочность бетона будет больше прочности раствора. Причем в такой структуре бетона увеличивается доля высокопрочной контактной зоны в общем объеме раствора и прочность его сцепления ($R_{\text{с}}$) благодаря улучшению качества за счет увеличения удельного содержания цементного камня. Кроме того, зерна крупного заполнителя, являясь препятствием для роста трещин, замедляют их развитие. В этом случае прочность бетона будет зависеть уже не только от свойств раствора, но и от прочностных и деформационных (E_a, μ_a) характеристик, объемной концентрации (φ_a) крупного заполнителя и других факторов: $R = f(R_p, E_p, E_a, \mu_p, \mu_a, \varphi_a, R_{\text{с}}, \sigma_0)$.

На основе сформулированных представлений, полученных экспериментальных данных с учетом основополагающего теоретического положения о том, что прочность бетона определяется предельной растяжимостью раствора, на которую оказывают влияние содержание и деформационные свойства крупного заполнителя, ее можно приблизительно выразить аналитической формулой.

$$R = \frac{R_p}{1 - \frac{(\mu_p E_a - \mu_a E_p)(1 - \lambda)\varphi_a}{(E_p \varphi_p + E_a \varphi_a)\mu_p}} \pm n \sigma_0, \quad (6)$$

где R_p - прочность растворной составляющей; μ_p и μ_a , E_p и E_a , φ_p и φ_a - соответственно, коэффициенты Пуассона, модули упругости, объемная концентрация растворной составляющей и крупного заполнителя; λ - коэффициент нарушения сцепления растворной составляющей с заполнителем; n - коэффициент, учитывающий влияние σ_0 на прочность бетона.

Формула (6) развивает известные представления о связи прочности бетона с предельной растяжимостью цементного камня (А.Е.Шейкин) в направлении макроструктурного аспекта теории прочности бетона с учетом вовлечения крупного заполнителя в его работу и влияния структурных напряжений, обусловленных усадкой и расширением цементных бетонов. Из формулы следует, что прочность бетона с увеличением объемной концентрации крупного заполнителя увеличивается, что подтверждается многочисленными экспериментальными данными, показавшими, что зависимость $R = f(V_{\text{ар}})$ в пределах значений $V_{\text{ар}} = 850 \div 1000 \text{ л/м}^3$ или $\varphi = 0,46 \div 0,54$ носит прямопропорциональный характер. При этом прочность бетона с увеличением $V_{\text{ар}}$ при постоянной прочности раствора (например, $R_p = 29,0 \text{ МПа}$) изменяется в пределах $28,0 \div 35,0 \text{ МПа}$, а при постоянном расходе цемента (350 кг/м^3) - $30,0 \div 41,0 \text{ МПа}$. В соответствии с ней прочность бетона может быть больше или меньше прочности раствора и с её помощью можно качественно оценить влияние на прочность бетона вида цемента, деформационных характеристик крупных заполнителей, их концентрации и качества сцепления с раствором. Так, при полном нарушении сцепления

($\lambda = 1$) прочность бетона не может быть больше прочности раствора, а скорее будет меньше из-за отрицательного влияния σ_0 . Прочность бетона может быть больше прочности раствора, если до момента разрушения сохраняется некоторое его сцепление с заполнителем, когда λ меньше единицы. При этом чем больше сцепление, тем выше прочность бетона за счет более полного вовлечения заполнителя в его работу. Прочность напрягающего бетона во всех случаях была больше прочности раствора, поскольку обеспечивались высокие значения $R_{\text{с}}$, структурные напряжения были обусловлены самоупрежением, а не усадкой. Знак (\pm) в формуле учитывает именно эту особенность структурных напряжений, связанную с природой их возникновения.

Экспериментальным подтверждением влияния структурных напряжений на прочность бетона на обычном портландцементе (ПЦ) является то, что при $R_p = \text{const}$ увеличение расхода крупного заполнителя ($V_{\text{ар}}$) в пределах от 700 до 850 л/м³ приводит к некоторому снижению прочности бетона, а при дальнейшем увеличении до 950 ÷ 1000 л/м³ - к ее существенному повышению. В последнем случае отрицательное влияние σ_0 перекрывается вовлечением более прочного заполнителя в работу бетона с ПСК. При применении же НЦ - расширяющегося вяжущего - по мере увеличения концентрации заполнителя наблюдается постоянный рост прочности бетона, причем более резкий при переходе к контактной структуре. Это связано с тем, что структурные напряжения обусловлены его самоупрежением $\sigma_0 = f(R_{\text{сн}})$, благодаря которому в бетоне преобладают благоприятные напряжения сжатия. При этом заполнитель, благодаря обжатю, даже при "плавающей" структуре в некоторой степени вовлекается в работу бетона, чему способствует формирование более качественной и плотной контактной зоны, характеризующейся высокой прочностью сцепления компонентов и их взаимным влиянием и совместной работой в условиях самоупрежения до 0,6 ÷ 1,2 МПа. Экспериментальным подтверждением этого является высокая прочность при растяжении ($R_{\text{бт}}$) и трещиностойкость напрягающего бетона по сравнению с обычным, характеризующиеся отношением $R_{\text{бт}}/R$, соответственно, 0,066 ÷ 0,074 и 0,055 ÷ 0,068, а также параметрическими уровнями микротрещинообразования, соответственно, $R_{\text{тр}}^0 = 0,50 \div 0,60 R_b$ и $R_{\text{тр}}^V = 0,82 \div 0,91 R_b$, $R_{\text{тр}}^0 = 0,42 \div 0,47 R_b$ и $R_{\text{тр}}^V = 0,77 \div 0,82 R_b$.

Формула (6) может быть использована и для легких бетонов. В этом случае с увеличением φ прочность бетона повышается за счет увеличения предельной растяжимости пористых заполнителей в среде более прочной растворной составляющей за счет усиления известного "эффекта обоймы". Увеличение расхода керамзита углубляет благоприятное влияние его водопоглощения на формирование структуры цементного камня, в особенности, в контактной зоне. Причем в керамзитобетоне при применении НЦ, при прочих равных условиях, так же, как и в тяжелом бетоне, за счет благоприятного напряженного состояния компонентов наблюдается более высокая прочность.

Экспериментальные исследования закономерностей формирования структуры и физико-механических свойств бетонов с ПСК на плотных и пористых заполнителях показали, что при одинаковых расходах цемента им свойственны большие величины прочности, а при получении равнопрочных бетонов характерны меньшие расходы цемента по сравнению с нормативными (таблица). Данные таблицы составлены на основе анализа и обобщения результатов исследований автора в сопоставлении с действующими нормативными и рекомендательными документами и могут служить в качестве рекомендаций по назначению эффективных расходов вяжущего в бетонах с ПСК.

Следует особо отметить, что керамзитобетону с повышенным расходом керамзита, в пределах $850 \div 950 \text{ л/м}^3$ ($\varphi = 0,54 \div 0,61$), по сравнению с традиционными - $750 \div 800 \text{ л/м}^3$ ($\varphi = 0,48 \div 0,51$), характерны более высокие значения предельной прочности (по А.И.Ваганову), достигаемой на конкретном виде заполнителя. Использование массово производимого в республике керамзита с прочностью $R_{к} = 2,8 \div 3,0 \text{ МПа}$, предназначенного для получения бетонов с прочностью $15,0 \div 25,0 \text{ МПа}$, позволило получить керамзитобетон с предельной прочностью $30,0 \text{ МПа}$ на обычном цементе и до $40,0 \text{ МПа}$ - на НЦ. Полученные закономерности справедливы для легких бетонов и при использовании более прочных пористых заполнителей. Так, при использовании керамзита с $R_{к} = 3,0 \div 3,6 \text{ МПа}$, пригодного для получения бетонов с прочностью $30,0 \text{ МПа}$, при его расходе 950 л/м^3 был получен керамзитобетон с прочностью до $40,0 \text{ МПа}$ при экономичных расходах портландцемента М400. Анализ полученных результатов выявил следующую закономерность: при получении бетона с относительно малой прочностью (до $20,0 \text{ МПа}$) на расход вяжущего большее влияние оказывает расход керамзита. По мере увеличения расхода цемента и прочности бетона ее предельные значения зависят уже от прочностных и деформационных свойств керамзита, что накладывает ограничения на предельные значения его расхода в зависимости от прочностных показателей.

Как показали экспериментальные исследования, прочность как тяжелого, так и легкого бетона с увеличением содержания крупного заполнителя до $0,95 \div 1,0 \text{ м}^3/\text{м}^3$ увеличивается лишь до определенного предела, после которого практически не меняется (в легких бетонах даже снижается). Это объясняется тем, что увеличение содержания крупного заполнителя до $1,05 \div 1,1 \text{ м}^3/\text{м}^3$ приводит к ухудшению удобоукладываемости и уменьшению подвижности бетонных смесей, к снижению их уплотняемости. В легких бетонах это ведет также и к недопустимому увеличению менее прочной составляющей бетона.

Самонапряжение бетона на НЦ является одним из важных его свойств, выгодно отличающих его от других разновидностей цементных бетонов. Так, при затворении напрягающего цемента водой и определенных условиях твердения цементный камень приводится в новое, неизвестное до разработки такого вяжущего псевдотвердое состояние, когда при непрерывном сохранении прочности и упругости бетона проявляются сверхбольшие деформации расширения ($\epsilon_p \geq 2 \cdot 10^{-3}$) и самонапряжение железобетона.

Рекомендуемые расходы вяжущего с учетом свойств материалов

Класс/марка бетона	Расход цемента (кг/м ³) при прочности керамзита при славливании в цилиндре по ГОСТ 9758-86, МПа										Расход цемента, кг/м ³	
	Керамзитобетон на портландцементе М400 и М500					Керамзитобетон с ПСК на ПЦ с активностью 42,0 МПа					бетон с ПСК на ПЦ с активностью 41,5 МПа	напрягающий бетон на гранитном щебне
	По рекомендациям Руководства НИИЖБ					Керамзитобетон с ПСК на ПЦ с активностью 42,0 МПа	Напрягающий керамзитобетон с ПСК на песке		тяжелый	смешанный		
	2,5	3,3	4,5	5,5	6,5		2,8-3,2	3,0-3,6			пористый	тяжелый
B15/200*	320	300	280	260	250	250	230	200	-	-	-	- / 245
B20/250*	390	360	330	310	290	300	275	250	250	260	-	- / 285
B25/300*	-	420	390	360	330	400	330	310	300	320	295	270/325
B30/350*	-	-	450	410	380	-	400	-	350	-	340	320/365
B32,5/400**	-	-	-	480	450	-	520	-	420	-	390	360/405
B40/500**	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	495	415/450
B45/600**	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	590	510/540

* Для легкого бетона класса до В20 и тяжелого до В30 включительно применяется портландцемент М400.

** Для тяжелого бетона классов В 32,5, В40 и В45 применяется портландцемент, соответственно, М500 и М600, нормативный расход которого согласно СНиП 5.01.23-83 приводится в последней графе под чертой

В настоящей работе изучались закономерности изменения самоупрężения, прочности, водонепроницаемости и морозостойкости напрягающего бетона с ПСК в зависимости от вида и расхода заполнителей ($V_{ан}$), расхода НЦ, W/C и других технологических факторов. Анализ результатов экспериментов показал, что изменение $V_{ан}$ неоднозначно влияет как на самоупрężение, так и на прочность напрягающего бетона. Казалось бы, увеличение содержания крупного заполнителя за счет уменьшения мелкого, приводя к уменьшению удельной поверхности смеси заполнителей, должно приводить к повышению самоупрężения. Однако с увеличением $V_{ан}$ повышение самоупрężения происходит до некоторого предела, после которого наблюдается его снижение. То есть имеет место некоторый оптимум, причем для каждого расхода НЦ разный. Так, при расходе НЦ 300, 400, 500 и 600 кг/м³ оптимальные значения самоупрężения соответствуют расходу крупного заполнителя, соответственно, 950±975; 950; 925±950; 925 л/м³. Обращает на себя внимание тот факт, что по мере увеличения расхода НЦ оптимальный расход крупного заполнителя смещается в меньшую сторону. Эта закономерность сохраняется и для прочности. Причем оптимальные значения прочности для каждого конкретного расхода НЦ по сравнению с самоупрężением смещаются в сторону больших значений $V_{ан}$. Это объясняется уменьшением толщины прослоек раствора и усилением армирующего эффекта крупного заполнителя.

Закономерности изменения самоупрężения керамзитобетона в зависимости от расхода НЦ несколько отличны от аналогичных для тяжелых бетонов. Самоупрężение бетона на гранитном щебне определяется расширением его растворной составляющей, то есть энергией расширения и расходом НЦ, и в значительно меньшей степени свойствами заполнителя. Поэтому зависимость $R_{bsn} = f(C)$ для тяжелого бетона в известных пределах близка к прямолинейной. Самоупрężение керамзитобетона с увеличением расхода НЦ, имея криволинейный характер, достигнув определенного предельного значения, при расходах свыше 500 кг/м³ практически не возрастает и определяется деформативностью керамзита. Здесь прослеживается аналогия с предельной прочностью легкого бетона, достигаемой на конкретном виде пористого заполнителя. Причем при расходах НЦ до 500±550 кг/м³ самоупрężение керамзитобетона (0,8±1,0 МПа) выше, чем у тяжелого бетона (0,5±0,7 МПа) Это объясняется тем, что в этих пределах деформативность керамзита играет меньшую роль и величина самоупрężения определяется главным образом полнотой развития процессов расширения цементного камня, которые в легких бетонах протекают в более благоприятных влажностных условиях за счет влаги, поглощенной керамзитом. Кроме того, керамзит, интенсивно поглощая воду из растворной составляющей, существенно уменьшает W/C в бетоне, что является тем принципиально новым фактором, который легкий пористый заполнитель вносит в процессы нарастания самоупрężения бетонов на НЦ.

За последние годы накоплен определенный экспериментальный материал по влиянию технологических факторов на свойства напрягающих бетонов. Для его обобщения в работе использован многофакторный корреляционно-

регрессионный анализ. Обработке были подвергнуты опытные данные автора (156) с привлечением данных (более 210) других исследователей (И.М.Дробященко, А.В.Загурского, Д.Ш.Исламова, Ю.М.Титова, Р.Р.Юсупова). В результате, с учетом наиболее значимых для самоупрężения и прочности бетона факторов (C и R_{cem} - расход и активность НЦ по прочности; M_{en} - энергетическая активность по самоупрężению; W/C ; r - доля песка в смеси заполнителей), были получены, соответственно, следующие уравнения регрессии:

$$R_{bsn} = 2,3 + 0,00039C + 0,437M_{en} - 5,08 \frac{W}{C} - 1,37r, \quad (7)$$

$$R = 117,9 + 1,125R_{cem} - 160,2 \frac{W}{C} - 14,3r, \quad (8)$$

которые обеспечивают наилучшее совпадение опытных и расчетных значений при коэффициенте вариации 18,2 и 20,09 %. При обработке данных в уравнения регрессии вместо $V_{ан}$ были введены значения r , так как большинством исследователей рассматривается именно эта общепринятая характеристика. Полученные уравнения могут быть рекомендованы к практическому применению для прогнозирования и направленного регулирования физико-механических свойств напрягающих бетонов на стадии проектирования их составов.

В работе изучены особенности формирования структуры бетона с повышенными показателями водонепроницаемости и морозостойкости. Основными путями фильтрации воды в бетонах на плотных заполнителях являются растворная часть и зона контакта между нею и гранулами крупного заполнителя (Ю.В.Чеховский), а в легких бетонах на пористых заполнителях - поры и неплотности растворной части (М.З.Симонов, Г.И.Горчаков). Исходя из механизма переноса жидкости в бетонах в основном по растворной составляющей, можно утверждать, что уменьшение ее объема, как наиболее проницаемого компонента, а следовательно увеличение объема крупного заполнителя, должно привести к повышению непроницаемости бетона. Опубликованные данные показывают, что этому направлению уделялось недостаточно внимания. Исследования в основном посвящены изучению влияния микроструктуры цементного камня. Для объяснения влияния на водонепроницаемость и морозостойкость макроструктурных факторов (объемная концентрация, свойства крупного заполнителя и раствора, их взаимное влияние и др.) и их связи с явлениями, происходящими в микроструктуре, развит макроструктурный аспект исследования непроницаемости и морозного разрушения бетона.

Экспериментальные исследования показали, что на водонепроницаемость бетона существенное влияние оказывают вид и расход крупного заполнителя. Так, керамзитобетон был водонепроницаем при давлении воды 1,6 МПа, значительно превышающем показатели для тяжелого бетона (0,3-0,8 МПа). Причем у образцов как тяжелого бетона, так и керамзитобетона с увеличением расхода крупного заполнителя от 750±800 до 950±1000 л/м³ величина воспринимаемого давления воды повышалась с 0,3±0,5 до 0,7±0,9 МПа и с 0,6±0,9 до 1,1±1,6 МПа, соответственно. Высокая водонепроницаемость керамзитобетона с ПСК определяется высокой плотностью растворной составляющей, особенно в контактной зоне. Это обусловлено усилением благоприятного влияния водопо-

глощения керамзита на формирование её слабопористой структуры за счет уменьшения W/C затворения. В тяжелых бетонах с ПСК повышение водонепроницаемости объясняется уменьшением W/C при сохранении подвижности за счет уменьшения доли песка и увеличения удельного содержания цементного теста в растворе. Однако и в этом случае увеличение расхода крупного заполнителя в бетоне целесообразно до определенного предела, не более $0,95 \div 1,0 \text{ м}^3/\text{м}^3$. Дальнейшее его повышение затрудняет получение бетона плотной слитной структуры. Для бетонов с ПСК эффективным является уплотнение смеси с пригрузом интенсивностью $40 \div 60 \text{ ГПа (г/см}^2\text{)}$, что обеспечивает увеличение водонепроницаемости на $20 \div 60\%$ за счет повышения однородности бетона и исключения расслоения, особенно в легкобетонных смесях.

Напрягающие бетоны были водонепроницаемы при максимальном давлении воды $1,6 \div 2,4 \text{ МПа}$, при сравнительно малых расходах НЦ. Установлено, что глубина проникновения воды (определялась раскалыванием образцов) в тяжелом бетоне вдвое превышает эту величину для керамзитобетона. Это объясняется малой величиной $W/C_{\text{нет}} = 0,32 \div 0,36$ в керамзитобетоне, приближающейся к значению $W/C = 0,28 \div 0,30$ у теста нормальной густоты для использованных в экспериментах партиях НЦ. Если в керамзитобетоне высокую непроницаемость можно объяснить низкой пористостью за счет малых значений $W/C_{\text{нет}}$, то в тяжелом бетоне на НЦ недостаточно такого объяснения, так как даже при значениях $W/C = 0,45 \div 0,54$ он был непроницаем при $1,6 \text{ МПа}$. Это обусловлено высокой плотностью и слабопористой структурой цементного камня НЦ с преобладанием условно-замкнутых (резервных) пор, что подтверждается результатами исследований его микроструктуры с использованием сканирующего электронного микроскопа. Установлено, что поры и микрогребни в цементном камне НЦ зарастают игольчатыми кристаллами этtringита ($3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot 31\text{H}_2\text{O}$), что приводит к повышению плотности и уменьшению проницаемости бетона.

Высокая непроницаемость и особенности структуры порового пространства цементного камня бетонов на НЦ с преобладанием резервных пор обуславливают также их повышенную морозостойкость (свыше F400). В условиях развития самонапряжения бетона формируется особо плотная контактная зона и создается благоприятное напряженное состояние, способствующее повышению трещиностойкости и морозостойкости бетона. Так, образцам с упругим ограничением расширения, эквивалентным однопроцентному армированию, в отличие от образцов со свободным его проявлением, свойственны более высокие значения коэффициента морозостойкости, соответственно, $0,98 \div 1,06$ и $0,89 \div 0,91$. Причем с увеличением расхода НЦ для образцов связанного расширения наблюдается увеличение морозостойкости, а для свободных - уменьшение. Такая закономерность объясняется тем, что увеличение энергии расширения растворной составляющей в условиях ограничения расширения усиливает эффект самоуплотнения структуры бетона и уменьшает его дефектность, а при свободном проявлении разуплотняет её.

Для повышения морозостойкости тяжелых и легких бетонов на обычном цементе наряду с общеизвестными способами эффективным является повышение расхода крупного заполнителя. В керамзитобетоне, как это показано для водонепроницаемости, усиливается положительное влияние водопоглощения керамзита на формирование структуры цементного камня в бетоне. В тяжелом бетоне при увеличении $V_{\text{ар}}$ наблюдается, с одной стороны, как отмечено выше, уменьшение W/C, которое приводит к снижению пористости, а также величин усулочных деформаций и, как следствие, внутренних растягивающих структурных напряжений в бетоне, а с другой стороны - способствует вовлечению заполнителя в работу бетона и повышению предельной растяжимости раствора. Следует отметить, что увеличение расхода цемента в рассматриваемых пределах оказывает положительное влияние в меньшей степени, чем увеличение расхода крупного заполнителя. Если бетон с ТВО при расходе цемента 350 кг/м^3 и щебня 800 л/м^3 имеет после 300 циклов $K_F = 0,65$, а при 900 л/м^3 - $0,77$, то при увеличении расхода цемента до 450 кг/м^3 - $0,71$. Увеличение $V_{\text{ар}}$ положительно сказывается на морозостойкости бетона только до его предельного значения $950 \div 975 \text{ л/м}^3$, после чего наблюдается снижение K_F , причем более интенсивное для керамзитобетона.

Решение вопроса о потребном количестве составляющих для бетона неразрывно связано с важнейшей характеристикой - подвижностью (удобоукладываемостью) бетонной смеси. Структуру бетонной смеси считается удобным рассматривать как двухкомпонентную систему, состоящую из цементного теста и заполнителя с непрерывно возрастающей гранулометрией, в которой введение заполнителя вызывает уменьшение подвижности, причем тем существеннее, чем выше его содержание и удельная поверхность. Основные принципиальные положения в технологии бетона заключаются в следующем: с увеличением содержания цементного теста при постоянном W/C или уменьшением количества заполнителей подвижность бетонной смеси возрастает, а прочность остается практически неизменной; для обеспечения подвижности смеси следует не только заполнить пустоты, но и раздвинуть зерна заполнителя прослойками из цементного теста. Эти положения легли в основу руководящих документов по подбору составов бетонов. Однако следует отметить, что в них уже рассматривается двухкомпонентная система: растворная составляющая - крупный заполнитель, и для пластичных бетонных смесей устанавливается коэффициент раздвижки зерен крупного заполнителя в пределах $\alpha = 1,31 \div 1,56$. Этим был предопределен повышенный расход цемента, поскольку принцип необходимости раздвижки зерен заполнителя, установленный для системы "цементное тесто - заполнитель", был необоснованно перенесен на систему "растворная составляющая - крупный заполнитель".

Как показали наши исследования, закономерности, установленные для двухкомпонентной системы "цементное тесто - заполнитель", неприемлемы для системы "раствор - крупный заполнитель". Так, если при постоянном рас-

ходе вяжущего и W/C введение в цементное тесто заполнителя снижает подвижность смеси, то введение крупного заполнителя в растворную составляющую за счет уменьшения мелкого, напротив, её повышает. Увеличение содержания крупного заполнителя с 800 до 1000 л/м³ для получения бетонной смеси с определенной подвижностью, при постоянном расходе цемента, приводит к уменьшению водопотребности смеси, а при постоянном расходе цемента и W/C - к увеличению подвижности смеси с 1±2 до 5±6 см ОК. Это объясняется: во-первых, уменьшением удельной поверхности смеси заполнителей, а следовательно водопотребности; во-вторых, увеличением удельного содержания цементного теста в растворной составляющей за счет изменения соотношения цемент:песок (C:S). Так, при C-const (например, 350 кг/м³) оно составляет при расходе щебня 800±850 л/м³ в пределах 1:2 ÷ 1:2,2, а при 950±1000 л/м³ - в среднем 1:1,4 ÷ 1,6. При расходе цемента 450 кг/м³ и более, соответственно, уже 1:0,87 ÷ 1:1 и 1:0,57 ÷ 0,75.

При изучении технологии бетона слитного строения, по аналогии с рассмотрением вопросов его прочности, можно выделить два типа структуры: с контактными расположением зерен заполнителя, когда они соприкасаются друг с другом через тонкую прослойку цементного теста, и "плавающее" - когда зерна находятся на значительном удалении друг от друга. Нам представляется, что при рассмотрении структуры бетона как с позиции обеспечения высокой прочности, так и технологичности, необходимо стремиться к получению контактной структуры для крупного заполнителя с предельным $V_{gr} \leq 1000$ л/м³ и к "плавающей" - для мелкого при C:S в пределах 1:1 ÷ 1:1,5.

В смесях на пористых заполнителях при постоянном расходе цемента и W/C увеличение V_{gr} приводит к снижению подвижности смеси. Поэтому для сохранения подвижности требуется большее количество воды, но это, как правило, не приводит к снижению прочности бетона, так как величина $W/C_{сет}$, определяемая по предложенной в работе методике, значительно меньше водоцементного отношения, принятого при затворении.

Технология самонапряженных конструкций для обеспечения развития процессов расширения предусматривала водный уход в течение 7÷10 суток, что значительно усложняло их производство. Как показали наши исследования, изготовление напрягающих бетонов на пористых заполнителях с использованием их способности поглощать воду из смеси и отдавать ее впоследствии твердеющему цементному камню позволяет обеспечить развитие процессов самонапряжения бетона без длительного водного ухода. Комплексными физико-химическими исследованиями с использованием методов дифференциально-термического, рентгенофазового и химического анализов кинетики гидратации НЦ в керамзитобетоне установлено сходство в кинетике связывания гипса и образования $3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 3CaSO_4 \cdot 31H_2O$ - этрингита в керамзитобетоне воздушно-влажностного и водного твердения, что свидетельствует о благоприятном влиянии влаги в керамзите на гидратацию НЦ. При этом керамзит не оказывает существенного влияния на фазовый состав продуктов гидратации НЦ и реак-

цию образования гидросульфатоалюмината кальция. Наблюдается лишь частичное связывание $Ca(OH)_2$ тонкомолотой составляющей керамзита, в результате чего образуется дополнительное количество нерастворимых гидратных новообразований, вероятно, гидросиликатного характера.

Результаты экспериментальных исследований, находящиеся в определенном согласии с данными В.А.Загурского, С.Л.Литвера, Н.В.Сабаевой, показали, что достижение максимальной степени развития самонапряжения тяжелого (0,40±0,50 МПа) и легкого (0,52±0,64 МПа) бетонов, в результате согласованного их развития с процессами упрочнения структуры бетона, также возможно без дополнительного водного ухода при тепловлажностной обработке (ТВО) с температурой изотермического прогрева 60±5°C. При последующем естественном хранении в тяжелом бетоне после ТВО начинают развиваться усадочные деформации, а в керамзитобетоне наблюдается дальнейший рост самонапряжения, и после достижения максимума в пределах 0,58±0,72 МПа в 5÷7-суточном возрасте начинают проявляться усадочные явления. Потери самонапряжения от усадки керамзитобетона составляют 45,7±48,2 %, а в бетонах на плотных заполнителях - до 70÷80 %. Для обеспечения самонапряжения бетона естественного твердения в монолитных конструкциях обязательным является водное твердение не менее 7 суток. При последующем естественном хранении потери самонапряжения от усадки монолитного бетона с расходом НЦ 350±550 кг/м³ составили 55±58,8 %. После проявления потерь от усадки сохраняется определенное самонапряжение (0,27±0,48 МПа) бетона, обеспечивающее его усадочную трещиностойкость.

При длительном наблюдении за развитием линейных деформаций напрягающих бетонов в лабораторных и естественных условиях сухого жаркого климата была установлена очень важная их особенность - восстанавливать самонапряжение во влажные периоды года, что очень важно для обеспечения атмосферостойкости конструкций. Экспериментальные исследования характера изменения самонапряжения под воздействием специального режима попеременного нагревания и охлаждения, увлажнения и высушивания бетона показали, что самонапряжение образцов в процессе испытаний в пределах каждого цикла, падая иногда до нуля при нагревании до 65÷74°C и полностью восстанавливаясь при увлажнении, изменялось в среднем в пределах 0,2±0,5 МПа. Следовательно, в самые неблагоприятные периоды года обеспечивается трещиностойкость и атмосферостойкость напрягающих бетонов, что подтверждается многолетними наблюдениями в условиях Ташкента за бетоном в сборных и монолитных кровельных покрытиях.

Для бетона кровли практическое значение имеет повышение нижнего параметрического уровня микротрещинообразования $R_{гг}^*$ (по О.Я. Бергу), который чутко реагирует на изменения в его структуре в зависимости от вида и расхода крупного заполнителя и вяжущего. Так, тяжелый и легкий бетоны на обычном портландцементе (ПЦ) характеризуются меньшими значениями $R_{гг}^*$ (0,42±0,47R_b и 0,45±0,50 R_b) по сравнению с бетонами на НЦ (0,50±0,60R_b и

0,52±0,63 R_b). Верхняя граница образования микротрещин (R_{сгс}^v) составляет, соответственно, для тяжелых бетонов на ПЦ и НЦ 0,77±0,82R_b и 0,82±0,91 R_b, а для легких бетонов 0,80±0,86R_b и 0,83±0,95 R_b.

В тяжелом бетоне при постоянной прочности раствора увеличение содержания крупного заполнителя от 800 до 900 л/м³ приводит к снижению R_{сгс}^o на 10±12 %, что объясняется повышением концентрации структурных напряжений от не проявившейся усадки. Дальнейшее увеличение V_{ар} до 1000 л/м³ приводит к повышению R_{сгс}^o, что, вероятнее всего, можно объяснить положительным влиянием высоко модульного заполнителя на предельную растяжимость и трещиностойкость раствора, превалирующем над влиянием структурных напряжений. Полученные результаты подтверждают вовлечение крупного заполнителя в работу бетона при его расходах в пределах 925±1000 л/м³.

В керамзитобетоне на обычном цементе и в напрягающих бетонах как на плотных, так и пористых заполнителях, с увеличением их расхода R_{сгс}^o повышается, соответственно, на 13±15, 19±21 и 22±24 %. При постоянном расходе вяжущего с увеличением расхода крупного заполнителя во всех случаях наблюдается повышение R_{сгс}^o и R_{сгс}^v за счет улучшения качества раствора, благодаря повышению удельного содержания цементного камня, и ограничения развития трещин, создаваемого высоко модульным крупным заполнителем.

На основе экспериментально-теоретических исследований определены прочностные и деформационные характеристики бетонов с ПСК при сжатии и растяжении. Установлено, что коэффициент призмочной прочности (K_{bc}) напрягающего бетона по мере увеличения V_{ар} от 850 до 950 л/м³ изменяется в пределах 0,76±0,80, а обычного - 0,74±0,78. Для керамзитобетона на обычном и напрягающем цементе, соответственно, 0,82±0,84 и 0,84±0,86. Значения начального модуля упругости для исследованных бетонов с ПСК, из-за их незначительного отличия, рекомендуется принимать в соответствии с действующими нормами в зависимости от класса бетона; в легких бетонах - также с учетом их плотности. Зависимость прочности бетона на ПЦ при растяжении (R_{bc}) от его прочности при сжатии носит криволинейный характер, а для бетона на НЦ - близка к прямолинейной, так как R_{bc} бетонов на НЦ класса В25 и выше превышает аналогичную характеристику бетонов на портландцементе на 20±27%. Для проведения испытаний призматических образцов на осевое растяжение была разработана методика, учитывающая твердение напрягающих бетонов в динамометрических кондукторах.

На основе проведенных исследований разработаны практические рекомендации по назначению прочностных и деформационных характеристик бетонов на обычном и напрягающем цементах. Сформулированы основные требования к проектированию конструкций железобетонных кровельных покрытий, основополагающим среди которых является обязательное требование о необходимости создания в поверхностных слоях бетона, подверженных атмосферным воздействиям, благоприятных сжимающих напряжений, обеспечивающих трещиностойкость и долговечность бетона. При этом сжимающие напряжения

не должны превышать уровень 0,4R_b, соответствующий минимальным значениям R_{сгс}^o для изученных составов бетона. Более высокий уровень напряжений приводит к снижению водонепроницаемости и морозостойкости бетона.

Эффективным является расположение поверхностей кровельных покрытий, подверженных атмосферным воздействиям, в сжатой зоне их сечения. Многочисленные статические испытания различных вариантов кровельных покрытий (более 20 натуральных конструкций складчатого и прямоугольного сечения, и типа "2 Т"), разработанных по этому принципу, показали их высокую жесткость, трещиностойкость и несущую способность. На основе натуральных исследований даны рекомендации по устройству стыков и креплений конструкций к опорам, исключающих появление неблагоприятного напряженно-деформационного состояния и трещин в поверхностных слоях покрытий при циклических температурно-влажностных и сейсмических воздействиях.

В обеспечении долговременной надежной работы кровельных покрытий важной является технологическая обеспеченность высокого качества лицевых поверхностей и заданных свойств бетона в изделиях. Однако, как показало производство опытных изделий, сложная конфигурация и ребристое очертание кровельных покрытий с расположением основной плиты в сжатой зоне сечения затрудняли обеспечение их необходимого качества при формировании традиционными способами, требующими использования подвижных бетонных смесей (6÷8 см) с повышенным расходом цемента и воды. В результате проявления седиментационных явлений, а также усадки и температурных деформаций при тепловлажностной обработке изделий в поверхностных слоях бетона появлялись технологические трещины, снижающие долговечность конструкций.

В работе предлагается способ формирования ребристых кровельных конструкций "лицом вниз" по аналогии с виброштампованием. Принципиальное его отличие заключается в разделении формообразующей поверхности и органа, создающего давление и вибрацию. Формование изделий производится на обычных виброплощадках с использованием основной формы, жесткой облегченной формообразующей матрицы (штампа) и отдельного инерционного пригруза интенсивностью 40±60 ГПа. Способ позволяет изготавливать кровельные конструкции из бетонных смесей с ПСК при умеренной подвижности (1÷5 см) с высоким качеством бетона и его лицевых поверхностей в изделиях полной заводской готовности при минимальных трудовых затратах; исключить деструкционные явления в период предварительной выдержки и ТВО за счет замкнутого объема оснастки и зафиксированного обжатия бетона, созданного при формировании изделий под внешним механическим давлением.

Экспериментальное и массовое применение предложенной конструкции и технологии кровельных покрытий на основе атмосферостойких бетонов при строительстве крыш жилых домов серий Уз500, 77 и 148 показало их высокую технико-экономическую эффективность. Общий экономический эффект за период их массового строительства составил только по г.Ташкенту 6,72 млн.руб. в ценах 1984 года. В 1999 году АО «Жилстрой» и АО «ЭК ОБД» возведено

кровель из атмосферостойкого бетона, соответственно, 3,8 и 2,1 тыс.м² с экономическим эффектом 14,5 и 7,8 млн. сум/год в ценах на начало 2000 года.

Реконструкция трибун стадиона «Трудовые резервы» с использованием напрягающего бетона взамен ненадежной многослойной гидроизоляции позволила отработать конструктивно-технологические решения и определить требования к устройству монолитных самоупроченных покрытий в экстремальных условиях сухого жаркого климата. Экономический эффект составил около 400 тыс.руб. в ценах 1984 года. Для возведения монолитных железобетонных покрытий трибун стадионов теннисного клуба «Динамо» и спорткомплекса «Джар» использовался бетон на обычном цементе. Установлено, что расстояние между температурно-усадочными швами при применении ПЦ должно быть не более 6 м, а при НЦ - не более 24 метров, что позволяет значительно сократить количество швов при применении самоупроченного покрытия.

Многолетняя эксплуатация как сборных, так и монолитных железобетонных кровель на основе бетона на плотных и пористых заполнителях показала их высокую надежность. Перспективным является применение конструкций на основе напрягающих бетонов, что говорит о важности продолжения исследований по получению НЦ на основе местных сырьевых материалов и о целесообразности организации его производства в нашей республике.

Основные положения и выводы диссертации использованы в КМК 2.03.10-95 «Крыши и кровли» и КМК 3.03.04-98 «Производство сборных железобетонных конструкций и изделий», разработанных под руководством и при непосредственном участии автора, а также в ряде действующих нормативных и рекомендательных документов, государственных стандартов. На основе отдельных исследований и опытного применения определены области рационального использования результатов работы в жилищно-гражданском, промышленном, гидротехническом строительстве и в метростроении.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

1. На основе анализа, обобщения и экспериментально-теоретических исследований сформулированы теоретические представления о формировании структуры и физико-механических свойств бетона с повышенным содержанием крупного заполнителя (ПСК), созданы научные основы технологии кровельного бетона с заданными свойствами на обычном и напрягающем цементах, плотном и пористом заполнителях при экономичных расходах вяжущего, разработаны эффективные конструкции и технология сборных и монолитных железобетонных кровель для жилищно-гражданского строительства в условиях сухого жаркого климата, направленные на решение проблемы, имеющей важное народнохозяйственное значение.

2. Выявлены закономерности влияния на поведение цементных бетонов климатических факторов и развиты физические представления о стойкости бетона в условиях резко континентального сухого жаркого климата. Показано,

что решающее влияние на стойкость бетона оказывает не столько циклический нагрев, сколько циклические высокотемпературные и влажностные воздействия. Обоснованы минимально допустимые величины физико-механических свойств бетона для железобетонных кровельных покрытий: с поверхностной гидроизоляцией - класс по прочности на сжатие - не менее В25 и на растяжение - не менее В, I,6, водонепроницаемость - не ниже марки W6, морозостойкость - не ниже марки F200; без поверхностной изоляции, соответственно, - не менее В25, В, I,6, W8 и F300.

3. Предложен принципиальный подход и даны расчетные предпосылки для подбора составов бетона с ПСК, основанные на создании его рациональной макроструктуры, обеспечивающей прочность, водонепроницаемость и морозостойкость при экономичных расходах вяжущего. К бетонам с ПСК отнесен бетон с таким строением, когда крупный заполнитель создает устойчивый каркас, в котором зерна соприкасаются друг с другом при минимальной толщине прослойки раствора, соответствующей коэффициенту раздвижки зерен $1,0 \leq \alpha \leq 1,24$ и расходу заполнителя $900 \leq V_{\text{зап}} \leq 1000 \text{ л/м}^3$.

4. На основе структурного моделирования поведения бетона под нагрузкой развит макроструктурный аспект и сформулированы теоретические представления о связи структуры и прочности бетона с ПСК, объясняющие механизм вовлечения крупного заполнителя в его работу. Предложены аналитические зависимости прочности различных бетонов, учитывающие влияние деформационных свойств составляющих бетона, их объемной концентрации и прочности сцепления, а также структурных напряжений, обусловленных стесненной усадкой и расширением цементного камня.

5. Выявлены закономерности формирования структуры и свойств бетонов с ПСК с учетом направленного регулирования структурных напряжений от усадки и расширения цементного камня. Определены эффективные границы расхода вяжущего и крупного заполнителя в зависимости от их вида и прочности бетона. При получении тяжелых бетонов с прочностью $30,0 \div 50,0 \text{ МПа}$ на цементе М400 составы с ПСК характеризуются снижением расхода вяжущего на $15 \div 22\%$. На малопрочном керамзите был получен керамзитобетон с прочностью $25,0 \div 30,0 \text{ МПа}$ и сравнительно низкой плотностью - $1200 \div 1600 \text{ кг/м}^3$ на обычном цементе и, соответственно, $30,0 \div 40,0 \text{ МПа}$ и $1200 \div 1400 \text{ кг/м}^3$ - на НЦ.

6. Установлено, что использование НЦ в тяжелых и легких бетонах, по сравнению с обычным цементом, при равных расходах позволяет существенно повысить их прочность или, при получении равнопрочных бетонов, сократить расход вяжущего до $20 \div 30\%$. Высокая прочность напрягающего бетона обусловлена благоприятным напряженным состоянием его компонентов и высокой прочностью сцепления в условиях самоупрочения. Закономерности изменения самоупрочения от расхода НЦ для тяжелого бетона носят линейный характер, а для керамзитобетона - нелинейный, что связано с деформационными свойствами керамзита. Предложено ввести понятие предельного самоупрочения бетона, достигаемого на конкретном виде пористого заполни-

теля. На основе многофакторного корреляционно-регрессионного анализа получены математические модели для прогнозирования, направленного регулирования и получения напрягающих бетонов с заданными свойствами.

7. Показано, что эффективным путем повышения водонепроницаемости бетонов до W6÷W8 и морозостойкости F200÷F300 является увеличение $V_{ад}$ до 950÷1000 л/м³, а также использование вибрации с пригрузом интенсивностью 40÷60 ГПа. Наибольшую водонепроницаемость (при давлении воды 2,4МПа) и морозостойкость (более F300) имеют бетоны на НЦ, что объясняется их высокой плотностью и слабопористой структурой (с преобладанием условно-замкнутых резервных пор), обусловленной зарастанием пор и микротрещин в цементном камне игольчатыми кристаллами эттрингита.

8. Установлено, что бетонные смеси с ПСК, подчиняясь известным закономерностям изменения свойств в зависимости от технологических факторов, обладают повышенной подвижностью по сравнению со смесями с "плавающим" крупным заполнителем благодаря увеличению удельного содержания цементного теста при экономичных расходах вяжущего. Определен принцип обеспечения оптимального сочетания технологических и физико-механических свойств бетона с ПСК, заключающийся в принятии контактной структуры для крупного заполнителя и "плавающей" - для мелкого.

9. Разработана методика определения и регулирования величины W/C_{сет} и резервной влаги, учитывающая способность керамзита интенсивно поглощать воду из смеси и впоследствии отдавать ее твердеющему цементному камню, что позволяет без водного ухода обеспечить развитие процессов расширения и самонапряжения бетона. Достижение максимальной степени развития процессов самонапряжения как тяжелого, так и легкого бетона в период ТВО, в результате согласованного их развития с процессами упрочнения структуры бетона, возможно при низкотемпературном прогреве в пределах 60±5°С.

Экспериментально установлена важная особенность напрягающих бетонов восстанавливать во влажные периоды года потери самонапряжения, обусловленные усадкой. Это обеспечивает трещиностойкость и атмосферостойкость бетона в неблагоприятные сезоны эксплуатации.

10. На основе экспериментально-теоретических исследований поведения бетона с ПСК под нагрузкой выявлены закономерности его трещинообразования, определены прочностные и деформационные характеристики с учетом вида вяжущего, заполнителей и условий твердения. Установлено, что для бетона кровли практическое значение имеет повышение уровня $R_{ср}^0$, соответствующего началу микротрещинообразования в его структуре и изменяющегося в зависимости от вида бетона, расхода крупного заполнителя и вяжущего.

11. Разработаны и экспериментально обоснованы принципы конструирования кровельных покрытий, обеспечивающие их трещиностойкость и надежность за счет создания благоприятного напряженно-деформированного состояния основной плиты подбором рационального поперечного сечения конструкций с расположением поверхностей, подверженных атмосферным воздействи-

ям, в сжатой зоне сечения конструкции. При этом уровень сжимающих напряжений не должен превышать $0,1R_{ср}^0 - R_{ср}^0$. Более высокий уровень напряжений может привести к снижению водонепроницаемости и морозостойкости бетона.

12. Предложен новый способ формирования ребристых кровельных покрытий сложной конфигурации "лицом вниз" по аналогии с виброштампованием, позволяющий изготавливать конструкции с высоким качеством бетона и лицевых поверхностей в изделиях полной заводской готовности, исключить деструкционные явления в бетоне в период предварительной выдержки и ТВО.

Разработаны конструктивно-технологические решения и определены требования к устройству монолитных покрытий из самонапряженного и обычного железобетона в условиях сухого жаркого климата.

Строительство и многолетняя эксплуатация сборных и монолитных железобетонных кровель показали их высокую эффективность и эксплуатационную надежность. Основные положения и выводы диссертации нашли отражение в ряде действующих нормативных и рекомендательных документов, государственных стандартов, что является основой расширения рационального использования результатов работы в различных отраслях строительства.

Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах:

1. Статьи

1. Асамов Х., Ходжаев С.А., Титова Л.А., Абдуллаев М.Н. Особенности технологии полов из напрягающего бетона // Архитектура и строительство Узбекистана. - 1986. - № 5. - С. 36-38.
2. Абдуллаев М.Н., Ходжаев С.А. Напрягающий бетон для устройства полов промышленных зданий // Архитектура и строительство Узбекистана. - 1986. - № 10. - С. 33-36.
3. Диямант М.И., Мартиросов Г.М., Фазылов У.Ф., Федькин Н.И., Звездов А.И., Ходжаев С.А. Элементы безрулонной кровли из напрягающего бетона // Бетон и железобетон. - 1981. - № 6. - С. 18-19.
4. Кондраков М.Х., Ходжаев С.А., Ходжаев С.А. Напрягающий бетон для железобетонных изделий водохозяйственного строительства // Опыт и перспективы применения бетонов на напрягающем цементе в строительстве / Материалы семинара. - М.: Центральный Российский Дом Знаний, 1992. - С. 59-63.
5. Михайлов В.В., Ходжаев С.А. Водонепроницаемый самонапряженный керамзитобетон // Бетон и железобетон. - 1979. - № 5. - С. 16-18.
6. Фазылов У.Ф., Мартиросов Г.М., Ходжаев С.А. Напрягающие бетоны для безрулонных крыш жилых зданий // Архитектура и строительство Узбекистана. - 1983. - № 3. - С. 30-32.
7. Фазылов У.Ф., Ходжаев С.А., Мусурманкулов А., Мукумов Т. К вопросу о нормировании физико-механических свойств бетона для кровли / Расчет, проектирование и испытание железобетонных конструкций, предназначенных для эксплуатации в условиях сухого жаркого климата // Сб. науч. трудов ТашПИ. - Ташкент: ТашПИ, 1985. - С. 122-125.

8. Фазылов У., Ходжаев С.А., Юсупов Р.Р., Мукумов Т. Температурно-влажностные деформации конструкций безрулонных крыш, эксплуатируемых в климатических условиях Средней Азии // Сб. Влияние климатических условий и режимов нагружения на деформации и прочность конструктивных бетонов и элементов ж/б конструкций / Всесоюзное координационное совещание (15-19 октября 1985 г., Тбилиси, Гори). - Тбилиси: ГрузНИИстром, 1985.
9. Ходжаев С.А. Бетон для кровельных панелей без гидроизоляционной защиты // Строительство и архитектура Узбекистана. - 1982. - № 6. - С. 7-9.
10. Ходжаев С.А. Конструктивно-технологические особенности монолитного самонапряженного железобетона // Маскан. - 1993. - № 5-6. - С. 7-9.
11. Ходжаев С.А. О классификации и нормах проектирования крыш и кровель // Архитектура и строительство Узбекистана. - 1997. - № 3-4. - С. 39-41.
12. Ходжаев С.А. Особенности напрягающих бетонов на пористых заполнителях // Материалы XXIII Международной конференции в области бетона и железобетона (16-23 мая 1991 г.). - Волго-Балт-91. - М.: Стройиздат, 1991. - С. 194-195.
13. Ходжаев С.А. Особенности формирования структуры и технологии волонепроницаемых бетонов // Бетон и железобетон. - 2000. - № 4. - С. 10-12.
14. Ходжаев С.А. Особенности физико-механических свойств напрягающих бетонов в сборных и монолитных конструкциях // Бетон и железобетон. - 2001. - № 4. - С. 20-23.
15. Ходжаев С.А. Теоретические представления о структуре и прочности бетона с повышенной объемной концентрацией крупного заполнителя // Проблемы механики. - 2000. - № 2. - С. 49-53.
16. Ходжаев С.А. Физические представления и критерии оценки атмосферостойкости бетона // Архитектура и строительство Узбекистана. - 1999. - № 3-4. - С. 33-34.
17. Ходжаев С.А., Фазылов У.Ф., Мартиросов Г.М. Конструктивно-технологические особенности беспокровных крыш и опыт их применения в IY климатическом районе // Сб. Железобетонные беспокровные крыши жилых, общественных и производственных зданий. Материалы конференции. - М.: МДНТП им. Ф.Э. Дзержинского, 1991. - С. 26-29.
18. Ходжаев С.А., Юсупов Р.Р. Напрягающий керамзитобетон для конструкций жилых домов в сейсмических районах // Опыт и перспективы применения бетонов на напрягающем цементе в строительстве / Материалы семинара. - М.: Центральный Российский Дом знаний, 1992. - С. 55-58.
19. Ходжаев С.А., Юсупов Р.Р., Исламов Д.Ш., Мартиросов Г.М. Опыт и перспективы применения самонапряженного железобетона в IY климатическом районе // Ресурсосберегающие технологии железобетонных конструкций на основе напрягающих цементов. - М.: Стройиздат, 1989. - С. 35-38.
20. Ходжаев С.А., Юсупов Р.Р., Шаджалилов Ш. и др. Прочность и деформации напрягающего керамзитобетона // Бетон и железобетон. - 1982. - № 9. - С. 31-32.
21. Rakhmanov A.P., Khodjaev S.A. Registan Architectural Ensemble in Samarkand. Problems of Protection, Restoration and Modern Usage // Historic monuments in seismic regions. Usbek-German Workshop. Bauhaus - Universität Weimar: Wissenschaftliche Zeitschrift. - 1996. - J. 42. - N. 1. - S. 17-19.

22. Chodshaew S.A. Besonderheiten der Struktur und Technologie wasserdichter Betone // Baurecht. 14. Internationale Baustofftagung 20.23. September 2000 / Bauhaus-Universität Weimar. Tagungsbericht. Band 2. S. 1057-1064.

II. Патенты и авторские свидетельства

23. А.с. 688472 (СССР). Керамзитобетонная смесь / Г.М. Мартиросов, В.В. Михайлов, У. Фазылов, С.А. Ходжаев, Ю.Ф. Шум. - Оpubл. 1979, Б.И. № 36.
24. А.с. 836304 (СССР). Железобетонная плита для скатных безрулонных сборных крыш / У. Фазылов, К. Зуфаров, Ю.Ф. Шум, С.А. Ходжаев. - Оpubл. 1981, Б.И. № 21.
25. Предварительный пат. РУз. 4682 В. Способ формования железобетонных изделий / С.А. Ходжаев, Ю.Ф. Шум. - Оpubл. // Б.И. - 1997. - № 4.
26. Предварительный пат. РУз. 4704 В. Керамзитобетонная смесь / С.А. Ходжаев, А. Мусурманкулов. - Оpubл. // Б.И. - 1997. - № 4.
27. Предварительный пат. РУз. 4705 В. Керамзитобетонная смесь / С.А. Ходжаев, Р. Юсупов, Ш. Шаджалилов, Т. Мухамедбаев. - Оpubл. // Б.И. - 1997. - № 4.
28. Предварительный пат. РУз. 4727 В. Напрягающий бетон / С.А. Ходжаев, А. Мусурманкулов. Оpubл. // Б.И. - 1997. - № 4.

III. Тезисы докладов, нормативные документы и рекомендации

29. Ходжаев С.А. Концептуальные основы создания нормативной базы проектирования крыш и кровель. Архитектурно-строительная наука в развитии экономики Республики Узбекистан // Тез. докл. Международного симпозиума (10-12 октября 1994 г., Ташкент). - Ташкент: ТАСИ, 1994. - С. 151-152.
30. Ходжаев С.А. О новом подходе к подбору состава высокопрочного бетона / Материалы 7-й конференции «Состояние и перспективы развития преднапряженных железобетонных конструкций» // Тезисы докладов (21-23 июня 2000, Москва). - М.: ООО Воентехлит, 2000. - С. 43-44.
31. Ходжаев С.А. Самонапряженный железобетон в IY климатическом районе // ДорНТИ № 036 12.10.89-А / ВНИИТАГ. - М., 1989. - 8 с.
32. Ходжаев С.А. Структурные особенности и физико-механические свойства керамзитобетона на напрягающем цементе // Развитие производства и применение легких бетонов и конструкций из них с использованием промышленных отходов / Тезисы докладов III Всесоюзной конференции по легким бетонам (Ереван, 5-7 авг. 1985 г.). - М.: Стройиздат, 1985.
33. Ходжаев С.А., Юсупов Р.Р. Самонапряженные покрытия повышенной эксплуатационной надежности // Сб. Эксплуатационная надежность инженерных сооружений при сложных нагружениях и воздействиях внешней среды / Тезисы докладов. - Ташкент: Ротапринт ТашИИТ, 1990. - С. 72-73.
34. КМК 2.03.10-95 «Крыши и кровли» / Госкомархитектстрой РУз. - Ташкент: ТИПО им. Ибн-Сино, 1995. - 30 с.

35. КМК 2.03.01-96 «Бетонные и железобетонные конструкции» /Госкомархитектстрой РУз. - Ташкент: МЧЖ "Саодат РИА", 1998.
36. КМК 3.03.04.-98 «Производство сборных железобетонных конструкций и изделий» /Госкомархитектстрой РУз. - Ташкент: Фан, 1998.- 64с.
- 37.Производство сборных самонапряженных железобетонных конструкций и изделий. Справочное пособие к СНиП 3.09.01-85.- М.: Стройиздат, 1990.-18 с.
- 38.Рекомендации по проектированию железобетонных крыш с открытым чердаком для жилых зданий, строящихся в IУ климатическом районе. - Ташкент: ТашЗНИИЭП, 1986. - 21 с.

С.А. Ходжаевнинг «Том қопламалари учун бетоннинг структураси, технологияси ва хоссалари» мавзусидаги 05.23.05 - «Қуриш материаллари ва буюмлари» ихтисослиги бўйича техника фанлари доктори илмий даражасига талабгорлик диссертациясини қисқача мазмуни

Ушбу ишда иқлимий факторларнинг салбий таъсирини ҳисобга олинган ҳолда том учун хоссалари олдиндан белгиланган бетон технологияси илмий асосларини яратиш, халқ хўжалигида муҳим аҳамиятга эга бўлган уй-жой-фуқаро қурилишида томларни самаралигини ва кўнга чидашини, фойдаланиш даврида ишончилигини ошириш, ҳамда том қопламаларини рационал конструкциялаш, уларни технологик таъминланганлиги каби масалаларни ўз ичига олган долзарб илмий муаммолар ечими, тажрибавий-назарий тадқиқотлар, умумлаштириш ҳамда таҳлил асосида берилган.

Кескин континентал қуруқ иссиқ иқлим шароитида бетонни чидамлиги ҳақидаги физик тушунчалар ривожлантирилган. Бетон чидамликлигига ҳал қилувчи таъсир уни циклик қизиши бўлмай, аксинча пастҳарорат ва намликнинг циклик таъсири кўрсатилган. Том қоплама бетонини физик-механик хоссаларига қўйиладиган талаблар асослаб берилган.

Бетоннинг макроструктура жиҳати кўриб чиқилган ҳамда унинг мустаҳкамлиги ва структураси орасидаги боғлиқликни, йирик тўлдиргични унинг ишлашига жалб қилиш механизмни назарий тушунчалари таърифлаб берилган. Боғловчини тежамли сарфлаган ҳолда, мустаҳкамлиги, сувўтказмаслиги ва совуққа чидамликлигини таъминловчи, йирик тўлдиргич миқдори юқори бўлган ($900 \div 1000 \text{ л/м}^3$ гача) бетон таркибини танлаш учун принципаал ёндошиш ҳамда ҳисоблаш усуллари таклиф қилинган.

Цемент тошини кенгайтириш ва киришишидан юзага келган структурасидаги кучланишларни йўналтирилган бошқарувини ҳисобга олиниб, йирик тўлдиргич миқдори юқори бўлган бетонларни хоссалари ва структурасини шаклланиш қонуниятлари ўрганилган. Хоссалари олдиндан белгиланган, ҳар хил боғловчи ва тўлдиргичларда тайёрланадиган бетонлар олишнинг технологик параметрлари аниқланган. Энг юқори мустаҳкамлик, сувўтказмаслик ва совуққа чидамлик кучлантирувчи цементда тайёрланган бетон бўлиб, саба-

би, цемент тошига боғловчи ва микрофишларни эгирингит итвасимон кристаллари билан боғловчи шунинг ҳамда бетон компонентиларининг ижобий кучланган ҳолати ва усулнинг кучлантириш шароитида уларнинг боғланишини юқори мустаҳкамликни таъминловчи камтоваклиги ва юқоризичлигидир. Йирик тўлдиргич миқдори юқори бўлган бетоннинг, майда тўлдиргич учун - "сузувчи", йирик кучлантириш учун эса "контакт" структура қабул қилишдан иборат бўлган физик-механик ва технологик хоссаларининг оптимал мутаносиблигини таъминловчи принцип аниқланган.

Йирик тўлдиргич миқдори юқори бўлган бетоннинг ёриқ пайдо бўлиш қонуниятлари ўрганилган, боғловчи ва тўлдиргич тури, ҳамда қотиш шароитини ҳисобга олиниб унинг мустаҳкамлик ва деформацион хусусиятлари аниқланган. Том қоплама бетон учун, унинг структурасида микроёриқлар пайдо бўлабошлишига тегишли $R_{сг}^0$ даражасини кўтариш амалий аҳамиятга эгаллиги аниқланган. Атмосфера таъсирига дучор бўлган юзалари сиқилган, ишончи ва ёрилишга чидамли том қопламаларини конструкциялаш принциплари ишлаб чиқилган ва илмий тажриба билан асослаб берилган. Том қопламаларини қолиплашнинг, бошланғич қотиш даврида бетонда юз берадиган деструкция ҳолатларига йўл қўймайдиган, тўлиқ завод тайёрлигидаги маҳсулотларда бетон ва юз сиртлари юқори сифатли конструкцияларни тайёрлашга имкон берадиган янги усули таклиф қилинган. Қуруқ иссиқ иқлим шароитидаги, ўз-ўзини кучлантирадиган ва оддий темирбетон қўйма том қопламаларини барпо қилинишига талаблар аниқланган ва конструктив-технологик ечимлари ишлаб чиқилган.

Диссертациянинг хулосалари ва асосий натижалари амалдаги бир қатор меъёрий ҳужжатлар ва давлат стандартларида ўз ифодасини топган. Ишлаб чиқилган темирбетон том қопламаларини уй-жой-фуқаро қурилишида қўлланиши катта иқтисодий самарага эга.

SUMMARY

Khodjavev S.A. Structure, technology and properties of concrete for roofing

**The thesis for the degree of the Doctor of Engineering Sciences
Specialty 05.23.05 - Building Materials and Products**

The analysis, generalization, experimental and theoretical investigations of the author enabled him to offer in this work the solution of an actual scientific problem, concerning the increase of the serviceability, durability and efficiency of roofing in house-building and civil engineering. This problem is of great importance for the national economy, and it includes the aspects of rational roofing construction, the technological provision and creation of scientific fundamentals for the technology of concrete with predetermined properties for roofing with regard to unfavorable impact of climatic factors.

The author has developed physical concepts of concrete resistance under the conditions of continental arid hot climate. The work shows that the decisive influence on concrete resistance have rather cyclic low-temperature and moisture impacts than cyclic heating. The requirements for physical and mechanical properties of concrete for roofing have been grounded.

The macrostructure aspect is considered and theoretical concepts on the causal relationship of the concrete structure and its strength, accounted for the involving mechanism of coarse aggregate in the concrete performance, are formulated. The author proposes a principle approach and design prerequisites for proportioning concrete with increased coarse aggregate content (ICAC) up to $950\pm 1000 \text{ l/m}^3$, providing strength, water- and frost-resistance of concrete with economical expenditures of binding materials.

The objective laws of forming ICAC concrete structure and properties with regard of directional control of structure stresses, caused by cement stone shrinkage and broadening, are revealed. Technological parameters of manufacturing controlled quality concrete from different binders and aggregates are determined. The self-stressing cement concrete has the highest strength, water- and frost-resistance, that is explained by its high density and low porous structure due to overgrowing of pores and microcracks in the cement stone with acicular crystals of ettringite as well as by favorably stressed condition of concrete components and by high strength of their cohesion under the conditions of self-stressing. The principle of providing optimal combination of technological, physical and mechanical properties of ICAC concrete is determined. It consists in taking up the contact structure for the coarse aggregate and «floating-type» structure - for the fine aggregate.

The mechanism of ICAC concrete cracking has been investigated, as well as its strength and deformation properties, taking into consideration types of binders, aggregates and conditions of concrete hardening process. It has been determined that rise of R_{cr}^0 level, corresponding to the beginning of microcracking in concrete structure, is of practical importance for roofing concrete.

The design principles of crack-resistant and durable concrete roofing with compressed surfaces exposed to meteors have been developed and proved by experiments. A new «face-down» method of forming roof slabs is proposed. It provides manufacturing of prefabricated concrete structural units and their face surfaces of very high quality and allows to avoid concrete destruction on the early stages of hardening. Constructional and technological solutions have been worked out and the requirements for producing monolith self-stressed and ordinary reinforced concrete roofing under the conditions of arid hot climate have been determined.

The main theses and results of the work have been used in a number of working normative documents and national standards. Application of the developed reinforced concrete roofing in the practice of house building and civil engineering is of great benefit.

Подписано к печати 5.11.2001. Объем 2,75 п.л.
Формат 60x84 1/16. Тираж 100 экз. Заказ 0206.
Отпечатано в типографии Национального Университета
Узбекистана им. М.Улугбека.