

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

---

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего профессионального образования  
«Пензенский государственный университет  
архитектуры и строительства»  
(ПГУАС)

**Н.И. Макридин, В.И.Калашников, К.Н. Махамбетова**

## **ТЕХНОЛОГИЯ БЕТОНА, СТРОИТЕЛЬНЫХ ИЗДЕЛИЙ И КОНСТРУКЦИЙ**

Лабораторный практикум

Рекомендовано Редсоветом университета  
в качестве учебного пособия для студентов,  
обучающихся по направлению «Строительство»

Под общей редакцией доктора технических наук,  
профессора Ю.П. Скачкова

Пенза 2014

УДК 691.328

ББК 38.626.1

M16

*Учебное пособие подготовлено в рамках проекта  
«ПГУАС – региональный центр повышения качества подготовки  
высококвалифицированных кадров для строительной отрасли»  
(конкурс Министерства образования и науки Российской Федерации –  
«Кадры для регионов»)*

Рецензенты: доктор технических наук, профессор кафедры технологии строительных материалов и деревообработки В.Л. Хвастунов;  
заместитель директора по качеству ООО «Строительные материалы», кандидат технических наук, доцент В. Ю. Нестеров

**Макридин Н.И.**

M16 Технология бетона, строительных изделий и конструкций. Лабораторный практикум: учеб пособие / Н.И. Макридин, В.И. Калашников, К.Н. Махамбетова; под общ. ред. д-ра техн. наук, проф. Ю.П. Скачкова.. – Пенза: ПГУАС. 2014. – 192 с.

Изложены необходимые теоретические сведения о технологии бетонов, строительных изделий и конструкций. Даны методические рекомендации по выполнению лабораторных работ, в том числе научно-исследовательских, связанных с изучением основных свойств сырьевых материалов, химических добавок и изделий на их основе; представлен перечень необходимого оборудования и приборов. Рассмотрены современные методы исследования, в том числе методы математической статистики, основных свойств бетонной смеси и бетона, арматурной стали и контроля качества готовой продукции.

Направлено на овладение технологией, методами доводки и освоения технологических процессов строительного производства, производства строительных материалов, изделий и конструкций, машин и оборудования; формирование способности использовать углубленные теоретические и практические знания, часть которых находится на передовом рубеже данной науки; способности осознать основные проблемы своей предметной области, при решении которых возникает необходимость в сложных задачах выбора, требующих использования количественных и качественных методов.

Учебное пособие подготовлено на кафедре «Технологии строительных материалов и деревообработки» и базовой кафедре ПГУАС при ООО Производственно-коммерческой фирме «Термодом» и предназначено для студентов, обучающихся по направлению 08.03.01 «Строительство» по профилю «Производство строительных материалов, изделий и конструкций», и для магистров, обучающихся по направлению 08.04.01 «Строительство».

© Пензенский государственный университет архитектуры и строительства, 2014

© Макридин Н.И., Калашников В.И.,  
Махамбетова К.Н., 2014

## ВВЕДЕНИЕ

Учебное пособие предназначено для использования при выполнении учебных лабораторных работ по курсу «Технология бетона, строительных изделий и конструкций».

Лабораторные работы дополняют теоретический курс и являются важной составной частью профессиональной подготовки инженеров по специальности «Производство строительных материалов, изделий и конструкций». Они дают будущим технологам более полное представление о физико-химических процессах при производстве и твердении вяжущих веществ и бетонов на их основе, способствуют приобретению самостоятельных навыков в выборе методов и форм изучения отдельных технологических приемов с целью совершенствования технологии изготовления железобетонных изделий, улучшения их качества и эффективности применения.

По содержанию и методике проведения лабораторные работы носят, как правило, исследовательский характер с использованием как известных современных методов исследования, так и методик, разработанных на кафедре ТСМиД Пензенского ГУАС. Большое место отводится методам математического планирования эксперимента. Примеры соответствующих расчетов, приведенные в некоторых лабораторных работах, позволяют использовать их в технологических расчетах при выполнении курсового и дипломного проектирования.

Авторами предлагается также лабораторная работа, посвященная оценке механических параметров трещиностойкости, вязкости разрушения и коэффициента внутреннего трения бетона с использованием методов механики разрушения и акустической комиссии.

Кафедрой «Технологии строительных материалов и деревообработки» Пензенского государственного университета архитектуры и строительства накоплен обширный материал по трем видам бетонов нового поколения: реакционно-порошковым, порошково-активированным песчаным и щебеночным. По последним двум видам исследования бетонов проведены в широком диапазоне прочностных свойств – от малоцементных общестроительного назначения с классами прочности В15-В40, с повышенной прочностью В40-В80 и высокопрочных В80-В120. Разработаны не только составы бетонов с их рецептурой и прочностными показателями, но и безразмерные параметры, которые могут быть использованы для программирования и построения математических моделей. Наилучшие результаты в оптимизации составов и значений условных реологических критериев достигнуты в бетонах с расходом цемента 280-320 кг/м<sup>3</sup>.

# 1. БЕТОНОВЕДЕНИЕ И ТЕХНОЛОГИЯ БЕТОНА

Современное строительство немыслимо без бетона. Это один из самых массовых строительных материалов, во многом определяющий уровень развития цивилизации. Вместе с тем бетон – самый сложный искусственный композиционный материал, который может обладать совершенно уникальными свойствами. Он применяется в самых разных эксплуатационных условиях, гармонично сочетается с окружающей средой, имеет неограниченную сырьевую базу и сравнительно низкую стоимость. К этому следует добавить высокую архитектурно-строительную выразительность бетона, сравнительную простоту и доступность технологии, возможность широкого использования местного сырья и утилизации техногенных отходов при его изготовлении, малую энергоемкость, экологическую безопасность и эксплуатационную надежность. Именно поэтому бетон, без сомнения, останется основным конструкционным материалом и в обозримом будущем.

Последние десятилетия двадцать первого века ознаменовались значительными достижениями в технологии бетона. В эти годы появились и получили широкое распространение новые эффективные вяжущие, модификаторы для вяжущих и бетонов, активные минеральные добавки и наполнители, армирующие волокна, новые технологические приемы и методы получения строительных композитов. На рубеже столетия существенно обогатились наши представления о структуре и свойствах бетона, о процессах структурообразования, появилась возможность прогнозирования свойств и активного управления характеристиками материала, успешно развиваются компьютерное проектирование бетона и автоматизированное управление технологическими процессами. Все это позволило не только создать и освоить производство новых видов бетона, но и значительно расширить номенклатуру применяемых в строительстве материалов: от суперлегких теплоизоляционных (с плотностью менее  $100 \text{ кг/м}^3$ ) до высокопрочных конструкционных (с прочностью на сжатие около  $200 \text{ МПа}$ ). Сегодня в строительстве применяется более тысячи различных видов бетона, и процесс создания новых бетонов интенсивно продолжается. Бетон широко используется в жилищном, промышленном, транспортном, гидротехническом, энергетическом и других видах строительства.

Значительный прогресс в технологии бетона связан с появлением суперпластификаторов (СП) и тонкодисперсных минеральных наполнителей (ТДН) различного технологического происхождения, благодаря которым стало возможным получение бетонов повышенной прочности – от  $60$  до  $90 \text{ МПа}$ . Они отличаются повышенной коррозионной стойкостью и долговечностью. Однако эти бетоны с суперпластификаторами необходимо отнести к бетонам переходного поколения, отличающимся старой рецептурой из четырех компонентов (для щебеночных бетонов) и из трех

компонентов (для песчаных бетонов, но с использованием супер- и гиперпластификаторов).

Оптимальное сочетание добавок модификаторов, а при необходимости совмещение с ними других органических и минеральных материалов позволяют управлять реологическими свойствами бетонных смесей и модифицировать структуру бетона на микроуровне так, чтобы придать бетону свойства, обеспечивающие высокую эксплуатационную надежность конструкций.

Для получения бетонов высокого качества необходимо знать их свойства и факторы, влияющие на эти свойства. Поэтому на соответствующие темы в данном учебном издании приведены лабораторные работы, посвященные методам проектирования состава бетонов различного вида с требуемыми свойствами. Применение математических методов планирования эксперимента, с помощью которых можно учитывать большое количество факторов, влияющих на свойства бетонной смеси и бетона, дает возможность не только уточнять технологические расчеты, но и успешно управлять технологией и качеством бетона.

В России в основном выпускаются бетоны с марками на сжатие до М500-М600. В мировой практике в развитых зарубежных странах осваиваются бетоны нового поколения с прочностью на сжатия от 100 до 180 МПа, в том числе самоуплотняющиеся. Кафедра ТСМиД Пензенского ГУАС с 2003 года занимается разработкой таких бетонов. Поэтому в небольшом объеме представлено тестирование цемента и реологически составляющих компонентов бетонных смесей по отношению к различным типам суперпластификаторов. Впервые рассмотрен расчет состава высокопрочного самоуплотняющегося песчаного бетона нового поколения.

Значительное место в лабораторном практикуме отведено методологии оценки водоредуцирующей эффективности добавок-модификаторов в зависимости от реологического действия их в бетонных смесях, а также оценке механических параметров трещиностойкости, вязкости разрушения и коэффициента внутреннего трения бетонов с использованием методов механики разрушения и акустической эмиссии. Последние позволяют более точно разработать зависимости «состав – структура – свойства».

### **Высокоэффективные и высокоэкономичные бетоны нового поколения**

Под термином «бетоны нового поколения» (БНП) следует понимать бетоны высокой плотности с новой рецептурой и с новым структурно-топологическим строением, которые обеспечивают низкий удельный расход цемента на единицу прочности (кг/МПа) или, соответственно, высокую удельную прочность на единицу расхода цемента ( $R_{\text{ц}}^{\text{уд}}$ , МПа/кг). И это

относится к бетонам как низких классов прочности (В30-В40), так и высоких (В140-В160 и более), т.е. к ультраэффективному бетону. Для высокопластичных и самоуплотняющихся бетонов новая рецептура сухих компонентов и новое структурно-топологическое строение обеспечивают в присутствии высокоэффективных суперпластификаторов высокую объемную концентрацию твердой фазы, особые реологические свойства бетонных смесей и максимальное водоредуцирующее действие.

Создание высокоэффективных и экономичных бетонов нового поколения связано с внедрением наукоемких технологий, что определяется фундаментальными научными исследованиями.

К сожалению, за последние 20-25 лет в создании конструкционных бетонов высоких классов по прочности в России ситуация практически не изменилась. По-прежнему, как и двадцать лет назад, массовое строительство ориентировано на производство и использование бетонов невысоких марок с прочностью 20-50 МПа с повышенными расходами цемента. К твердению бетона относятся как к физико-химическому процессу, обусловленному протеканием химических реакций гидратации, образующих цементирующие вещества гидроалюминатов и гидроферритов кальция. При этом не учитывается, что в процессе гидролиза образуется гидролизная известь (портландит) с низкой цементирующей способностью. Свободная известь в порах цементного камня, по существу, является балластом, не увеличивающим прочность бетона и его коррозионную стойкость.

Основная задача науки по созданию бетонов нового поколения – химическое связывание портландита в теле бетона в прочные цементирующие соединения – гидросиликаты кальция. Это достигается введением в состав бетона реакционно-активных наноразмерных порошков стекловидного кремнезема, метаксаолина или их заменителей. Использование таких реакционно-активных дисперсных материалов – условие необходимое, но недостаточное.

В наукоемкой технологии бетонов должны быть реализованы достижения реологии многокомпонентных водно-дисперсных систем, которые основаны на физико-химии агрегативно-устойчивых, предельно-концентрированных суспензий. А это достигается управляемыми электрокинетическими явлениями на границе раздела фаз с формированием плотного адсорбционного ионно-электростатического слоя на поверхности нано- и микрометрических частиц дисперсной фазы. Разработаны основные приемы перезарядки отрицательно заряженной поверхности частиц кислых пород. Они лежат в основе существенного разжижения супер- и гиперпластификаторами твердообразных бетонных смесей в жидкообразные. Агрегативная (кластерная) структура дисперсных систем самопроизвольно превращается в агрегативно-устойчивую мало- или бескластерную с высвобождением большого количества «запутанной» свободной воды в

агрегатах. Структурированная водно-дисперсная система с высоким пределом текучести превращается в малоструктурированную с чрезвычайно низким пределом текучести.

Чтобы реализовать принципы реологии малоструктурированных водно-цементных систем в грубозернистых бетонных смесях с песком и щебнем и низким расходом цемента, необходимо кардинально изменить структуру и топологию смесей. Бетонную смесь надо наполнить микрометрическими реологически активными минеральными частицами – молотыми горными породами, микрокварцем. Это необходимо для увеличения доли водно-дисперсной реологической матрицы, обладающей бесструктурным течением. Такое изменение структуры бетонной смеси не всегда обеспечивает полное достижение оптимальной реологии. Необходимо дополнительная оптимизация структуры – введение тонкого кварцевого песка фракции 0,1-0,6 мм, поддерживающего реологическое состояние системы.

Таким образом, технология бетона при формировании реологических матриц должна быть прежде всего микротехнологией по размерному уровню вводимых дисперсных компонентов, с помощью которой достигимы уровни прочности бетона на сжатие 100-120 МПа и более. В таких бетонах исключаются микродефекты, присущие высокодефектным бетонам с прочностью 20-60 МПа. А нанодефекты в высокопрочных бетонах устраняются за счет использования нанотехнологии.

От малодефектных высокопрочных и особовысокопрочных бетонов, невостребованных в настоящее время в России, легко перейти к бетонам с традиционной прочностью ( $R_{сж}=20-60$  МПа), но с существенным уменьшением расхода цемента.

### 1.1. Классификация тяжелых бетонов по компонентному составу и прочности на сжатие

Современные бетоны в соответствии с эволюцией развития бетонов классифицируются на 3 вида:

1. Бетоны старого поколения – бетоны состава «цемент – песок – щебень – вода» – выпускаются с 1830 г. Выпуск их продолжается и в настоящее время в малых и средних районных центрах любого региона России. Изменялась только прочность цемента. Щебень, песок, вода остались неизменными. Прочность бетонов старого поколения не превышает 60 МПа.

2. Бетоны переходного поколения начали производиться в 1969 г. в Японии с изобретением суперпластификаторов на нафталиновой основе. В России после 1970 г. был синтезирован аналогичный суперпластификатор под маркой С-3. Это был революционный прорыв. Бетоны переходного поколения с супер- и гиперпластификаторами стали производиться в

крупных городах (Москва, С-Петербург и др.) со снижением расхода цемента в бетонных смесях. Однако экономия цемента была возможна лишь в бетонах с расходом его 400-600 кг на 1 м<sup>3</sup> смеси. В тощих бетонах с малым содержанием цемента 180-220 кг/м<sup>3</sup> супер- и гиперпластификаторы не эффективны. Добавление микрокремнезема в бетоны переходного поколения с высоким содержанием цемента позволило получить прочность 100 МПа (строительство комплекса «Москва-Сити»). Прочность бетонов переходного поколения достигает 100 МПа из жестких бетонных смесей.

3. Производством бетонов нового поколения стали заниматься некоторые передовые фирмы в западных странах с 1990-1995 гг. Кафедра технологии бетонов, керамики и вяжущих ПГУАС приступила к их разработке в 1995 году. К 2012 году накоплен значительный опыт не только в научных исследованиях бетонов нового поколения, но и в их промышленном производстве.

Порошковые, реакционно-порошковые, порошково-активированные песчаные и порошково-активированные щебеночные бетоны нового поколения не производятся в Российской Федерации. Они в ограниченном количестве выпускаются по рекомендациям кафедры в г. Красноярске (ООО «Эммануил»), в г. Тольятти (ООО «Саман») и г. Москве (ООО «Новые технологии строительства»). Бетоны нового поколения являются наукоемкими, в них реализуются достижения химии и гидратации цемента, химии реакционных процессов продуктов гидратации цемента с микрометрическими и нанометрическими дисперсными компонентами, химии поверхностных явлений, в частности в агрегативной устойчивости суспензий и реологии их, механики разрушения высокопрочных бетонов.

Бетоны нового поколения отличает большое количество компонентов (5-8). Один из них является тонкомолотым, другой – тонкозернистым. Поэтому технологию таких бетонов мы называем микротехнологией. Без микротехнологии бетонов невозможно получить бетоны нового поколения, в этом состоит будущее бетонов, так как они имеют низкий расход цемента на единицу прочности при сжатии, составляющий не более 6 кг/МПа ( $C_{Rcж}^{уд}$  = расход цемента на 1 м<sup>3</sup> в кг/прочность при сжатии в МПа).

Для получения бетонов нового поколения необходимы следующие сырьевые материалы: цемент, тонкомолотая горная порода (молотый кварцевый песок или молотый прочный известняк, доломитизированный известняк, доломит, молотые граниты, базальты, диабазы, габбро-диабазы и др., полученные из многомиллионных отходов на карьерах камнедробления при дроблении щебня), тонкозернистые (очень тонкие) кварцевые пески и пуццоланические добавки – микрокремнезем (отход производства ферросилиция). Бетоны нового поколения бывают обычной прочности М150-М600, повышенной прочности М600-М1000, высокопрочными с М1000-М1500 и сверхвысокопрочными с М>1500, которые могут изготавливаться из самоуплотняющихся бетонных смесей.

## Лабораторная работа №1 ОПРЕДЕЛЕНИЕ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЗАПОЛНИТЕЛЕЙ ДЛЯ БЕТОНА

Заполнители являются важной составной частью бетона. Занимая до 80 % объема бетона, заполнители могут оказывать значительное влияние на его свойства и стоимость. В связи с этим правильный выбор заполнителя обеспечивает получение бетона с требуемыми физико-механическими и эксплуатационными характеристиками. Заполнитель, создавая в бетоне жесткий скелет, воспринимает усадочные напряжения и уменьшает усадку обычного бетона в 5-10 раз по сравнению с усадкой цементного камня. Жесткий скелет из высокопрочного заполнителя увеличивает прочность и модуль упругости бетона (т.е. уменьшает деформации конструкций под нагрузкой), снижает ползучесть (т.е. пластические необратимые деформации бетона при длительном действии нагрузки). Легкие пористые заполнители уменьшают плотность бетона и его теплопроводность. Специальные особо тяжелые заполнители делают бетон надежной защитой от проникающей радиации.

В качестве крупных заполнителей для тяжелых бетонов используют щебень из природного камня (ГОСТ 8267–93), гравий (ГОСТ 8267–93), а также щебень из доменного шлака (ГОСТ 5578–94), песчано-гравийную смесь (ГОСТ 23739–79). В качестве мелкого заполнителя для бетонов применяют природные пески (ГОСТ 8736–93 и ГОСТ 22856–89).

Несмотря на большое многообразие заполнителей, различающихся по происхождению, форме зерен, плотности, крупности и т.д., все они характеризуются едиными основными показателями качества, приведенными в соответствующих стандартах. Стандартные характеристики позволяют судить о пригодности заполнителей для приготовления бетона.

*Цель работы* – определить технологические характеристики крупного и мелкого заполнителей и дать сравнительную оценку качества заполнителей по этим характеристикам.

*Содержание работы:* знакомство с методиками определения средней плотности заполнителей, прочности крупного пористого и плотного заполнителей, зернового состава и модуля крупности мелкого заполнителя.

*Применяемое оборудование и материалы:*

- лабораторные гирные и циферблатные весы;
- мерные цилиндры вместимостью 1,5 и 10 л;
- гидравлический пресс с усилием от 100 до 500 кН;
- стальной цилиндр с объемным дном и плунжером с внутренним диаметром 150 мм и высотой 150 мм;
- стандартный набор сит;
- сосуд для насыщения щебня (гравия) водой;
- природные плотные и искусственные пористые заполнители.

### Порядок выполнения работы

1. *Определение средней плотности крупного и мелкого заполнителей* (ГОСТ 8269–97, ГОСТ 8735–88).

Среднюю плотность находят путем взвешивания определенного объема заполнителя данной фракции, высушенного до постоянной массы.

Размеры мерного цилиндра выбирают в зависимости от наибольшей крупности заполнителя (табл. 1.1). При определении насыпной плотности песка используют мерный сосуд вместимостью 1 л (ГОСТ 8735-88).

Заполнитель, высушенный до постоянной массы, насыпают с высоты 10 см в предварительно взвешенный цилиндр до образования конуса, который снимается вровень с краями. Затем определяют массу цилиндра с заполнителем.

Т а б л и ц а 1 . 1

Размеры мерного цилиндра

Объем мерного цилиндра, л	Размеры цилиндра, мм		Фракция заполнителя
	диаметр	высота	
5	185	185	От 5 до 10 мм
10	234	234	Св. 10 до 20 мм
20	294	294	Св. 20 до 40 мм
50	400	400	Св. 40 мм

Среднюю плотность заполнителей  $\rho_n$ , кг/м<sup>3</sup>, рассчитывают по формуле

$$\rho_n = \frac{m - m_1}{V}, \quad (1.1)$$

где  $m$  – масса мерного цилиндра с заполнителем, кг;

$m_1$  – масса мерного цилиндра, кг;

$V$  – объем мерного цилиндра, м<sup>3</sup>.

2. *Определение зернового состава щебня (гравия).*

Для испытания в качестве аналитической пробы используют лабораторную пробу по табл.1.2, высушенную до постоянной массы, без ее сокращения.

Т а б л и ц а 1 . 2

Характеристика лабораторных проб

Наибольший номинальный размер зерен $D$ , мм	10	20	40	Св. 40
Масса пробы, кг	5,0	10,0	20,0	40,0

Пробу просеивают через стандартный набор сит (5, 10; 20 и 40 мм). Остатки щебня (гравия) на каждом из сит взвешивают.

По результатам просеивания вычисляют частный остаток на каждом сите  $a_i$  в процентах по формуле

$$a_i = \frac{m_i}{m} \cdot 100\%, \quad (1.2)$$

где  $m_i$  – масса остатка на данном сите, г;  
 $m$  – масса пробы, г.

Затем определяют полные остатки на каждом сите в процентах от массы пробы, равные сумме частных остатков на данном и всех ситах с отверстиями большего размера. Результаты расчета зернового состава заносят в табл.1.3 и строят кривую просеивания (рис.1.1), характеризующую зерновой состав испытываемого щебня (гравия).

Т а б л и ц а 1 . 3

Результаты определения зернового состава щебня (гравия)

Остатки на ситах	Размеры отверстий сит, мм				Прошло через сито 5 мм	$D$ , мм	$d$ , мм
	40	20	10	5			
Частные, г							
Частные, %							
Полные, %							

Наибольшую и наименьшую крупность щебня (гравия) испытываемой пробы характеризуют размерами отверстий сит, полные остатки на которых, определенные по кривой просеивания, составляют 5,0 % ( $D$ ) и 95 % ( $d$ ). Значения этих размеров округляют в большую сторону до ближайших размеров отверстий стандартных сит.

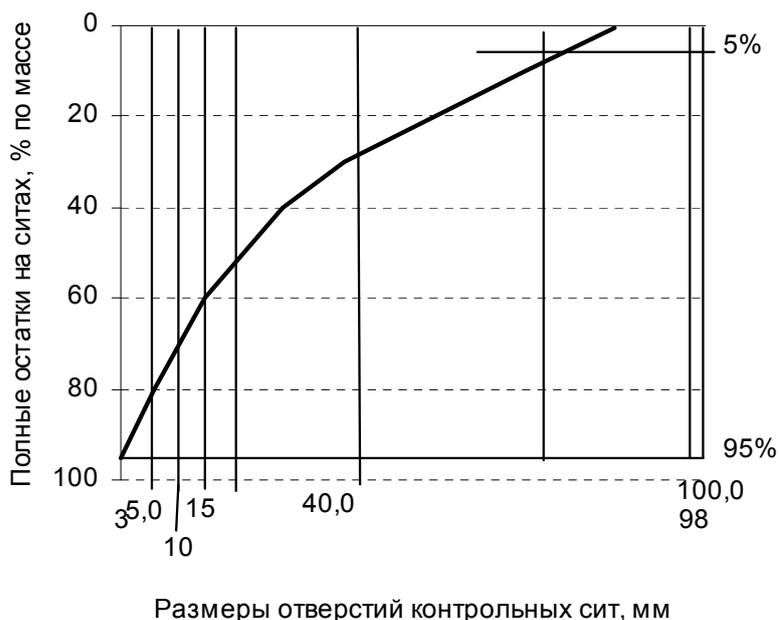


Рис. 1.1. Зерновой состав щебня (гравия)

### 3. Определение межзерновой пустотности заполнителей.

Межзерновая пустотность может определяться аналитически и экспериментально.

Аналитически межзерновую пустотность  $V_{м.п}$ , %, находят по формуле

$$V_{м.п} = \left( 1 - \frac{\rho_n}{\rho_k \cdot 1000} \right) \cdot 100, \quad (1.3)$$

где  $\rho_n$  – насыпная плотность, кг/м<sup>3</sup>;

$\rho_k$  – кажущаяся плотность, кг/м<sup>3</sup>.

Экспериментально  $V_{м.п}$  определяется по следующей методике. Заполнитель засыпается в мерный цилиндр, цилиндр закрывается мелкорешетчатой крышкой и заливается водой, через 1 час вода из цилиндра сливается, цилиндр вместе с заполнителем опрокидывается на решетку, и в течение 30 мин вода стекает из заполнителя, цилиндр с заполнителем вторично взвешивается, и затем вода заливается до краев мерного цилиндра.

Межзерновую пустотность рассчитывают по следующей формуле

$$V_{м.п} = \frac{q}{V} \cdot 100, \quad (1.4)$$

где  $q$  – масса залитой воды, кг;

$V$  – объем цилиндра, л.

### 4. Определение прочности (дробимости) крупного плотного заполнителя (ГОСТ 8269–97).

Для определения прочности (дробимости) крупного плотного заполнителя применяют цилиндр диаметром 150 мм. Навеска щебня (гравия) насыпается в цилиндр с высоты 50 мм так, чтобы после разравнивания верхний уровень материала примерно на 15 мм не доходил до верхнего края цилиндра. Затем в цилиндр устанавливается пуансон, и цилиндр помещается на нижнюю плиту пресса. Давление доводится до 200 кН. После сжатия испытываемую пробу высыпают из цилиндра и взвешивают.

Раздробленную пробу заполнителя просеивают через сито, размеры отверстий которого принимают в зависимости от фракции крупного заполнителя: при фракции 5-10 мм – 1,25 мм; при фракции 10-20 мм – 2,5 мм и при фракции 20-40 мм – 5 мм.

Остаток на сите после сухого или мокрого просеивания взвешивают и определяют показатель дробимости  $D_p$ , %, с точностью до 1 % по формуле

$$D_p = \frac{m - m_1}{m_1} \cdot 100\%, \quad (1.5)$$

где  $m$  – масса аналитической пробы щебня (гравия), г;

$m_1$  – масса остатка на контрольном сите после просеивания, кг.

Марки по дробимости щебня из осадочных и метаморфических пород должны соответствовать требованиям, указанным в табл.1.4, а марки по дробимости щебня из изверженных пород – в табл.1.5.

Т а б л и ц а 1 . 4

Характеристика щебня из осадочных и метаморфических пород

Марка по дробимости щебня из осадочных и метаморфических пород, кгс/см <sup>2</sup>	Потеря массы при испытании щебня, %	
	в сухом состоянии	в насыщенном водой состоянии
1200	До 11 включ.	До 11 включ.
1000	Св. 11 до 13	Св. 11 до 13
800	Св. 13 до 15	Св. 13 до 15
600	Св. 15 до 19	Св. 15 до 20
400	Св. 19 до 24	Св. 20 до 28
300	Св. 24 до 28	Св. 28 до 38
200	Св. 28 до 35	Св. 38 до 54

Т а б л и ц а 1 . 5

Характеристика щебня из изверженных пород

Марка по дробимости щебня из изверженных пород, кгс/см <sup>2</sup>	Потеря массы при испытании щебня, %	
	из интрузивных пород	из эффузивных пород
1400	До 12 включ.	До 9 включ.
1200	Св. 12 до 16	Св. 9 до 11
1000	Св. 16 до 20	Св. 11 до 13
800	Св. 20 до 25	Св. 13 до 15
600	Св. 25 до 34	Св. 15 до 20

Допускается определять марку по дробимости щебня из осадочных и метаморфических пород как в сухом, так и в насыщенном водой состоянии. При несовпадении марок по дробимости прочность оценивают по результатам испытания щебня в насыщенном водой состоянии. Марки по дробимости щебня из гравия и гравия должны соответствовать требованиям, указанным в табл.1.6.

Т а б л и ц а 1 . 6

Характеристика щебня из гравия

Марка по дробимости щебня из гравия и гравия, кгс/см <sup>2</sup>	Потеря массы при испытании щебня, %	
	щебня из гравия	гравия
1000	До 10 включ.	До 8 включ.
800	Св. 10 до 14	Св. 8 до 12
600	Св. 14 до 18	Св. 12 до 16
400	Св. 18 до 26	Св. 16 до 24

### 5. Определение прочности пористых заполнителей (ГОСТ 9758–86).

Для определения прочности пористых заполнителей (керамзитовый гравий, аглопоритовый щебень и др.) используют следующую методику.

Пробу заполнителя объемом 2 л засыпают в цилиндр с высоты 10 см. Затем в цилиндр устанавливают пуансон и добиваются совпадения нижней риски на пуансоне с верхним краем цилиндра путем добавления или изъятия нескольких гранул заполнителя.

Цилиндр помещают на нижнюю плиту пресса и осуществляют вдавливание плунжера в цилиндр на глубину 20 мм (до верхней риски на плунжере) за 20-30 с.

Прочность при сдавливании в цилиндре рассчитывают по формуле

$$R_{\text{ц}} = \frac{P}{F}, \quad (1.6)$$

где  $P$  – нагрузка при сдавливании, кгс; МПа;

$F$  – площадь пуансона, см<sup>2</sup> ( $F=177$  см<sup>2</sup>).

По полученному значению прочности по табл.1.7 находят марку крупного пористого заполнителя.

### 6. Определение зернового состава, модуля мелкого заполнителя и группы песков (ГОСТ 8735–88).

Для определения зернового состава предварительно высушенную навеску заполнителя массой 1000 г просеивают через набор стандартных сит. Остатки на ситах взвешивают.

По результатам просеивания вычисляют:

➤ частный остаток на каждом сите  $a_i$ , %, по формуле

$$a_i = \frac{m_i}{m} \cdot 100, \quad (1.7)$$

где  $m_i$  – масса остатка на данном сите, г;

$m$  – масса просеиваемой навески, г;

➤ полный остаток на каждом сите  $A_i$ , %, по формуле

$$A_i = a_{2,5} + a_{1,25} + \dots + a_i, \quad (1.8)$$

где  $a_{2,5}$ ,  $a_{1,25}$ ,  $a_i$  – частные остатки на соответствующих ситах;

➤ модуль крупности песка  $M_k$  без зерен размером крупнее 5 мм по формуле

$$M_k = \frac{A_{2,5} + A_{1,25} + A_{0,63} + A_{0,315} + A_{0,14}}{100}, \quad (1.9)$$

где  $A_{2,5}$ ,  $A_{1,25}$ ,  $A_{0,63}$ ,  $A_{0,315}$ ,  $A_{0,14}$  – полные остатки на сите с круглыми отверстиями диаметром 2,5 мм и на ситах с сетками № 1,25; 0,63; 0,315; 0,14 (%).

Таблица 1.7

## Характеристика пористого заполнителя по прочности

Марки по прочности	Прочность при сдавливании в цилиндре, МПа					шлакопемзового щебня
	керамзитового и шунгизитового гравия	керамзитового щебня	аглопоритового		щебня	
			гравия	щебня		
П15	До 0,5	-	-	-	До 0,3	До 0,2
П25	Св. 0,5 до 0,7	-	-	-	Св. 0,3 до 0,4	Св. 0,2 до 0,3
П35	Св. 0,7 до 1,0	Св. 0,5 до 0,6	Св. 0,5 до 0,6	Св. 0,5 до 0,6	Св. 0,4 до 0,5	Св. 0,3 до 0,4
П50	Св. 1,0 до 1,5	Св. 0,6 до 0,8	Св. 0,6 до 0,8	Св. 0,6 до 0,8	Св. 0,5 до 0,6	Св. 0,4 до 0,5
П75	Св. 1,5 до 2,0	Св. 0,8 до 1,2	Св. 0,8 до 1,2	Св. 0,8 до 1,2	Св. 0,6 до 0,7	Св. 0,5 до 0,6
П100	Св. 2,0 до 2,5	Св. 1,2 до 1,6	Св. 1,2 до 1,6	Св. 1,2 до 1,6	Св. 0,7 до 0,8	Св. 0,6 до 0,8
П125	Св. 2,5 до 3,3	Св. 1,6 до 2,0	Св. 1,6 до 2,0	Св. 1,6 до 2,0	Св. 0,8 до 0,9	Св. 0,8 до 1,1
П150	Св. 3,3 до 4,5	Св. 2,0 до 3,0	Св. 2,0 до 3,0	Св. 2,0 до 3,0	Св. 0,9 до 1,0	Св. 1,1 до 1,4
П200	Св. 4,5 до 5,5	Св. 3,0 до 4,0	Св. 3,0 до 4,0	Св. 3,0 до 4,0	Св. 1,0 до 1,2	Св. 1,4 до 1,8
П250	Св. 5,5 до 6,5	Св. 4,0 до 5,0	Св. 4,0 до 5,0	Св. 4,0 до 5,0	Св. 1,2 до 1,4	Св. 1,8 до 2,2
П300	Св. 6,5 до 8,0	Св. 5,0 до 6,0	Св. 5,0 до 6,0	Св. 5,0 до 6,0	Св. 1,4 до 1,6	Св. 2,2 до 2,7
П350	Св. 8,0 до 10,0	Св. 6,0 до 7,0	Св. 6,0 до 7,0	Св. 6,0 до 7,0	Св. 1,6	Св. 2,7
П400	Св. 10,0	Св. 7,0 до 8,0	Св. 7,0 до 8,0	Св. 7,0 до 8,0	-	-

Примечание. Соотношение между маркой заполнителя по прочности и прочностью при сдавливании в цилиндре допускается уточнять на основании испытания в бетоне по ГОСТ 9757-90.

Результаты определения зернового состава песка оформляют в соответствии с табл.1.8.

Т а б л и ц а 1 . 8

Зерновой состав песка

Наименование остатка	Размеры отверстий сит, мм					Проходит через сито с сеткой № 0,16 (0,14), % по массе
	2,5	1,25	0,63	0,315	0,16 (0,14)	
Частный, г						
Частный, %	$a_{2,5}$	$a_{1,25}$	$a_{0,63}$	$a_{0,315}$	$a_{0,16(0,14)}$	$a_{0,16(0,14)}$
Полный, %	$A_{2,5}$	$A_{1,25}$	$A_{0,63}$	$A_{0,315}$	$A_{0,16(0,14)}$	–

По полученному значению  $M_k$  в соответствии с ГОСТ 8736–93 устанавливают группу природного песка (табл.1.9).

Т а б л и ц а 1 . 9

Характеристика природного песка по крупности

№ п/п	Группа песка	Модуль крупности $M_k$
1	Очень крупный	Св. 3,5
2	Повышенной крупности	Св. 3,0 до 3,5
3	Крупный	Св. 2,5 до 3,0
4	Средний	Св.2,0 до 2,5
5	Мелкий	Св. 1,5 до 2,0
6	Очень мелкий	Св. 1,0 до 1,5
7	Тонкий	Св. 0,7 до 1,0
8	Очень тонкий	До 0,7

Зерновой состав мелкого заполнителя должен соответствовать графику (рис.1.2). При этом учитываются только зерна, проходящие через сито с отверстиями диаметром 5 мм.

Полученные результаты определения физико-механических характеристик заполнителей записываются в табличной форме (табл.1.10).

Т а б л и ц а 1 . 1 0

Физико-механические характеристики заполнителей

№ п/п	Исследуемые материалы	Насыпная плотность $\rho_n$ , кг/м <sup>3</sup>	Межзерновая пустотность $V_{м.п}$ , %	Прочность, МПа (марки)	Наибольшая крупность, мм	Модуль крупности (группа песка)

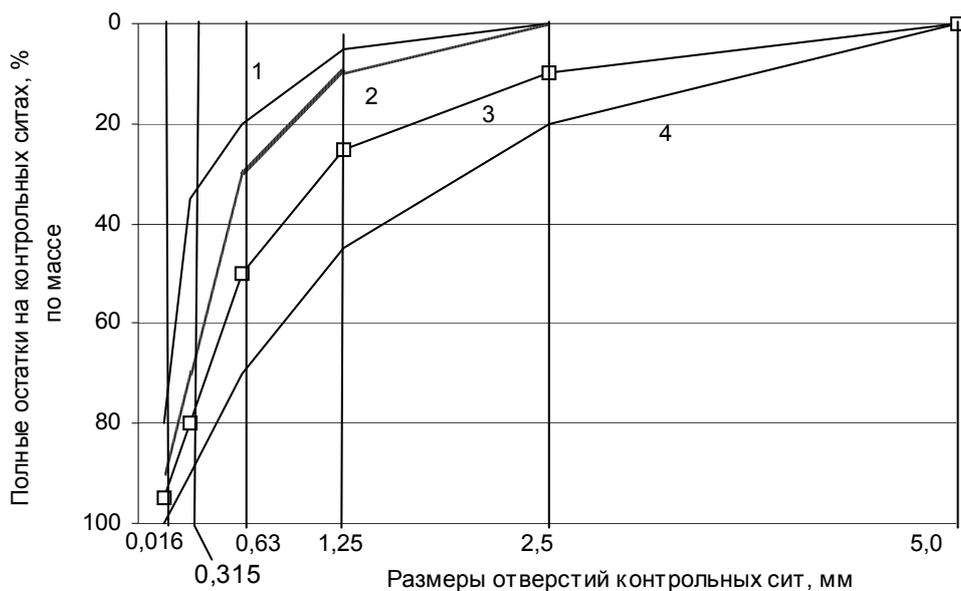


Рис. 1.2. Зерновой состав мелкого заполнителя:  
 1 – нижняя граница крупности песка (модуль крупности – 1,5);  
 2 – нижняя граница крупности песка (модуль крупности – 2,0)  
 для бетона класса В15 и выше; 3 – нижняя граница крупности песка (модуль  
 крупности – 2,5) для бетона класса В25 и выше;  
 4 – верхняя граница крупности песка (модуль крупности – 3,25)

## Лабораторная работа №2 ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВОДОПОТРЕБНОСТИ ЗАПОЛНИТЕЛЯ

Водопотребность заполнителя, т.е. расход необходимой для смачивания поверхности заполнителя и заполнения открытых пор воды, физически связываемой заполнителем в бетонной смеси, является очень важной технологической характеристикой. Даже кварцевый песок с плотными зернами обладает значительной водопотребностью, тем более пористые заполнители.

Метод определения водопотребности заполнителей, предложенный Б.Г. Скрамтаевым и Ю.М. Баженовым, основан на подборе смесей одинаковой подвижности с испытываемым заполнителем и без него.

Для проведения исследований по этому методу необходимы следующие приборы и материалы:

- технические весы по ГОСТ 24104–88;
- чаша со сферическим дном, лопатка;
- металлическая линейка по ГОСТ 427–75;
- мерный стеклянный цилиндр по ГОСТ 1770–74;
- встряхивающий столик с формой-конусом и насадкой;
- металлическая штыковка;

- стандартный конус для определения подвижности бетонной смеси;
- совок;
- портландцемент с известной нормальной густотой;
- заполнители (мелкий и крупный).

#### *Порядок проведения исследования*

Для определения водопотребности мелкого заполнителя (песка) готовят цементно-песчаный раствор состава 1:2 (по массе). Берут 300 г цемента с известной нормальной густотой теста, 600 г испытываемого песка и смешивают их в чаше со сферическим дном. Затем добавляют воду до тех пор, пока расплыв конуса на встряхивающем столике по ГОСТ 310.4–81 не окажется таким же, как расплыв цементного теста нормальной густоты без песка (170 мм).

Водопотребность песка  $V_{п}$  в процентах вычисляют по формуле

$$V_{п} = \frac{В/Ц - НГ}{2} \cdot 100, \quad (1.10)$$

где В/Ц – водоцементное отношение цементно-песчаного раствора при расплыве конуса 170 мм;

НГ – нормальная густота цементного теста в долях единицы;

2 – число частей заполнителя, приходящихся на 1 часть цемента в приготовленном растворе.

Водопотребность крупного песка составляет 4-6 %, среднего – 6-8 %, мелкого – 8-10 %, очень мелкого – более 10 %.

Результаты испытаний записывают в табл. 1.11.

Т а б л и ц а 1 . 1 1

Результаты определения водопотребности песка

Наименование материала	Нормальная густота цементного теста в долях единицы	Расход воды на раствор, мл	В/Ц цементно-песчаного раствора	Диаметр расплыва конуса, мм	Водопотребность песка $V_{п}$ , %

Подобным образом определяют водопотребность крупного заполнителя. В этом случае подвижность бетонной смеси подбирают такую же, как подвижность растворной смеси. Для определения водопотребности крупного заполнителя готовят бетонную смесь состава 1:2:3,5 (по массе). Добавляют воду до тех пор, пока подвижность бетонной смеси, определяемая по ГОСТ 10181.1–81, не окажется такой же, как подвижность цементно-песчаного раствора.

Водопотребность крупного заполнителя (щебня)  $V_{щ}$  в процентах вычисляют по формуле

$$V_{щ} = \frac{(В/Ц)_{б} - (В/Ц)_{р}}{3,5} \cdot 100, \quad (1.11)$$

где  $(В/Ц)_{б}$  – водоцементное отношение бетонной смеси;

$(В/Ц)_{р}$  – водоцементное отношение цементно-песчаного раствора без крупного заполнителя;

3,5 – число частей крупного заполнителя, приходящихся на 1 часть цемента в приготовленной бетонной смеси.

Результаты испытаний записывают в табл. 1.12.

Т а б л и ц а 1 . 1 2

Результаты определения водопотребности щебня

Наименование материала	Водоцементное отношение бетонной смеси $(В/Ц)_{б}$	Водоцементное отношение раствора $(В/Ц)_{р}$	Осадка конуса ОК, см	Водопотребность щебня $V_{щ}$ , %

### Лабораторная работа №3 ОПРЕДЕЛЕНИЕ УДЕЛЬНОЙ ПОВЕРХНОСТИ ЗАПОЛНИТЕЛЕЙ И НАПОЛНИТЕЛЕЙ

Зерна заполнителя в бетонной смеси обволакиваются цементным тестом. Естественно, что расход цементного теста зависит от суммарной площади поверхности заполнителя. Удельная поверхность зерен заполнителя является важной характеристикой, т.к. связана с зерновым составом заполнителя и определяет его влияние на свойства бетона и бетонной смеси.

Для определения удельной поверхности заполнителя необходимы следующие приборы и материалы:

- стандартный набор сит;
- технические весы по ГОСТ 24104–88;
- совок;
- заполнители высушенные (мелкий и крупный).

#### *Порядок проведения исследования*

Для определения удельной поверхности песка берут навеску высушенного песка массой 1 кг и просеивают его через стандартный набор сит (диаметр сит 5,0; 2,5; 1,25; 0,63; 0,315; 0,14). Процесс просеивания считают законченным, если при встряхивании сита песок практически не

просыпается. Затем взвешивают остатки на каждом сите и определяют частные остатки. Процентное отношение массы остатка на сите к массе взятой пробы называется частным остатком и вычисляется по формуле

$$a_i = \frac{m_i}{m} \cdot 100, \quad (1.12)$$

где  $a_i$  – частный остаток на  $i$ -м сите, %;

$m_i$  – остаток на  $i$ -м сите, г;

$m$  – масса пробы песка, г;

По результатам просеивания песка вычисляют его удельную поверхность  $S$ , м<sup>2</sup>/кг, по формуле А.С.Ладинского:

$$S = \frac{6,35k}{1000} \cdot (0,5a+b+2в+4г+8д+16е+36ж), \quad (1.13)$$

где  $k$  – коэффициент, обозначающий соотношение истинной поверхности песка и условной поверхности песка с шаровидными зернами. Для речных песков средней крупности  $k=1,65$ ; для мелких речных песков  $k=1,3$ ;

$a, б, в, г, д, е$  – соответственно частные остатки на ситах с размерами ячеек от 5,0 до 0,14 мм, %;

$ж$  – количество песка, которое прошло через сито с размером ячейки 0,14 мм, %;

Результаты испытаний заносят в табл. 1.13.

Т а б л и ц а 1 . 1 3

Результаты просеивания мелкого заполнителя

Остаток на сите	Размер ячейки сита, мм						Прошло через сито с размером ячеек 0,14	Удельная поверхность мелкого заполнителя, $S$ , м <sup>2</sup> /кг
	5,0	2,5	1,25	0,63	0,315	0,14		
Частный, г								
Частный, %								
Полный, %								

Удельные поверхности природных среднезернистых песков колеблются в пределах от 5 до 10 м<sup>2</sup>/кг.

При определении удельной поверхности крупного заполнителя формула А.С. Ладинского имеет вид:

$$S = \frac{16,5k_{\phi}}{1000} \cdot \left( \frac{a}{16} + \frac{б}{4} + в + 4г \right), \quad (1.14)$$

где  $k_{\phi}$  – коэффициент, учитывающий форму зерен и другие особенности заполнителя. По данным В.М. Москвина,  $k_{\phi}=1,5-2,5$ ;

а,б,в,г – соответственно частные остатки на ситах с размерами ячеек от 40 до 5 мм, %;

Результаты просеивания крупного заполнителя записывают в табл. 1.14.

Т а б л и ц а 1 . 1 4

Результаты просеивания крупного заполнителя

Остаток на сите	Размеры ячейки сита, мм				Удельная поверхность крупного заполнителя, $S$ , м <sup>2</sup> /кг
	40	20	10	5	
Частный, г					
Частный, %					
Полный, %					

Лабораторная работа №4  
ПРОЕКТИРОВАНИЕ СОСТАВА ТЯЖЕЛОГО БЕТОНА  
РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫМ МЕТОДОМ

Проектирование и назначение состава бетонной смеси является начальной технологической операцией, обеспечивающей технико-экономическую эффективность выбранного состава бетона.

Расчетом состава бетона определяется оптимальное соотношение компонентов бетонной смеси заданной удобоукладываемости, обеспечивающее требуемую прочность бетона в конструкции с учетом технологии ее изготовления, долговечности и экономичности бетона.

Наибольшее распространение получили следующие способы подбора состава тяжелого бетона:

- расчетно-экспериментальный способ;
- подбор состава бетона по таблицам, графикам и номограммам;
- планирование эксперимента и выбор состава бетона с применением математико-статистических методов.

Первые два способа позволяют подобрать лабораторный состав бетона для пробных замесов на сухих материалах. Эти подобранные (расчетные) составы бетона корректируются на опытных замесах по подвижности (жесткости) смеси, проверяются на прочность (и другие свойства бетона в соответствии с поставленной задачей), уточняются и передаются на производство.

Производственные составы бетона рассчитываются с учетом фактической влажности заполнителей путем корректирования количества воды затворения.

Проектирование состава бетона методом математического планирования эксперимента позволяет решить задачу подбора состава бетона требуемых показателей по прочности, морозостойкости и др. с учетом влияния на эти показатели различных технологических факторов – удобоукладываемости бетонной смеси, качества заполнителей и т.д.

Состав бетона обычно выражают:

- расходом материалов по массе, кг, на 1 м<sup>3</sup> уложенной и уплотненной бетонной смеси (например, Ц-280, П-600, Щ-1270, В-170);
- соотношением компонентов по массе, принимая расход цемента за 1 (например, Ц:В:Щ:П=1:0,5:2,8:1,5).

*Цель работы* – изучить методику проектирования рационального состава тяжелого бетона расчетно-экспериментальным методом и исследовать факторы, влияющие на свойства бетона.

*Содержание работы.* Проектирование состава бетона включает следующие этапы:

- назначение требований к бетону, исходя из особенностей изготовления и эксплуатации конструкций;
- выбор исходных материалов для бетона и получение необходимых данных, характеризующих их свойства;
- ориентировочное определение состава бетона по таблицам, формулам, графикам с использованием метода абсолютных объемов;
- изготовление пробных замесов с разным расходом цемента при заданных свойствах бетонной смеси;
- испытание опытных образцов и корректирование состава бетона на пробных замесах;
- построение графической зависимости прочности бетона от расхода цемента;
- назначение состава бетона;
- определение производственного состава бетона.

*Применяемое оборудование:*

- лабораторные гирные или гидравлические весы;
- гидравлический пресс с усилием от 100 до 500 кН;
- формы металлические для кубов размерами 100×100×100 мм (ГОСТ 10180–90);
- лопатки;
- линейки металлические;
- цилиндры мерные вместимостью 1; 5; 10 л;
- мензурки;
- виброплощадка (ГОСТ 10181.1–81);
- стандартный конус для определения подвижности бетонной смеси (ГОСТ 10181.1–81);
- малогабаритный прибор для определения жесткости бетонной смеси (ГОСТ 10181.1–81);
- консистометр для определения жесткости бетонной смеси (ГОСТ 10181.1–81);
- секундомер.

### Порядок выполнения работы

#### 1. Определение исходных данных.

К данным, необходимым для расчета состава бетона, относятся:

- марка бетона по пределу прочности на сжатие (класс бетона);
- отпускная прочность, % от проектной прочности;
- передаточная прочность, % от проектной прочности;
- удобоукладываемость бетонной смеси: для подвижных смесей – по осадке стандартного конуса, см, для жестких – по жесткости (на консистометре), с;
- марка, или активность, цемента;
- межзерновая пустотность крупного заполнителя;
- максимальная крупность заполнителя;
- насыпная плотность крупного заполнителя;
- истинная плотность компонентов бетона;
- условия твердения (нормальные или ускоренные), режимы тепловой обработки, максимальная температура изотермической выдержки, относительная влажность воздуха;
- время хранения готовой продукции до вызова на склад.

Могут назначаться дополнительные требования по качеству бетона: класс по прочности на растяжение, морозостойкость, водонепроницаемость и др.

#### 2. Выбор исходных данных.

Для экономичного расходования цемента необходимо соблюдать рекомендации, приведенные в табл. 1.15.

Т а б л и ц а 1 . 1 5

#### Рекомендуемые марки цемента

Марка бетона (класс бетона)	Марка цемента	Марка бетона (класс бетона)	Марка цемента
M100 (B 7,5)	300	M350 (B 25)	500
M150 (B 10)	400	M400 (B 30)	500
M200 (B 15)	400	M450 (B 35)	600
M250 (B 20)	400	M500 (B 40)	600
M300 (B 22,5)	400	M600 (B 45)	600

Минимальный расход цемента зависит от консистенции бетонной смеси и крупности заполнителя (табл. 1.16).

Т а б л и ц а 1 . 1 6

#### Минимальный расход цемента

Смесь	Минимальный расход цемента, кг/м <sup>3</sup> , при предельной крупности заполнителя, мм			
	10	20	40	70
Особо жесткая (Ж = 20 с)	160	150	140	130
Жесткая (Ж = 10-20 с)	180	160	150	140
Малоподвижная (Ж = 5-10 с)	200	180	160	150
Подвижная (ОК = 1-10 см)	220	200	180	160
Очень подвижная (ОК = 10-16 см)	240	220	210	180
Литая (ОК >16 см)	250	230	200	190

Одним из основных факторов, определяющих экономичность состава бетона (по расходу цемента), а также его высокое качество, является правильный выбор соотношения между мелким и крупным заполнителями. В зависимости от наибольшей крупности заполнителя выбирается соотношение его фракций по табл.1.17.

Т а б л и ц а 1 . 1 7

Рекомендуемое количественное соотношение фракций  
крупного заполнителя

Наибольшая крупность, мм	Количество фракций	Соотношение фракций, %, при их размере			
		5-10	10-20	20-40	40-70
20	2	45-60	40-50	-	-
40	3	25-30	20-30	40-55	-
70	4	20-25	15-20	15-20	35-50

### 3. Ориентировочное назначение состава бетона.

В основу расчета состава бетона положены формулы прочности бетона (формула Болоема – Скрамтаева):

$$R_b = A \cdot R_c (\text{Ц/В} \pm 0,5), \quad (1.15)$$

где  $R_b$  – марка бетона по прочности, МПа (кгс/см<sup>2</sup>);

$R_c$  – активность цемента, МПа (кгс/см<sup>2</sup>);

Ц/В – цементно-водное отношение;

A – коэффициент, учитывающий качество заполнителей.

Для расчета состава бетона компоненты бетонной смеси обычно определяются в следующей последовательности: вода, цемент, щебень и песок.

3.1. Расход воды устанавливают исходя из заданной удобоукладываемости по табл. 1.18.

Т а б л и ц а 1 . 1 8

Нормы расхода воды в бетонной смеси

Показатели смеси	Жесткость, с по ГОСТ 10181.1–81; 10181–2000	Подвижность, см	Расход воды, л/м <sup>3</sup> , при крупности заполнителей, мм							
			гравий				щебень			
			10	20	40	70	10	20	40	70
Ж <sub>4</sub>	>31	-	150	135	125	120	160	150	135	130
Ж <sub>3</sub>	30-21	-	160	145	130	125	170	160	145	140
Ж <sub>2</sub>	20-11	-	165	150	135	130	175	165	150	145
Ж <sub>1</sub>	10-5	-	175	160	145	140	185	175	160	155
П <sub>1</sub>	–	1-4	190	175	160	155	200	190	175	170
П <sub>2</sub>	–	5-9	200	185	170	165	210	200	185	180
П <sub>3</sub>	–	10-15	215	205	190	180	225	215	200	190
П <sub>4</sub>	–	16-и более	225	220	205	195	235	230	215	205

Примечания: 1. Расход воды приведен для смеси на портландцементе с НГЦТ=26-28 % и на песке с  $M_{кр}=2$ .

2. При изменении нормальной плотности цементного теста на каждый процент в меньшую сторону расход воды сокращается на 3-5 л, в большую – увеличивается на то же значение.

3. При изменении модуля крупности песка на каждые 0,5 в меньшую сторону расход воды увеличивается на 3-5 л, в большую – уменьшается на то же значение.

3.2. Для определения расхода цемента необходимо найти водоцементное отношение, при котором можно получить заданную прочность бетона.

Водоцементное отношение вычисляют по формуле (1.15) из следующих выражений:

- для обычного бетона с  $V/C \geq 0,4$  ( $C/V \leq 2,5$ )

$$V/C = A \cdot R_{ц} / (R_b + 0,5 \cdot A \cdot R_{ц}); \quad (1.16)$$

- для высокопрочного бетона с  $V/C < 0,4$  ( $C/V > 2,5$ )

$$V/C = A_1 \cdot R_{ц} / (R_b - 0,5 \cdot A_1 \cdot R_{ц}); \quad (1.17)$$

Значения коэффициентов  $A$  и  $A_1$  в формулах (1.16) и (1.17) можно принять по табл. 1.19.

Т а б л и ц а 1 . 1 9

Значения коэффициентов  $A$  и  $A_1$

Характеристика материалов	$A$	$A_1$
Высококачественные	0,65	0,43
Рядовые	0,6	0,40
Пониженного качества (гравий вместо щебня, мелкий песок)	0,55	0,37

Расход цемента вычисляется по формуле

$$C = \frac{V}{V/C}. \quad (1.18)$$

Если расход цемента на  $1 \text{ м}^3$  бетона окажется ниже допустимого по строительным нормам и правилам, то необходимо увеличить его до базовых норм, приведенных в СНиП 82-05-95 (табл.1.20, 1.21, 1.22).

Т а б л и ц а 1 . 2 0

Базовые нормы расхода цемента для тяжелого бетона

Класс бетона по прочности на сжатие	Базовые нормы расхода цемента марки 400 для тяжелого бетона при твердении, $\text{кг}/\text{м}^3$					
	в естественных условиях	в условиях тепловой обработки при отпускной прочности, %				
		55-60	70	80	90	100
B7,5	180	180	200	210	225	240
B10	200	200	215	235	245	260
B12,5	225	225	235	260	270	285
B15	255	255	265	280	295	315
B20	305	310	315	340	360	380
B22,5	335	340	350	370	395	420
B25	365	370	380	400	425	450
B30	415	430	440	450	480	520
B35	480	500	510	520	540	570
B40	550	570	580	590	600	—

Т а б л и ц а 1 . 2 1

Базовые нормы расхода цемента для изделий,  
изготовленных в кассетных установках

Толщина изделия, см	Класс бетона по прочности на сжатие	Базовые нормы расхода цемента марки 400 для изделий, изготовленных в кассетных установках, кг/м <sup>3</sup> , при отпускной прочности, %		
		70	80	90
10 и менее	B10	280	315	335
	B12,5	310	360	380
	B15	350	395	420
	B20	415	480	500
	B22,5	450	520	540
Более 10	B10	270	290	325
	B12,5	295	325	355
	B15	325	360	395
	B20	385	440	475
	B22,5	420	475	520

Т а б л и ц а 1 . 2 2

Базовые нормы расхода цемента для мелкозернистого бетона

Класс бетона по прочности на сжатие	Базовые нормы расхода цемента марки 400 для мелкозернистого бетона при твердении, кг/м <sup>3</sup>			
	в естественных условиях	в условиях тепловой обработки при отпускной прочности, %		
		70	80	90
B7,5	280	300	330	355
B10	315	325	355	390
B12,5	350	360	390	420
B15	400	410	450	490
B20	500	500	530	590
B22,5	535	535	580	–
B25	550	550	600	–

3.3. Расход щебня (гравия) на 1 м<sup>3</sup> бетона определяется из условия, что плотность тяжелого бетона в уплотненном состоянии приближается к абсолютной плотности, т.е. сумма абсолютных объемов исходных материалов близка к 1. Следовательно,

$$\frac{Ц}{\rho_{ц}} + \frac{В}{\rho_{в}} + \frac{П}{\rho_{п}} + \frac{Щ}{\rho_{щ}} = 1 \text{ м}^3 \text{ (1000 л)}, \quad (1.19)$$

где Ц, В, П, Щ – содержание соответственно цемента, воды, песка и щебня (гравия), кг;

$\rho_{ц}, \rho_{в}, \rho_{п}, \rho_{щ}$  – плотность этих материалов, кг/л.

Из уравнения (1.19) следует, что  $\frac{Ц}{\rho_{ц}} + \frac{В}{\rho_{в}} + \frac{П}{\rho_{п}}$  – это объем раствора, заполняющего пустоты в крупном заполнителе, т.е. объем раствора можно приравнять к объему пустот в крупном заполнителе.

Объем пустот можно представить в виде

$$\frac{Щ}{\rho_{щ}^H} \cdot V_{м.п}, \quad (1.20)$$

где  $\frac{Щ}{\rho_{щ}^H}$  – объем крупного заполнителя, л;

$V_{м.п}$  – межзерновая пустотность заполнителя, %;

$\rho_{щ}^H$  – насыпная плотность крупного заполнителя, кг/л.

При заполнении объема пустот смесь будет очень жесткой; поэтому необходимо в расчеты ввести коэффициент избытка раствора  $\alpha$ , который устанавливается по табл.1.23. Следовательно,

$$\frac{Ц}{\rho_{ц}} + \frac{В}{\rho_{в}} + \frac{П}{\rho_{п}} = \frac{Щ}{\rho_{щ}^H} \cdot V_{м.п} \cdot \alpha. \quad (1.21)$$

Решив совместно уравнения (1.19) и (1.21), получим формулу, позволяющую рассчитать необходимый расход крупного заполнителя в кг на 1 м<sup>3</sup> бетона:

$$1000 - \frac{Щ}{\rho_{щ}} = \frac{Щ}{\rho_{щ}^H} \cdot V_{м.п} \cdot \alpha,$$

$$1000 = \frac{Щ}{\rho_{щ}} + \frac{Щ}{\rho_{щ}^H} \cdot V_{м.п} \cdot \alpha, \quad (1.22)$$

$$1000 = Щ \left( \frac{1}{\rho_{щ}} + \frac{1}{\rho_{щ}^H} \cdot V_{м.п} \cdot \alpha \right).$$

Отсюда

$$Щ = \frac{1000}{\frac{V_{м.п}}{\rho_{щ}^H} \cdot \alpha + \frac{1}{\rho_{щ}}}. \quad (1.23)$$

Значения коэффициента  $\alpha$ , зависящего от расхода цемента и водоцементного отношения для подвижных смесей, приведены в табл.1.23.

Т а б л и ц а 1.23

## Показатели коэффициента избытка раствора

Расход цемента, кг	Значения коэффициента $\alpha$ при В/Ц					
	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8
250	-	-	-	1,26	1,32	1,38
300	-	-	1,3	1,36	1,42	-
350	-	1,32	1,38	1,44	-	-
400	1,31	1,4	1,46	-	-	-
500	1,44	1,52	1,56	-	-	-
600	1,52	1,56	-	-	-	-

Примечания: 1. При других значениях Ц и В/Ц коэффициент  $\alpha$  находится интерполяцией.

2. При использовании мелкого песка с водопотребностью более 7% коэффициент  $\alpha$  уменьшается на 0,03 на каждый процент увеличения водопотребности песка. Если применить крупный песок с водопотребностью менее 7%, то коэффициент  $\alpha$  увеличивается на 0,03 на каждый процент уменьшения водопотребности песка.

3. Для жестких бетонных смесей при расходе цемента менее 400 кг/м<sup>3</sup> принимают  $\alpha \approx 1,1$ .

4. Значения  $\alpha < 1,05$  принимают в случае использования мелких песков.

5. Для составов жестких смесей с расходом цемента более 400 кг/м<sup>3</sup> принимают  $\alpha > 1,1$ .

3.4. Расход песка на 1 м<sup>3</sup> бетона (1000 л) вычисляется как разность между абсолютным объемом бетона и суммой абсолютных объемов цемента, воды и крупного заполнителя, кг:

$$П = \left[ 1000 - \left( \frac{Ц}{\rho_{ц}} + \frac{В}{\rho_{в}} + \frac{Щ}{\rho_{щ}} \right) \right] \cdot \rho_{п}. \quad (1.24)$$

Полученный состав бетона, называемый нормальным, соответствует сухим материалам. Если крупный и мелкий заполнители имеют определенную влажность, необходимо осуществить расчет рабочего состава бетона.

4. *Определение номинального и рабочего составов бетона.*

Вычисленные значения расхода материалов номинальных составов записываются в табличной форме (табл. 1.24).

Работа выполняется тремя бригадами студентов. Первая бригада принимает расход цемента по «Типовым нормам расхода цемента» для заданных физико-механических характеристик бетона. Вторая бригада уменьшает расход цемента по сравнению с нормативными на 15%, третья бригада увеличивает расход цемента по сравнению с нормативным на 15%.

Т а б л и ц а 1 . 2 4

Номинальные расходы материалов на 1 м<sup>3</sup> (1000 л) и пробные замесы

Материалы	Расход материалов, кг					
	I бригада		II бригада		III бригада	
	на 1000 л	на 7 л	на 1000 л	на 7 л	на 1000 л	на 7 л
Цемент						
Вода						
Щебень						
Песок						
Средняя плотность бетонной смеси (теоретическая) $\rho_{б.см}^T$ , кг/м <sup>3</sup>						

При условии известной влажности крупного и мелкого заполнителей каждая бригада рассчитывает рабочий состав пробных замесов, записывая результаты в той же табличной форме (см. табл. 1.24).

#### 5. Характеристика бетонных смесей

Бетонные смеси приготавливают в соответствии с требованиями ГОСТ 7473–2010 Смеси бетонные. Технические условия. ГОСТ 10181–2000 Смеси бетонные. Методы испытаний. Бетонные смеси характеризуют следующими технологическими показателями качества:

- удобоукладываемость;
- средняя плотность;
- расслаиваемость;
- пористость;
- температура;
- сохраняемость свойств во времени;
- объем вовлеченного воздуха.

В зависимости от показателя удобоукладываемости бетонные смеси подразделяют на марки в соответствии с табл. 1.25-1.28.

Т а б л и ц а 1 . 2 5

Марки по распылу конуса

Марка	Распыл конуса, см
P1	Менее 35
P2	35-41
P3	42-48
P4	49-55
P5	56-62
P6	Более 62

Т а б л и ц а 1 . 2 6

Марки по осадке конуса

Марка	Осадок конуса, см
П1	1-4
П2	5-9
П3	10-15
П4	16-20
П5	Более 20

Т а б л и ц а 1.27  
Марки по жесткости

Марка	Жесткость, с
Ж1	5-10
Ж2	11-20
Ж3	21-30
Ж4	31-50
Ж5	Более 50

Т а б л и ц а 1.28  
Марки по уплотнению

Марка	Коэффициент уплотнения
КУ1	Более 1,45
КУ2	1,45-1,26
КУ3	1,25-1,11
КУ4	1,10-1,04
КУ5	Менее 1,04

Удобоукладываемость бетонной смеси может быть задана маркой и дополнительно конкретным значением показателя удобоукладываемости в соответствии с табл. 1.25-1.28. Допустимое отклонение заданных значений показателей удобоукладываемости бетонной смеси не должно превышать величин, приведенных в табл. 1.29.

Т а б л и ц а 1.29  
Допустимые отклонения заданных значений показателей удобоукладываемости

Наименование характеристики удобоукладываемости	Номинальное значение	Допуски
Распływ конуса, см	Все значения	$\pm 3$
Осадка конуса, см	До 10	$\pm 1$
	Более 10	$\pm 2$
Жесткость, с	Более 10	$\pm 3$
	До 10	$\pm 2$
Коэффициент уплотнения	Более 1,25	$\pm 0,10$
	От 1,11 до 1,25	$\pm 0,08$
	До 1,10	$\pm 0,05$

Расслаиваемость бетонной смеси не должна превышать значений, приведенных в табл. 1.30.

Т а б л и ц а 1.30  
Требования к расслаиваемости бетонной смеси

Марка по удобоукладываемости	Расслаиваемость бетонной смеси, %, не более		
	Водоотделение	Раствороотделение	
		тяжелых и мелкозернистых бетонов	легких бетонов
Ж1-Ж5	0,2	3	4
П1-П2	0,4	3	4
П3-П5 и Р1-Р6	0,8	4	6

Допустимое отклонение заданных значений средней плотности, расслаиваемости, пористости, температуры и сохраняемости свойств во времени не должно превышать значений, приведенных в табл. 1.31.

Т а б л и ц а 1 . 3 1

Допустимые отклонения заданных значений показателей качества бетонной смеси

Наименование показателя качества бетонной смеси	Диапазон, в который попадает заданное значение показателя	Допустимое отклонение заданного значения показателя
Средняя плотность, кг/м <sup>3</sup>	Все значения	±20
Расслаиваемость		
- по водоотделению, %	Менее 0,4	+0,1
	0,4 и более	+0,2
- по раствороотделению, %	Менее 4	+0,5
	4 и более	+1,0
Пористость, % абс.	Все значения	±1
Температура, °С	Все значения	±3
Сохраняемость свойств во времени	Не менее 1 ч 30 мин	-10 мин
	От 1 ч 30 мин до 3 ч 00 мин	-20 мин
	Более 3 ч 00 мин	-30 ми

Т а б л и ц а 1 . 3 2

Продолжительность перемешивания бетонных смесей тяжелых и мелкозернистых бетонов на плотных заполнителях

Вместимость смесителя по загрузке, л	Продолжительность перемешивания, с, не менее					
	в гравитационных смесителях для бетонных смесей марок по удобоукладываемости			в смесителях принудительного действия для смесей всех марок по удобоукладываемости при водоцементном отношении В/Ц		
	Ж1 и П1	П2	П3...П5	Менее 0,3	0,3-0,4	Более 0,4
Менее 750	90	75	60	80	60	50
750-1500	120	105	90	100	70	50
Более 1500	150	135	120	120	80	50

Т а б л и ц а 1 . 3 3

Продолжительность перемешивания бетонных смесей легких бетонов на пористых заполнителях в смесителях принудительного действия

Вместимость смесителя по загрузке, л	Продолжительность перемешивания, с, не менее, при средней плотности бетона, кг/м			
	Менее 1000	1000-1400	1401-1600	Более 1600
Менее 750	180	150	120	115
750-1500	210	180	150	120
Более 1500	240	210	180	135

### 5.1. Приготовление пробных замесов бетонной смеси.

Перемешивание материалов для пробных замесов производится вручную на металлическом поддоне размером 0,7×1 м с помощью лопат или в лабораторном смесителе. На смоченный водой поддон высыпается песок, затем цемент, после их перемешивания добавляется щебень. Материалы перемешиваются в течение 3-4 мин. В сухой смеси делается углубление для добавления воды. Сначала подается примерно половина дозы воды и осуществляется ее перемешивание с сухими материалами в течение 3-4 мин, затем подается оставшая вода, и смесь опять тщательно перемешивается.

Проверка пробного замеса на заданную подвижность производится по осадке конуса.

Определение осадки бетонной смеси осуществляется следующим образом (ГОСТ 10181.1–81; 10181–2000). Металлический конус, предварительно смоченный водой, устанавливается на металлический лист. Наполнение конуса бетонной смесью производится в три слоя. Каждый слой штыкуется 25 раз металлическим стержнем диаметром 16 мм и длиной 650 мм. Затем снимается насадка, срезается ножом избыток бетонной смеси, конус поднимается вертикально вверх, и измеряется осадка бетонной смеси.

Если осадка меньше заданной, т.е. подвижность смеси недостаточна, то в нее добавляются вода и цемент (2-3 % от заданного их количества) для сохранения принятого водоцементного отношения и производится повторное определение подвижности (осадки).

Если бетонная смесь имеет избыточную подвижность, в замес добавляются песок и щебень в количестве 3-5 % от заданного и производится повторное определение подвижности.

Для контроля бетонной смеси по жесткости используется методика, изложенная в ГОСТ 10181.1–81; 10181–2000.

### 6. Формование опытных образцов.

Свежеприготовленная бетонная смесь засыпается в предварительно взвешенную форму с избытком. Каждая бригада готовит 6 образцов-кубов с ребром 10 см.

Уплотнение бетонной смеси производится на виброплощадке со стандартной частотой и амплитудой колебаний. Время уплотнения рекомендует преподаватель.

### 7. Корректировка состава бетона.

Для корректировки состава бетона необходимо сначала определить среднюю плотность, затем коэффициент  $K$ , отражающий отношение фактической плотности бетонной смеси к теоретической.

Средняя плотность уплотненной бетонной смеси вычисляется по формуле

$$\rho_{\text{б.см}}^{\text{ф}} = \frac{m_1 - m_2}{V}, \quad (1.25)$$

где  $m_1$  – масса формы с бетонной смесью, кг;

$m_2$  – масса пустой формы, кг;  
 $V$  – объем бетонной смеси, л.

Коэффициент  $K$  (теоретически должен равняться 1) определяется по формуле

$$K = \frac{\rho_{б.см}^{\phi}}{\rho_{б.см}^T}, \quad (1.26)$$

где  $\rho_{б.см}^T$  – теоретическое значение средней плотности бетонной смеси, кг/л (см.табл.1.33);

$\rho_{б.см}^{\phi}$  – фактическое значение средней плотности бетонной смеси, получаемое по результатам опытов, т.е. по формуле (1.25), кг/л.

Фактический расход материалов на  $1 \text{ м}^3$  с учетом коэффициента  $K$  рассчитывается из следующих выражений:

$$\begin{aligned} C_{\phi} &= C : K; \\ P_{\phi} &= P : K; \\ \text{Щ}_{\phi} &= \text{Щ} : K; \\ V_{\phi} &= V : K, \end{aligned} \quad (1.27)$$

где  $C, V, \text{Щ}, P$  – соответственно расходы цемента, воды, щебня, песка, кг на  $1 \text{ м}^3$  бетона.

#### 8. Испытание опытных образцов и назначение состава бетона.

Результаты испытаний записываются в табличной форме (табл.1.34).

Т а б л и ц а 1 . 3 4

Физико-механические характеристики опытных образцов  
из тяжелого бетона

Состав бетона	Расход цемента $C$ , кг/м <sup>3</sup>	Размеры образцов, см			Площадь сечения образцов $F$ , см <sup>2</sup>	Разрушающая нагрузка $P$ , МПа (кгс)	Предел прочности при сжатии $R_b$ , МПа	Значение $R_b$ , МПа, с учетом $\beta$
		$a$	$b$	$c$				
Состав 1 (бригада №1)								
Состав 2 (бригада №2)								
Состав 3 (бригада №3)								

Опытные образцы из бетона в контрольные сроки испытываются на сжатие до разрушения. Испытанию подвергаются три образца.

Предварительно определяются и заносятся в табл.1.34 размеры и площадь сечения  $F$ , см<sup>2</sup>, образца. Опорные грани выбираются так, чтобы

сжимающая нагрузка была направлена параллельно слоям укладки бетонной смеси в форму. Выбранные грани помечаются мелом. Опытный образец помещают на нижнюю плиту пресса, тщательно центрируя его по оси. Нагрузка при испытании должна возрастать плавно со скоростью 0,4-0,6 МПа/см<sup>2</sup> в секунду.

Предел прочности при сжатии вычисляется (как среднее арифметическое трех испытаний) по формуле

$$R_6 = \frac{P}{F}, \quad (1.28)$$

где  $P$  – разрушающая нагрузка, МПа (кгс);

$F$  – площадь сечения образца, см<sup>2</sup>.

Полученное значение  $R_6$  приводится к пределу прочности образцов стандартного размера 150×150×150 мм путем умножения на коэффициент  $\beta$ , значение которого для образца-куба с ребром 100 мм равно 0,95.

На основании результатов испытания опытных образцов на сжатие строится график зависимости  $R_6 = f(\text{Ц})$  (рис.1.3), по которому определяется расход цемента в зависимости от требуемой (заданной) прочности бетона.

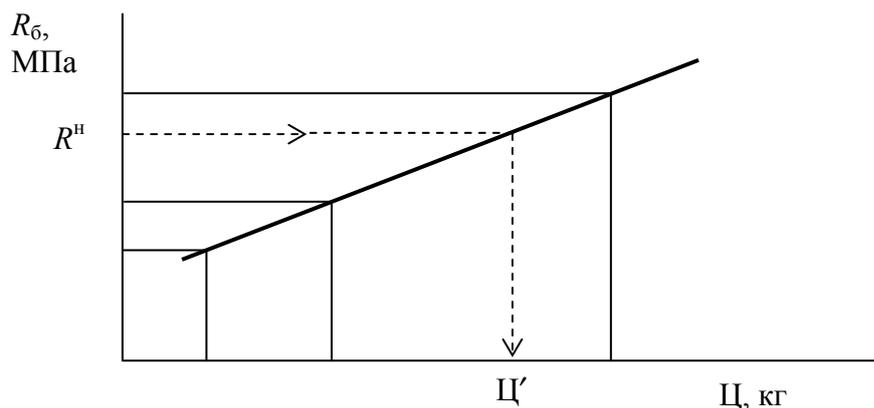


Рис. 1.3. Зависимость прочности бетона от расхода цемента:  
 $R^H$  – заданная прочность бетона;  $\text{Ц}'$  – необходимый расход цемента

Расчет потребности количества щебня и песка осуществляется по формулам (1.23) и (1.24). Необходимое количество воды определяется исходя из фактического В/Ц-отношения, уточненных составов бетона, рассчитываемых по формуле (1.27).

Полученные результаты записываются в табличной форме (табл.1.35).

Т а б л и ц а 1 . 3 5

Расход компонентов на 1 м<sup>3</sup> бетонной смеси

Наименование материала	Расход, кг
Цемент	
Щебень	
Песок	
Вода	

## 1.2. Выбор и назначение состава тяжелого бетона с применением методов математического планирования эксперимента

На технологические свойства бетонной смеси, а следовательно, и затвердевшего бетона оказывают влияние такие факторы, как качество и содержание цементного теста в бетонной смеси, водоцементное отношение, количество и вид крупного и мелкого заполнителей и т.д. Воздействие этих факторов на реологические характеристики бетонной смеси и технологические свойства бетона необходимо учитывать при проектировании состава бетона с заданными свойствами.

Закономерности количественного и качественного влияния различных факторов на свойства бетонной смеси и бетона будем выявлять методом многофакторного планирования эксперимента с использованием ЭВМ.

Сущность планирования эксперимента и выбора состава тяжелого бетона с применением математико-статистических методов заключается в установлении зависимости между заданными свойствами бетона, расходом и свойствами составляющих компонентов. Получаемая математическая зависимость используется для назначения и поиска оптимальных составов бетона.

Изучение методики проектирования и назначения состава бетона нескольких марок методами математического планирования эксперимента и исследование факторов, влияющих на свойства бетонной смеси и бетона, а также установление математических закономерностей влияния различных факторов на свойства бетонной смеси и бетона с применением ЭВМ осуществляются в следующей последовательности:

1. Выбор переменных факторов и условий их варьирования.
2. Составление матрицы планирования и плана проведения эксперимента.
3. Расчет состава бетона и приготовление опытных образцов в соответствии с планом проведения эксперимента.
4. Получение математических моделей.
5. Проведение анализа полученных математических моделей и построение графических зависимостей.

### 1. *Выбор переменных данных.*

При планировании эксперимента производится выбор переменных факторов  $X$ , влияющих на свойство  $Y$ . Факторы должны принимать различные значения, т.е. варьироваться на разных уровнях. Количество уровней варьирования факторов  $X_i$  должно быть  $\geq 2$ ,  $\geq 3$ ,  $\geq 4$  и т.д., если в модели фактор  $X$  будет фигурировать соответственно с показателем степени 1, 2, 3. Естественно, что чем меньше уровней варьирования, тем проще организовать эксперимент, но это не всегда соответствует лучшим свойствам матрицы планирования с точки

зрения математической обработки (так, например, в центральном композиционном плане второго порядка принимают 5 уровней варьирования).

Интервал варьирования (разность значений между ближайшими уровнями) фактора должен быть достаточно большим относительно погрешности значения фактора.

Интервал варьирования и средний уровень определяются из выражений:

$$\Delta X_i = 0,5(X_i^{\max} - X_i^{\min}), \quad (1.29)$$

$$X_i = 0,5(X_i^{\max} + X_i^{\min}). \quad (1.30)$$

Часто бывает удобно от физических значений переменных переходить к кодированным значениям.

Пусть переменная  $X_i$  варьируется на двух уровнях:  $X_i^{\max}$  и  $X_i^{\min}$ .

Кодированные значения переменных могут быть определены по формуле

$$X_i = \frac{X_i - \bar{X}_i}{\Delta X_i}. \quad (1.31)$$

Тогда

$$X_i^{\max} = +1, X_i^{\min} = -1, X_i = 0.$$

Отсюда видно, что переменным, варьируемым на двух уровнях, можно придать кодированные значения +1, -1, а переменным, варьируемым на трех уровнях, - значения +1, 0 и -1, если средний уровень определить как полусумму верхнего и нижнего уровней.

В табл.1.36 заносятся условия проведения эксперимента.

Т а б л и ц а 1 . 3 6

Условия проведения эксперимента

Уровень варьирования	Факторы			
	$X_1$	$X_2$	...	$X_n$
Основной уровень	$X_{01}$	$X_{02}$	...	$X_{0n}$
Интервал варьирования	$\Delta X_1$	$\Delta X_2$	...	$\Delta X_n$
Верхний уровень	$X_1^{\max}$	$X_2^{\max}$	...	$X_n^{\max}$
Нижний уровень	$X_1^{\min}$	$X_2^{\min}$	...	$X_n^{\min}$

## 2. Составление плана эксперимента.

Если предположить, что модель линейна относительно факторов, то достаточно каждый фактор варьировать на двух уровнях (кодированные переменные принимают значения +1 и -1). В этом случае удобно применять дробный или полный факторный план (ДФП и ПФП соответственно).

Полный факторный план типа  $2^2$  представлен в табл.1.37 (опыты с первого по четвертый).

Т а б л и ц а 1 . 3 7

Матрица планирования ПФП

Наименование плана	Номер опыта	Варьируемые факторы				
		$X_1$	$X_2$	$X_3$	$X_4$	$X_5$
ПФП типа $2^2$	1	+1	+1	+1	+1	+1
	2	-1	+1	+1	+1	+1
	3	+1	-1	+1	+1	+1
	4	-	-	+1	+1	+1
ПФП типа $2^3$	5	+1	+1	-1	+1	+1
	6	-1	+1	-1	+1	+1
	7	+1	-1	-1	+1	+1
	8	-	-	-1	+1	+1
ПФП типа $2^4$	9	+1	+1	+1	-1	+1
	10	-1	+1	+1	-1	+1
	11	+1	-1	+1	-1	+1
	12	-1	-1	+1	-1	+1
	13	+1	+1	-1	-1	+1
	14	-1	+1	-1	-1	+1
	15	+1	-1	-1	-1	+1
	16	-1	-1	-1	-1	+1
ПФП типа $2^5$	17	+1	+1	+1	+1	+1
	18	-1	+1	+1	+1	-1
	19	+1	-1	+1	+1	-1
	20	-1	-1	+1	+1	-1
	21	+1	+1	-1	+1	-1
	22	-1	+1	-1	+1	-1
	23	+1	-1	-1	+1	-1
	24	-1	-1	-1	+1	-1
	25	+1	+1	+1	-1	-1
	26	-1	+1	+1	-1	-1
	27	+1	-1	+1	-1	-1
	28	-1	-1	+1	-1	-1
	29	+1	+1	-1	-1	-1
	30	-1	+1	-1	-1	-1
	31	+1	-1	-1	-1	-1
	32	-1	-1	-1	-1	-1

Если известен ПФП типа  $2^n$  ( $2$  – количество уровней,  $n$  – число переменных), то для построения ПФП типа  $2^n$  под планом  $2$  подписывают такой же план, а справа присоединяют столбец с фактором  $X_{n+1}$ , который принимает значения  $+1$  в одной половине столбца и  $-1$  – в другой. Последовательность достраивания ПФП типа  $2^5$  представлена в табл.1.37.

ПФП типа  $2^n$  имеет  $2^n$  строк и требует для реализации проведения  $2^n$  опытов. При больших значениях  $n$  это число опытов оказывается избыточным. Тогда целесообразно применять дробные факторные планы.

ДФП типа  $2^{n-p}$  строится следующим образом. Выбрав  $n$  и  $p$ , записывают ПФП типа  $2^{n-p}$ , справа к нему приписывают  $p$  столбцов, каждый из которых получается перемножением от двух до  $n-p$  столбцов исходного ПФП. Число опытов для реализации ДФП типа  $2^{n-p}$  равно  $2^{n-p}$ , что значительно меньше, чем для ПФП при том же количестве факторов. В табл.1.38 приведен пример ДФП типа  $2^{5-2}$  с  $X_4 = X_1 \cdot X_2$  и  $X_5 = X_1 \cdot X_3$  (в ДФП  $2^{5-2}$  столбцы  $X_4$  и  $X_5$  можно выбрать из  $X_1 \cdot X_2$ ,  $X_1 \cdot X_3$ ,  $X_2 \cdot X_3$  и  $X_1 \cdot X_2 \cdot X_3$ ).

Т а б л и ц а 1 . 3 8

Дробный факторный план типа  $2^{5-2}$

Номер опыта	Варьируемые факторы				
	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$X_4 = X_1 \cdot X_2$	$X_5 = X_1 \cdot X_3$
1	+1	+1	+1	+1	+1
2	-1	+1	+1	-1	-1
3	+1	-1	+1	-1	+1
4	-1	-1	+1	+1	-1
5	+1	+1	-1	+1	-1
6	-1	+1	-1	-1	+1
7	+1	-1	-1	-1	-1
8	-1	-1	-1	+1	+1

Матрица планирования получается аналогично случаю ПФП. Важной особенностью ПФП и ДФП является их ортогональность.

Если линейная модель оказалась неадекватной, а также если заранее модель предполагается более сложной, чем линейная, следует строить план для квадратичной модели. В таком плане факторы варьируют не менее чем на трех уровнях.

Обычно для квадратичных моделей строят центральные композиционные планы (ЦКП). Ядром ЦКП является ПФП типа  $2^n$  или ДФП типа  $2^{n-p}$ . К ядру добавляют  $2n$  «звездных» точек и центральную точку (центр плана). Пример построения ЦКП для трех факторов, варьируемых на трех уровнях, представлен в табл.1.39.

Т а б л и ц а 1 . 3 9

Центральный композиционный план трехфакторного эксперимента

Составляющие плана	Номер опыта	Варьируемые факторы		
		$X_1$	$X_2$	$X_3$
1	2	3	4	5
Ядро (ПФП типа $2^3$ )	1	+1	+1	+1
	2	-1	+1	+1
	3	+1	-1	+1
	4	-1	-1	+1
	5	+1	+1	-1
	6	-1	+1	-1
	7	+1	-1	-1
	8	-1	-1	-1

Окончание табл. 1.39

1	2	3	4	5
Звездные точки	9	$+\alpha$	0	-1
	10	$-\alpha$	0	0
	11	0	$+\alpha$	0
	12	0	$-\alpha$	0
	13	0	0	$+\alpha$
	14	0	0	$-\alpha$
Центр	15	0	0	0

Для получения матрицы планирования к ЦКП слева приписывается столбец  $X_0$  со значениями +1, а справа – столбцы, полученные из столбцов ЦКП. В табл.1.40 представлена матрица планирования для трех факторов с ядром ЦКП типа  $2^3$ . Выбором  $\alpha$  и  $\beta$  можно придать различные свойства ЦКП. При  $\alpha = 2^{\frac{n-p}{4}}$ ,  $\beta = 0$  получается ротатабельный ЦКП, а при

$$\alpha = \left[ 2^{\frac{n-p}{2}-1} \left( \sqrt{2^{n-p} + 2n + 1} - 2^{\frac{n-p}{2}} \right) \right]^{1/2}, \quad (1.32)$$

$$\beta = \frac{2^{n-p} + \alpha^2}{2^{n-p} + 2n + 1} \quad (1.33)$$

имеем ортогональный ЦКП.

Таблица 1.40  
Матрица планирования ЦКП для трех факторов

Составляющие плана	Номер опыта	Матрица планирования									
		$X_0$	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$X_1^2 - \beta$	$X_2^2 - \beta$	$X_3^2 - \beta$	$X_1 \cdot X_2$	$X_1 \cdot X_3$	$X_2 \cdot X_3$
Ядро (ПФП типа $2^3$ )	1	+1	+1	+1	+1	$1-\beta$	$1-\beta$	$1-\beta$	+1	+1	+1
	2	+1	-1	+1	+1	$1-\beta$	$1-\beta$	$1-\beta$	-1	-1	+1
	3	+1	+1	-1	+1	$1-\beta$	$1-\beta$	$1-\beta$	-1	+1	-1
	4	+1	-1	-1	+1	$1-\beta$	$1-\beta$	$1-\beta$	-1	+1	-1
	5	+1	+1	+1	-1	$1-\beta$	$1-\beta$	$1-\beta$	+1	-1	-1
	6	+1	-1	+1	-1	$1-\beta$	$1-\beta$	$1-\beta$	-1	+1	-1
	7	+1	+1	-1	-1	$1-\beta$	$1-\beta$	$1-\beta$	-1	-1	+1
	8	+1	-1	-1	-1	$1-\beta$	$1-\beta$	$1-\beta$	+1	+1	+1
Звездные точки	9	+1	$+\alpha$	0	0	$\alpha^2 - \beta$	$-\beta$	$-\beta$	0	0	0
	10	+1	$-\alpha$	0	0	$\alpha^2 - \beta$	$-\beta$	$-\beta$	0	0	0
	11	+1	0	$+\alpha$	0	$-\beta$	$\alpha^2 - \beta$	$-\beta$	0	0	0
	12	+1	0	$-\alpha$	0	$-\beta$	$\alpha^2 - \beta$	$-\beta$	0	0	0
	13	+1	0	0	$+\alpha$	$-\beta$	$-\beta$	$\alpha^2 - \beta$	0	0	0
	14	+1	0	0	$-\alpha$	$-\beta$	$-\beta$	$\alpha^2 - \beta$	0	0	0
	15	+1	0	0	0	$-\beta$	$-\beta$	$-\beta$	0	0	0

После выбора факторов и условий проведения эксперимента составляется план эксперимента, куда заносятся также данные по исследуемому свойству  $Y$ . План проведения эксперимента при числе факторов, равном двум, представлен в табл.1.41.

Т а б л и ц а 1 . 4 1

План проведения эксперимента

Номер опыта	Матрица планирования						Исследуемое свойство		
	$X_0$	$X_1$	$X_2$	$X_1 \cdot X_2$	$X_1^2$	$X_2^2$	$Y_1$	$Y_2$	$Y_3$
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	$Y_{11}$	$Y_{21}$	$Y_{31}$
2	+1	-1	+1	-1	+1	+1	$Y_{12}$	$Y_{22}$	$Y_{32}$
3	+1	+1	-1	-1	+1	+1	$Y_{13}$	$Y_{23}$	$Y_{33}$
4	+1	-1	-1	+1	+1	+1	$Y_{14}$	$Y_{24}$	$Y_{34}$
5	+1	+1	+1	+1	+1	+1	$Y_{15}$	$Y_{25}$	$Y_{35}$
6	+1	-1	+1	+1	+1	+1	$Y_{16}$	$Y_{26}$	$Y_{36}$
7	+1	+1	-1	-1	+1	+1	$Y_{17}$	$Y_{27}$	$Y_{37}$
8	+1	-1	-1	+1	+1	+1	$Y_{18}$	$Y_{28}$	$Y_{38}$

Первая графа табл.1.41 задает порядок выполнения опыта, вторая – значения +1. В третьей и четвертой графах указаны значения первого и второго факторов. Эти графы определяют условия проведения эксперимента. Так, согласно плану, в опыте 1 факторы  $X_1$  и  $X_2$  должны устанавливаться на верхних уровнях. Значения пятой, шестой и седьмой граф необходимы для построения математической модели. В восьмой, девятой и десятой графах помещаются результаты опытов (например, значения удобоукладываемости бетонной смеси, прочности бетона и т.д.).

В соответствии с планом проведения эксперимента для каждого опыта рассчитывается состав бетона.

### 3. Реализация плана проведения эксперимента и построение математических моделей.

Зависимость исследуемых свойств бетонной смеси и бетона  $Y$  (удобоукладываемость бетонной смеси, прочность, стоимость бетона и т.д.) от исследуемых переменных факторов  $X_1, X_2, \dots, X_n$  (водоцементное отношение, расход цемента и добавок, количество заполнителей и т.п.) может быть представлена в виде полинома:

$$Y = r_0 + r_1 X_1 + r_2 X_2 + \dots + r_n X_n + r_{n+1} X_{n+1} + \dots + r_q X_q,$$

где  $X_n, X_{n+1}, X_q$  – комбинации  $n$  факторов вида  $X_l^a, X_l^a \cdot X_p^b$  и т.д. ( $1 \leq l, p \leq n$ ;  $a, b$  – целые числа);

$r_0, r_1, r_q$  – коэффициенты регрессии.

Решение задачи заключается в нахождении вектора R из матричного уравнения

$$R = (X^T Z X)^{-1} X^T Z Y \quad (1.34)$$

$$X = \begin{vmatrix} 1X_1 & \dots & X_j & \dots & X_n & \dots & X_q \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 1X & \dots & X & \dots & X & \dots & X \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 1X & \dots & X & \dots & X & \dots & X \end{vmatrix}; \quad Z = \begin{vmatrix} Z & 0 & 0 \\ 0 & Z & 0 \\ 0 & 0 & Z_m \end{vmatrix}; \quad Y = \begin{vmatrix} \bar{Y}_1 \\ \bar{Y}_i \\ \bar{Y}_m \end{vmatrix}; \quad r = \begin{vmatrix} r_0 \\ r_1 \\ r_n \\ r_q \end{vmatrix},$$

где  $X[n \cdot (q+1)]$  – матрица планирования;

$X^T$  – матрица, транспонированная к  $X$ ;

$(X^T Z X)^{-1}$  – матрица, обратная матрице  $X^T Z X$ .

Диагональная матрица весов  $Z$  задается количеством дублей  $Z_i$  в  $i$ -м опыте ( $i=1, \dots, m$ ). Дублирование опытов производится для повышения точности.

Элементами  $\bar{Y}_i$  ( $i=1, \dots, m$ ) вектора наблюдений  $Y$  являются средние значения определяемого свойства в  $i$ -м опыте:

$$\bar{Y}_i = \frac{\sum_{k=1}^{z_i} Y_{i,k}}{Z_i}. \quad (1.35)$$

Полученную модель следует проверить на адекватность экспериментальным данным.

Эмпирическая дисперсия, характеризующая неточность модели, определяется по формуле

$$S_{aq}^2 = \frac{\sum_{i=1}^m Z_i (\bar{Y}_i - \hat{Y}_{ij})^2}{m - (q + 1)}, \quad (1.36)$$

где  $\hat{Y}_i$  – значение  $Y_i$ , полученное по уравнению модели.

Для проверки гипотезы адекватности нужно вычислить дисперсию, характеризующую неточность опытов:

$$S_e^2 = \frac{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^{z_i} (\bar{Y}_i - \hat{Y}_{ij})^2}{\sum_{i=1}^m Z_i - m}. \quad (1.37)$$

Проверка гипотезы адекватности производится в следующей последовательности:

1. Вычисляется дисперсное отношение  $F = S_{aq}^2 / S_e^2$ .
2. Принимается уровень значимости  $\alpha$  (обычно 0,05 или 0,01) или степень надежности  $p = 1 - \alpha$ .
3. По таблице  $F$ -распределения при принятом  $\alpha$  и числе степеней свободы

$$v_1 = m - (q + 1) \text{ и } v_2 = \sum_{i=1}^m Z_i - m \quad (1.38)$$

определяется значение критерия Фишера  $F_{кр}$ , соответствующее условию

$$P(F > F_{кр}) = \alpha \text{ или } P(F \leq F_{кр}) = 1 - \alpha. \quad (1.39)$$

4. Если вычисленное отношение  $F = S_{aq}^2 / S_e^2$  меньше или равно  $F_{кр}$ , то гипотеза адекватности принимается. В противном случае нужно строить новую модель.

Если гипотеза адекватности не отвергается, то для найденных коэффициентов модели можно построить доверительные интервалы вида:

$$r_l = t_{\alpha/2} S_{rl}, \quad l = 0, 1, \dots, q, \quad (1.40)$$

где  $S_{rl} = S_{\bar{Y}_i} \sqrt{(X^T X)_l^{-1}}$  для  $l = 1, \dots, q$ ;

$$S_{r_0} = S_{\bar{Y}_i} \sqrt{(X^T X)_l^{-1} + \sum_{l=1}^q \bar{X}_l^2} \cdot S_{rl}, \quad (1.41)$$

где  $\bar{X}_l$  – среднее значение  $l$ -й переменной;

$t_{\alpha/2}$  – значение критерия Стьюдента (находится по таблице  $t$ -распределения при числе степеней свободы  $v = m - (q + 1)$  для выбранного уровня зависимости  $\alpha$ ).

В качестве  $S_{\bar{Y}_i}$  можно принять  $\sqrt{S_{aq}^2}$ , если опыты не дублировались, или  $\sqrt{S_e^2 / Z}$ , если в каждом опыте было  $Z$  дублей.

Аналогично можно построить доверительные интервалы для значений  $\hat{Y}_i (i = 1, \dots, m)$ , высчитанных по уравнению модели:

$$\hat{Y}_i = t_{\alpha/2} S_{\hat{Y}_i}, \quad (1.42)$$

где  $S_{\hat{Y}_i} = S_{\bar{Y}_i} \sqrt{X_i (X^T X)^{-1} X_i^T}$ .

#### 4. Анализ математических моделей и построение графических зависимостей.

После построения математической модели возникает необходимость оценки влияния различных факторов  $X_j$  ( $j = 1, 2, \dots, n$ ) на значение  $Y$ .

Если модель представлена полиномом первого порядка, то качественную оценку сделать просто: влияние  $X_j$  на  $Y$  учитывается коэффициентом  $r_j$ : при  $r_j > 0$  значение  $Y$  увеличивается с повышением  $X_j$ ; при  $r_j < 0$  – оно уменьшается. Если модель является полиномом высокого порядка, то далее подобную качественную оценку сделать затруднительно.

Достаточно хорошую информацию о влиянии факторов  $X_j$  на  $Y$  дают изолинии  $Y = \text{const}$ , построенные в осях  $X_{j1}, X_{j2}$  при фиксированных значениях отдельных факторов  $X_j$ . Построение изолиний (в виде графиков и таблиц) производится с помощью соответствующей программы.

Программа ориентирована на построение моделей второго порядка:

$$Y = r_0 + r_1 X_1 + r_2 X_2 + r_3 X_3 + r_4 X_1^2 + r_5 X_2^2 + r_6 X_3^2 + r_7 X_1 X_2 + r_8 X_1 X_3 + r_9 X_2 X_3. \quad (1.43)$$

#### Пример оптимизации состава тяжелого бетона

*Постановка задачи.* Исследовать факторы, влияющие на свойства тяжелого бетона, и подобрать оптимальный состав бетона прочностью 40 МПа из бетонной смеси жесткостью 30-35 с.

Для проведения экспериментов в качестве компонентов бетонной смеси используются следующие материалы:

➤ портландцемент марки ПЦ500-ДО: нормальная плотность цемента – 26 %; сроки схватывания – 8 ч 30 мин; кажущаяся плотность – 3,1 г/см<sup>3</sup>; удовлетворяет требованиям ГОСТ 10178–85;

➤ известняковый щебень марки 1000: насыпная плотность – 1350 кг/м<sup>3</sup>; межзерновая пустотность – 40 %; используемая фракция – 5-20 мм; удовлетворяет требованиям ГОСТ 10268–80;

➤ кварцевый песок: средняя плотность – 1400 кг/м<sup>3</sup>; модуль крупности – 2,0; удовлетворяет требованиям ГОСТ 8736–95;

➤ вода из промышленного водопровода, удовлетворяющая требованиям ГОСТ 23732–79.

*Выбор факторов.* Известно, что на удобоукладываемость бетонной смеси оказывают существенное влияние водоцементное отношение, содержание песка в смеси заполнителей и расход воды. В свою очередь, состав бетонной смеси определяет прочность бетона.

В связи с этим в качестве варьируемых параметров следует принять факторы:

$X_1$  – водоцементное отношение В/Ц;

$X_2$  – содержание песка в смеси заполнителей  $\frac{\text{П}}{\text{П+Щ}}$ ;

$X_3$  – расход воды В, л/м<sup>3</sup>.

При проведении опытов все факторы варьировались на трех уровнях, значения их принимались с учетом наиболее часто встречающихся технологических условий производства (табл.1.42).

Т а б л и ц а 1 . 4 2

Условия проведения эксперимента

Уровень варьирования	Кодовое значение факторов	Физическое значение факторов		
		В/Ц	$\frac{\text{П}}{\text{П+Щ}}$	В, л/м <sup>3</sup>
Верхний	+1	0,48	0,57	188
Нижний	-1	0,32	0,37	168
Основной	0	0,40	0,47	178

*Составление плана эксперимента.* Предполагаем, что зависимость удобоукладываемости бетонной смеси и прочности бетона от исследуемых факторов представлена в виде полинома второй степени:

$$Y = r_0 + r_1X_1 + r_2X_2 + r_3X_3 + r_4X_1^2 + r_5X_2^2 + r_6X_3^2. \quad (1.44)$$

Коэффициенты в этом уравнении определяются с помощью полного факторного центрального композиционного планирования при  $\alpha=1, \beta=0$ . Матрица такого планирования и результаты эксперимента приведены в табл.1.43.

Показатели жесткости и прочности взяты как средние по трем испытаниям.

*Реализация плана и построение математических моделей.* В соответствии с планом проведения эксперимента для каждого опыта рассчитывается состав бетона. Каждая бригада определяет расход материалов на 1 м<sup>3</sup> бетонной смеси для каждого конкретного номера опыта, принимая постоянными заданные величины водоцементного отношения, расхода воды и содержания песка в смеси заполнителей. Например, для первого опыта: В/Ц=0,32, В=168 л. Вычисляем расход цемента по формуле Ц=В : В/Ц=168 : 0,32 = 525 кг.

Принимая, что средняя плотность бетона в сухом состоянии составляет 2400 кг/м<sup>3</sup>, находим общий расход заполнителей:

$$З=2400 - 1,15Ц = 2400 - 1,14 \cdot 525 = 1796.$$

Известно, что содержание песка в смеси заполнителей для первого опыта составляет  $\frac{\text{П}}{\text{П+Щ}}=0,37$ . Из этого выражения определяем весовое содержание песка и щебня:

$$\text{П} = 0,37 (\text{П+Щ}) = 0,37 \cdot 1796 = 665 \text{ кг};$$

$$\text{Щ} = \frac{665 - 246}{0,37} = 1132 \text{ кг.}$$

Итого, расход материалов на 1 м<sup>3</sup> бетонной смеси для первого опыта составит:

цемента – 525 кг,  
 песка – 665 кг,  
 щебня – 1132 кг,  
 воды – 168 л.

Т а б л и ц а 1 . 4 3

П л а н п р о в е д е н и я э к с п е р и м е н т а

Номер опыта	Матрица планирования										Жесткость бетонной смеси, с	Прочность бетона, МПа
	в кодовом выражении							в натуральном выражении				
	X <sub>0</sub>	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>	X <sub>1</sub> <sup>2</sup>	X <sub>2</sub> <sup>2</sup>	X <sub>3</sub> <sup>2</sup>	В/Ц	$\frac{\text{П}}{\text{П+Щ}}$	В		
1	+1	-1	-1	-1	+1	+1	+1	0,32	0,37	168	60,1	48,2
2	+1	+1	-1	-1	+1	+1	+1	0,48	0,37	168	28,2	44,3
3	+1	-1	+1	-1	+1	+1	+1	0,32	0,57	168	69,2	50,2
4	+1	+1	+1	+1	-1	+1	+1	0,48	0,57	168	36,7	47,0
5	+1	-1	-1	+1	+1	+1	+1	0,32	0,37	188	29,5	40,5
6	+1	+1	-1	+1	+1	+1	+1	0,48	0,37	188	14,9	38,0
7	+1	-1	+1	+1	+1	+1	+1	0,32	0,57	188	38,0	36,4
8	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	0,48	0,57	188	20,0	35,4
9	+1	-1	0	0	+1	0	0	0,32	0,47	178	59,5	38,5
10	+1	+1	0	0	+1	0	0	0,48	0,47	178	15,0	35,6
11	+1	0	-1	0	0	+1	0	0,40	0,37	178	35,0	44,1
12	+1	0	+1	0	0	+1	0	0,40	0,57	178	44,0	48,8
13	+1	0	0	-1	0	0	+1	0,40	0,47	168	48,0	57,2
14	+1	0	0	+1	0	0	+1	0,40	0,47	188	10,0	36,1
15	+1	0	0	0	0	0	0	0,40	0,47	178	22,5	40,1

Аналогично производим расчет состава бетона для других опытов в соответствии с планом проведения эксперимента. Данные расхода материалов для приготовления 1 м<sup>3</sup> бетонной смеси и на рабочий замес заносим в табл.1.44.

Т а б л и ц а 1 . 4 4

## Расход материалов для приготовления бетонной смеси

Номер опыта	Расход материалов на 1м <sup>3</sup> бетонной смеси				Расход материалов на замес (4 литра)			
	цемент, кг	щебень, кг	песок, кг	вода, л	цемент, кг	щебень, кг	песок, кг	вода, л
1	525	1132	665	168	2,10	4,53	2,66	0,67
2	350	1259	739	168	1,40	5,04	2,97	0,67
3	325	772	1023	168	2,10	3,09	4,09	0,67
4	350	858	1138	168	1,40	3,43	4,55	0,67
5	588	1086	638	188	2,35	3,34	2,55	0,75
6	392	1227	721	188	1,57	4,91	2,88	0,75
7	588	742	983	188	2,35	2,97	3,93	0,75
8	392	837	1110	188	1,57	3,35	4,44	0,75
9	556	934	828	178	2,22	3,74	3,31	0,71
10	371	1049	927	178	1,48	4,19	3,71	0,71
11	445	1192	699	178	1,78	4,78	2,79	0,71
12	445	812	1076	178	1,78	3,25	4,30	0,71
13	420	1017	901	168	1,68	4,07	3,60	0,67
14	470	987	874	188	1,88	3,95	3,49	0,75
15	445	1000	887	178	1,78	4,00	3,55	0,71

Обработка экспериментальных данных производится на ЭВМ. Полученные математические зависимости жесткости бетонной смеси и прочности бетона от исследуемых переменных факторов имеют следующий вид:

$$Ж = 30,1778 - 14,14999X_1 + 4,02000X_2 - 12,97999X_3 + 4,22777X_1^2 + 6,47777X_2^2 - 4,02222X_3^2. \quad (1.45)$$

$$R_6 = 4274888 - 1,34999X_1 + 0,26999X_2 - 6,04999X_3 - 6,36111X_1^2 + 3,03888X_2^2 + 3,23888X_3^2. \quad (1.46)$$

Проверка полученных моделей по критерию Фишера подтвердила их адекватность.

Для модели жесткости  $Ж=f(X_1, X_2, X_3)$  гипотеза об адекватности не отвергается, так как  $F = 1,983 < F_{кр} = 2,100$ .

Для модели прочности  $R_6 = f(X_1, X_2, X_3)$  гипотеза об адекватности не отвергается, так как  $F = 1,900 < F_{кр} = 2,100$ .

Зависимости жесткости бетонной смеси от изменения водоцементного отношения, содержания песка в смеси заполнителей и воды представлены графически на рис. 1.4, 1.5 и 1.6 и отличаются координатой  $X_2 = \frac{\Pi}{\Pi+\Щ}$ .

Аналогичные зависимости прочности бетона от исследуемых факторов представлены в виде изолиний прочности на рис. 1.7, 1.8 и 1.9. Построение изолиний производится с помощью программы «Изолиния». По полученным изолиниям можно подобрать состав бетона необходимой прочности с различной жесткостью бетонной смеси.

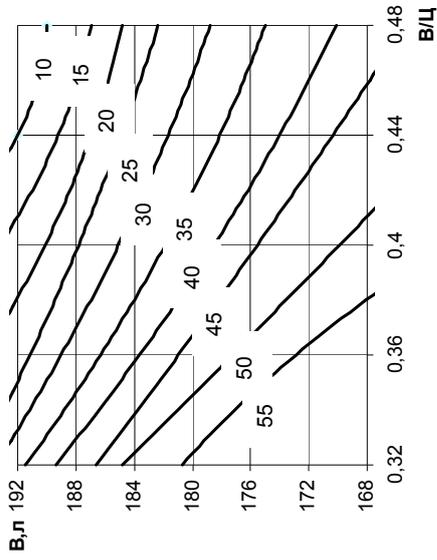


Рис. 1.4. Изолинии изменения жесткости бетонной смеси при  $X_2 = 0,37$

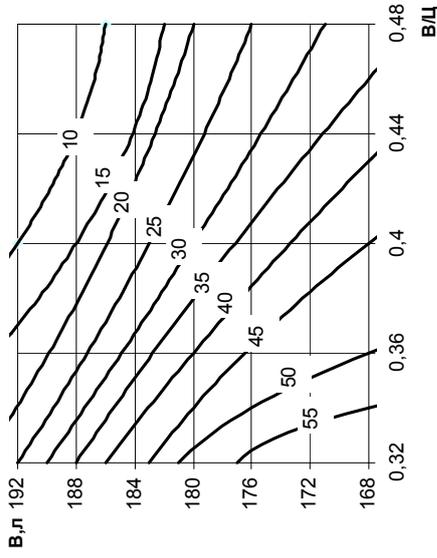


Рис. 1.5. Изолинии изменения жесткости бетонной смеси при  $X_2 = 0,47$

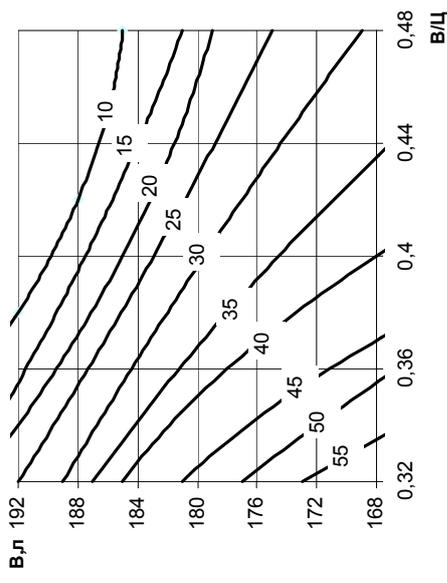


Рис. 1.6. Изолинии изменения жесткости бетонной смеси при  $X_2 = 0,57$

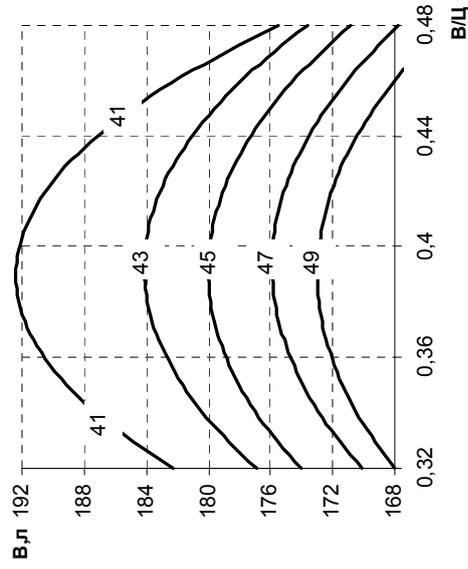


Рис. 1.7. Изолинии изменения прочности бетона при  $X_2 = 0,37$

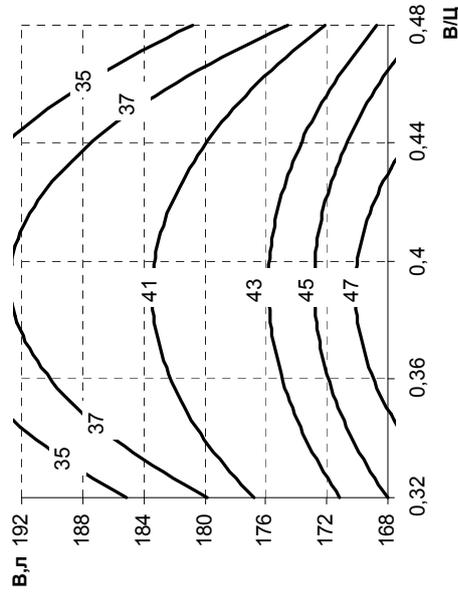


Рис. 1.8. Изолинии изменения прочности бетона при  $X_2 = 0,47$

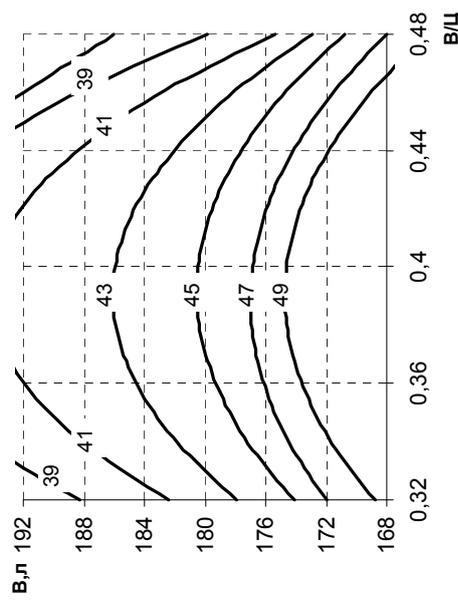


Рис. 1.9. Изолинии изменения прочности бетона при  $X_2 = 0,57$

В качестве примера в соответствии с заданием произведем подбор состава бетона марки 400 с жесткостью бетонной смеси в пределах 30-35 с, используя полученные модели  $J=f(X_1, X_2, X_3)$  и  $R_6=f(X_1, X_2, X_3)$ .

Принимаем условие, что  $X_2 = 0,47$ . Производим поиск необходимых изолиний жесткости и прочности. Перенеся найденные изолинии на отдельный график (рис. 1.10), определяем область, удовлетворяющую заданному условию. Так, любая точка внутри четырехугольника АБВГ соответствует составу бетонной смеси с жесткостью 30-35 с и бетону с прочностью на сжатие в пределах 39-41 МПа.

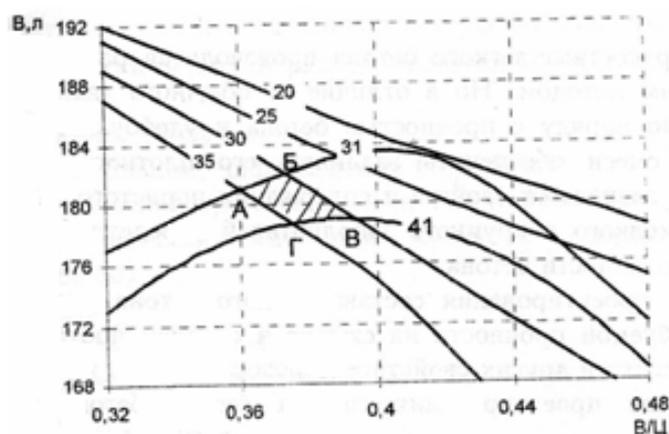


Рис. 1.10. Изолинии изменения жесткости бетонной смеси и прочности бетона для определения заданного состава бетона

Таким образом, с помощью метода математического планирования эксперимента удалось определить состав бетона марки 400 жесткостью 35-40 с. Аналогичным образом можно определить состав бетонов любых других марок с различной жесткостью смесей.

### 1.3. Проектирование составов высокопрочных песчаных (мелкозернистых) самоуплотняющихся бетонов нового поколения расчетно-экспериментальным способом

Производство самоуплотняющихся высокопрочных бетонов с суперпластификаторами связано с преодолением трех противоречивых факторов – получением высокой текучести бетонной смеси с расплывом конуса 55-70 см, исключением расслаиваемости ее и достижением высокой прочности бетона – 100-150 МПа и более.

Оптимальная реология самоуплотняющихся бетонных смесей должна обеспечивать расплыв «обратного» конуса не менее 55-60 см. Оценим теоретически, какова должна быть осадка бетонной смеси при различных осадках конуса, превышающих 20 см. Расчет расплыва конуса по его осадке осуществим исходя из объема сферического сегмента  $V$ , формируемого

растекающейся бетонной смесью с малым пределом текучести под действием собственного веса.

Объем сферического сегмента выразим через исходную высоту обычного стандартного конуса (Н), осадку конуса (ОК) и расплыв конуса (Д) бетонной смеси:

$$V = \frac{\pi(H - ОК)}{6} \left[ 3 \left( \frac{Д}{2} \right)^2 + (H - ОК)^2 \right] = \frac{\pi(H - ОК)}{6} [3R^2 + (H - ОК)^2], \quad (1.47)$$

где  $R$  – радиус расплыва конуса бетонной смеси.

Из выражения (1.47) находим диаметр расплыва конуса:

$$Д = \sqrt{\frac{24 \cdot V - 4\pi \cdot (H - ОК)^3}{3 \cdot \pi \cdot (H - ОК)}}. \quad (1.48)$$

При геометрических размерах обычного стандартного конуса  $H=30$  см,  $Д_n = 20,0$  см,  $d_b = 10,0$  см и объеме конуса  $5495$  см<sup>3</sup> выражение (1.48) упрощается:

$$Д = \sqrt{\frac{131880 - 12,56 \cdot (30 - ОК)^2}{9,42 \cdot (30 - ОК)}}. \quad (3)$$

Расчетами получены значения расплыва конуса бетонных смесей при различных осадках их (табл.1.45).

Т а б л и ц а 1 . 4 5

ОК, см	20,0	23,0	24,0	25,0	26,0	26,5	27,0	28,0
Расплыв, см	35,6	44,0	47,8	52,6	59,0	63,0	68,2	83,6

Как следует из табл.1.45, бетонные смеси с ОК=20-28 см не являются самоуплотняющимися, способными саморастекаться без вибропобуждения. Истинно самарастекающимися смесями являются смеси с осадкой конуса 26-27 см. Для таких смесей непригоден щебень фракции 20-40 мм. Наилучшие результаты по реологии обеспечивает щебень фракций 3-10÷3-16 мм.

Как указывает профессор Г.В. Несветаев [1], в Евростандарте EN 206-1 предусматривается 6 классов подвижных смесей с диаметром расплыва конуса бетонных смесей от 34,0 см до 630 мм и более. В правилах EG SCC (Self compacting concrete) для самоуплотняющихся бетонов указывается 3 класса SCC по текучести с разными диаметрами расплыва: SF-1 (550-650 мм); CF-2 (660-750 мм) и SF-3 (760-850 мм). Если следовать расчету, то осадка стандартного конуса должна быть в пределах 25,5-28,0 см. По существу, максимальная осадка смеси ОК=28 см ограничивается наибольшими

размерами зерен щебня и возможна, как показывают эксперименты, при использовании щебня фр. 3-8 мм.

Высокая текучесть бетонной смеси требует создания не только специфической структуры смеси, но и особой топологии. Традиционная структура бетонной смеси предполагает компактную, наиболее плотную упаковку зерен щебня нескольких фракций. Для этого требуется заполнить вмещающие пустоты в крупной фракции щебня средними зернами второй фракции, а во вмещающие пустоты, образованные совокупностью зерен двух фракций, разместить зерна мелкой фракции щебня (принцип непрерывной гранулометрии). Те же принципы заложены в гранулометрию песка для тяжелых бетонов.

С позиции реологии такие, плотноупакованные зернистыми заполнителями смеси имеют высокое трение при течении в стесненных условиях и не превращаются при наличии минимума воды в гравитационно-растекающиеся системы. Реологической матрицей для них, обеспечивающей свойства упруговязкого пластического тела, является цементное тесто, увеличение доли которого для обеспечения текучести связано с повышением расхода цемента и ухудшением экономики производства бетона.

Использование эффективных пластификаторов и гиперпластификаторов позволяет увеличить текучесть цементного теста, сократить расход воды и повысить прочность бетона на малопластичных бетонных смесях с 50 до 70-90 МПа. При получении самоуплотняющихся бетонных смесей из-за недостатка реологической матрицы цементного теста прочность бетона понижается вследствие необходимости восполнения объема реологической матрицы водой.

Добавление микрокремнеземов и зол ТЭЦ с высокой пуццоланической активностью в количестве 10-15 % позволяет несколько увеличить объем реологической матрицы с равнообъемным уменьшением объема зернистых и кусковых заполнителей, что и улучшает перемещение их при течении. Прочность при этом возрастает не столько за счет повышения водоредуцирующего эффекта, сколько вследствие образования дополнительного количества цементирующих гидросиликатов. Комбинация суперпластификаторов и микрокремнезема позволила получать из пластичных смесей бетоны с прочностью 90-110 МПа при расходах цемента 450-500 кг и микрокремнезема – 30-60 кг.

Рациональная реология самоуплотняющихся бетонных смесей высокой текучести и высокая прочность бетонов марок 1000-2000 обеспечиваются добавлением к цементу не только микрокремнезема, но и 50-70 % каменной муки.

При этом не всякие горные породы в виде каменной муки способны обеспечивать более высокую текучесть в суспензии с СП по сравнению с цементными суспензиями. Для оценки такой способности был введен тер-

мин «реологически активная каменная мука в суспензии с суперпластификатором». Оценка реологической активности муки осуществляется по водоредуцирующему действию суперпластификатора. Водоредуцирующее действие (водоредуцирующий индекс  $V_n$ ) определяется по формуле

$$V_n = V_n/V_n, \quad (1.50)$$

где  $V_n$  – водосодержание непластифицированной суспензии для обеспечения заданного расплыва ее из стандартного конуса (цилиндра);  
 $V_n$  – водосодержание пластифицированной суспензии при том же расплыве суспензии из того же прибора.

В качестве стандартного конуса истечения принимается конус от встряхивающего столика по ГОСТ 310.4–76 «Цементы. Методы испытаний». Применение стандартного конуса, в отличие от мини-конуса НИИЖБа, использовавшихся нами ранее мини-цилиндров и других приспособлений целесообразно в связи с тем, что аналогичный конус приводится в Евростандарте EN 196 под названием «конус Хагерманна».

Основные 22 принципа получения высокопрочных самоуплотняющихся бетонов с суперпластификаторами, микрокремнеземами и каменной мукой были сформулированы ранее [2]. Приведем лишь четыре основные особенности, касающиеся структуры самоуплотняющихся бетонных смесей:

- во-первых, они должны быть малощебеночными и малопесчаными, что диктует увеличивать в их объеме содержание водно-дисперсной матрицы;
- во-вторых, в матрице должны практически отсутствовать капиллярные и воздушные поры, вследствие чего она становится очень плотной и прочной;
- в-третьих, в структуре цементной дисперсной матрицы должны обязательно содержаться микрочастицы дисперсной горной породы, и поэтому высокопрочные реакционно-порошковые, а также щебеночные бетоны будущего должны обязательно выпускаться с каменной мукой из беспористых и прочных горных пород;
- в-четвертых, в структуре цементной матрицы должны обязательно содержаться наночастицы (верхний масштабный наноуровень) плотных пуццоланических веществ, связывающих гидролизную известь портланд-цемента в тоберморит  $C_5S_6H_5$  или, в идеальном случае, более прочный ксонотлит  $C_4S_5H_4$ .

В этой связи высокопрочные бетоны должны быть обязательно многокомпонентными, минимально – 7-компонентными, что позволит реализовать в них научные положения реологии многокомпонентных дисперсных систем, более полно связанных с физико-химией, с электрокинетическими явлениями, с поверхностными зарядами частиц различного минералогического состава и с перезарядкой поверхности кислых пород под действием гидролизной извести клинкера, с химией твердения цемента

и механизмами гидратации его, с механикой разрушения хрупких материалов и дисперсно-армированных композиционных материалов.

Таким образом, технология производства высокопрочных дисперсно-армированных бетонов нового поколения с супер- и гиперпластификаторами, каменной мукой и плотными пуццоланами, при использовании которой улучшаются прочностные свойства бетонов с малым содержанием цемента, в течение последних 20 лет является более наукоемкой нежели традиционная. Небольшие улучшения, которыми пестрят многие научные статьи, не касаются реализации гиперэкономики строительства из высокопрочного и сверхвысокопрочного железобетона. Строительство из высокопрочного бетона приводит к уменьшению его объемов в конструкциях и конструктивных элементах в 3-6 раз. А вместе с тем в то же число раз сокращаются все расходы компонентов бетона, транспортные перевозки и значительно снижается масса зданий и сооружений.

В настоящее время отсутствуют подходы к расчету составов новых самоуплотняющихся бетонов, кроме рекомендаций, касающихся рецептуры обычных самоуплотняющихся бетонов, предложенных профессором Окамурой:

- насыпной объем заполнителя крупной фракции должен быть не более 50 % объема бетона;
- объемная часть песка в растворе должна составлять 40 %.

При этом остается неизменным принцип равенства суммы абсолютных объемов бетонной смеси 1000 литрам. Однако для высокопрочных, самоуплотняющихся бетонов классов В50-В60 эти принципы расчета состава не могут быть использованы.

Исходя из анализа состава и структуры лучших высокопрочных бетонов предложены критерии избытка  $I_{цд}^п$  абсолютного объема цементно-дисперсной матрицы над объемом песка и критерии избытка  $I_{цдп}^щ$  абсолютного объема цементно-дисперсно-песчаной реологической матрицы над абсолютным объемом щебня [1]:

$$I_{цд}^п = \frac{V_{д}^п}{V_{п}} = \frac{V_{ц} + V_{км} + V_{мк} + V_{в}}{V_{п}}, \quad (1.51)$$

$$I_{цдп}^щ = \frac{V_{цдп}^щ}{V_{щ}} = \frac{V_{ц} + V_{км} + V_{мк} + V_{п} + V_{в}}{V_{щ}}, \quad (1.52)$$

где  $V_{ц}, V_{км}, V_{мк}, V_{п}, V_{щ}, V_{в}$  – абсолютные объемы, соответственно, цемента, каменной муки, микрокремнезема, песка, щебня и воды.

В связи с тем что значения абсолютной плотности кварцевого песка в земной коре мало различаются и находятся в пределах 2,6-2,7 г/см<sup>3</sup>, для расчета состава бетона целесообразно использовать критерий  $I_{цдп}^{щ}$ .

Принимая объем бетонной смеси равным  $V_{бс}$ , вычисляем объем щебня:

$$V_{щ} = V_{бс} - (V_{ц} + V_{км} + V_{мк} + V_{п} + B). \quad (1.53)$$

Подставим выражение (1.53) в (1.52):

$$I_{цдп}^{щ} \cdot V_{бс} - I_{цдп}^{щ} (V_{ц} + V_{км} + V_{мк} + V_{п} + B) = V_{ц} + V_{км} + V_{мк} + V_{п} + B. \quad (1.54)$$

Отсюда получим:

$$V_{п} = \frac{I_{цдп}^{щ} \cdot V_{бс} - (I_{цдп}^{щ} + 1) (V_{ц} + V_{км} + V_{мк} + B)}{I_{цдп}^{щ} + 1}. \quad (1.55)$$

Если вместо объема щебня из (1.53) определить объем песка и подставить его в выражение (1.52), то получим:

$$V_{щ} = \frac{I_{цд}^{п} \cdot V_{бс} - (I_{цд}^{п} + 1) (V_{ц} + V_{км} + V_{мк} + B)}{I_{цд}^{п}}. \quad (1.56)$$

В связи с тем что состав бетона задается, как правило, по массе, формулы с учетом плотностей компонентов принимают следующий вид:

$$V_{п} = \frac{I_{цдп}^{щ} \cdot V_{бс} - (I_{цдп}^{щ} + 1) (Ц / \rho_{ц} + КМ / \rho_{км} + МК / \rho_{мк} + B)}{I_{цдп}^{щ} + 1}, \quad (1.57)$$

$$V_{щ} = \frac{I_{цд}^{п} \cdot V_{бс} - (I_{цд}^{п} + 1) (Ц / \rho_{ц} + КМ / \rho_{км} + МК / \rho_{мк} + B)}{I_{цд}^{п}}. \quad (1.58)$$

В высокопрочных и особовысокопрочных бетонах содержание каменной муки может составлять от 30 до 60 %, а содержание микрокремнезема – от 15 до 30 % от массы цемента. При этом в пропариваемых бетонах содержание МК может иметь верхний предел, особенно, если каменная мука не обладает реакционно-химической активностью с гидролизной известью портландцемента. Таким образом, содержание КМ и МК задается долей их  $\alpha_{км}$  и  $\alpha_{мк}$  от массы портландцемента, и, тогда в формулах (1.57) и (1.58)  $КМ = \alpha_{км} \cdot Ц$  и  $МК = \alpha_{мк} \cdot Ц$ .

Реологию гравитационного течения с самоуплотнением смесей без расслоения обеспечивает оптимальное водосодержание. Для ВПБ и ОВПБ водотвердое отношение, т.е. отношение массы воды к сумме сухих компонентов, составляет 0,07-0,08. Сумма сухих компонентов  $M_c$  обычно находится в пределах 2250-2350 кг, в зависимости от плотности крупного

заполнителя, которая колеблется от 2,6 до 3,1 г/см<sup>3</sup>. Таким образом, содержание воды находится в пределах от 150 до 180 л.

Принимая объем бетона 1000 л без учета объема вовлеченного воздуха, окончательно можно записать:

$$V_{\Pi} = \frac{1000 \cdot I_{\text{цдп}}^{\text{ш}} - (I_{\text{цдп}}^{\text{ш}} + 1) \left( \text{Ц} / \rho_{\text{ц}} + \text{КМ} / \rho_{\text{км}} + \text{МК} / \rho_{\text{мк}} + M_{\text{с}} \cdot \frac{B}{T} \right)}{I_{\text{цдп}}^{\text{ш}} + 1}, \quad (1.59)$$

$$V_{\text{щ}} = \frac{1000 \cdot I_{\text{цд}}^{\text{п}} - (I_{\text{цд}}^{\text{п}} + 1) \left( \text{Ц} / \rho_{\text{ц}} + \text{КМ} / \rho_{\text{км}} + \text{МК} / \rho_{\text{мк}} + M_{\text{с}} \cdot \frac{B}{T} \right)}{I_{\text{цд}}^{\text{п}}}. \quad (1.60)$$

Если для расчета состава используется формула (1.60), то расход песка определится следующим образом:

$$V_{\Pi} = 1000 - V_{\text{щ}} - V_{\text{ц}} - V_{\text{МК}} - V_{\text{КМ}} - B. \quad (1.61)$$

Корректнее объем бетона принимать равным 980 л, учитывая, что редко в самоуплотняющихся бетонах содержание вовлеченного воздуха составляет менее 1,5 %.

### Пример расчета состава самоуплотняющегося бетона

Расход портландцемента марки М500 составляет 630 кг на 1 м<sup>3</sup> бетона при  $I_{\text{цд}}^{\text{п}} = 3,3$ . Расходы компонентов дисперсных наполнителей: КМ = 0,4Ц; МК = 0,2Ц. Водотвердое отношение 0,07. Масса сухих компонентов  $M_{\text{с}} = 2300$  кг. Тогда содержание воды будет 161 л. Плотности компонентов, г/см<sup>3</sup>:  $\rho_{\text{ц}} = 3,1$ ;  $\rho_{\text{км}} = 2,7$ ;  $\rho_{\text{мк}} = 2,3$ ;  $\rho_{\text{п}} = 2,6$ ;  $\rho_{\text{щ}} = 2,7$ .

Подставим расходы компонентов в формулу (1.60):

$$\begin{aligned} V_{\text{щ}} &= \frac{1000 \cdot 3,3 - 4,3 \cdot (630 / 3,1 + 0,4 \cdot \text{Ц} / 2,7 + 0,2 \cdot \text{Ц} / 2,3 + 161)}{3,3} = \\ &= \frac{1000 \cdot 3,3 - 4,3 \cdot (203,2 + 93,3 + 54,8 + 161)}{3,3} = 332,7 \text{ л}, \end{aligned}$$

$$V_{\Pi} = 1000 - 332,7 - 203,2 - 93,3 - 54,8 - 161 = 155 \text{ л}.$$

Расходы компонентов по массе, кг:

$$\text{Ц} = 630; \text{КМ} = 252; \text{МК} = 126; \text{Щ} = 898; \text{П} = 418; B = 161$$

$$\text{Значения } I_{\text{цд}}^{\text{п}} = \frac{512,3}{155} = 3,3; \quad I_{\text{цдп}}^{\text{ш}} = \frac{512,3 + 155}{332,7} = 2,0.$$

Масса сухих компонентов  $M_{\text{с}} = 2324$  кг.

## 1.4. Основные положения технологии легких бетонов

Накопленный опыт производства изделий и конструкций из легких бетонов свидетельствует о том, что технология их изготовления незначительно отличается от технологии изготовления изделий и конструкций из обычных тяжелых бетонов. Практически все технологические операции можно выполнять на одном и том же оборудовании и по примерно одинаковому технологическому режиму. Тем не менее процессы приготовления бетонной смеси, формирование изделий из них и режимы тепловой обработки имеют свою специфику.

Важным моментом в технологии легких бетонов являются свойства бетонной смеси. Поэтому изложение особенностей технологии начнем со знакомства с методами оценки и свойствами легкобетонных смесей.

### Свойства легкобетонной смеси

Бетонные смеси разделяют по степени готовности к употреблению и по показателю удобоукладываемости. По степени готовности к употреблению различают готовые к употреблению (БСГ) и сухие (БСС) бетонные смеси, по показателю удобоукладываемости – сверхжесткие (СЖ), жесткие (Ж) и подвижные (П) бетонные смеси. По структуре затвердевшего бетона – смеси для бетонов плотной структуры, смеси для бетонов поризованной структуры и смеси для бетонов крупнопористой структуры. При изготовлении изделий из легкого бетона чаще используют жесткие и подвижные бетонные смеси (табл. 1.46).

Т а б л и ц а 1 . 4 6

Классификация легкобетонных смесей по удобоукладываемости

Марка по удобоукладываемости легкобетонных смесей	Норма удобоукладываемости по показателю		
	жесткости, с	Подвижности, см	
		Осадка конуса	Распływ конуса
Жесткие смеси			
Ж4	31-60	-	-
Ж3	21-30	-	-
Ж2	11-20	-	-
Ж1	5-10	-	-
Подвижные смеси			
П1	4 и менее	1-4	-
П2	-	5-9	-
П3	-	10-15	-
П4	-	16-20	26-30
П5	-	21 и более	31 и более

**Удобоукладываемость** относится к важнейшим свойствам бетонной смеси. Она характеризует способность бетонной смеси заполнять форму при заданном способе уплотнения и образовывать в результате уплотнения плотную, однородную массу.

*Подвижность* – способность смеси расплываться под действием собственной массы – измеряют с помощью *стандартного конуса*. Он представляет собой усеченный, открытый с обеих сторон металлический полый конус из листовой стали толщиной 1 мм. Высота конуса 300 мм, диаметр нижнего основания 200 мм, верхнего 100 мм. Определения выполняют в следующей последовательности. Конус устанавливают на поддон и заполняют его бетонной смесью, уплотняя смесь штыкованием. После заполнения формы и удаления излишка смеси форму снимают, поднимая ее медленно и строго вертикально вверх за ручки. Подвижная бетонная смесь, освобожденная от формы, дает осадку. Мерой подвижности смеси служит величина осадки конуса, которую измеряют сразу же после снятия формы. В зависимости от осадки конуса различают малоподвижные (пластичные) (1-4 см), подвижные (5-10 см), очень подвижные (11-20 см) и литые (более 21 см) бетонные смеси.

*Жесткость* – способность смеси расплываться под действием механических воздействий – вибрации. Для определения жесткости используют *стандартный вискозиметр*. Прибор состоит из цилиндрического сосуда высотой 200 мм с внутренним диаметром 240 мм, на котором закреплено устройство для измерения осадки бетонной смеси в виде направляющего штатива, штанги и металлического диска с отверстиями. Прибор устанавливают на виброплощадку и плотно прикрепляют к ней. Затем в сосуд помещают металлическую форму-конус с насадкой для наполнения бетонной смесью. Размеры формы такие же, как при определении подвижности бетонной смеси. Форму-конус с помощью специального кольца-держателя закрепляют в приборе тремя слоями бетонной смеси, уплотняя ее штыкованием (25 раз каждый слой). Затем снимают форму-конус, поворачивают штатив, устанавливают на поверхности бетонной смеси диск и включают виброплощадку. Вибрирование при амплитуде 0,5 мм продолжают до тех пор, пока не начнется выделение цементного теста из двух отверстий диска. Полученное время вибрирования – показатель жесткости бетонной смеси.

В общем случае удобоукладываемость бетонной смеси зависит от состава и свойств компонентов смеси. Подвижность бетонной смеси растет с увеличением количества цементного теста, количества воды, но уменьшается с повышением концентрации заполнителя.

При изменении расхода цемента в бетоне от 200 до 400 кг/м<sup>3</sup> при постоянном расходе воды изменения подвижности бетонной смеси очень малы и практически их не учитывают, принимая подвижность постоянной. Подвижность смеси изменяется только при изменении расхода воды. Эта

закономерность, получившая название закона постоянства водопотребности и позволяющая в расчетах использовать упрощенную зависимость подвижности бетонной смеси только от расхода воды, верна как для тяжелого, так и для легкого бетона. Эту особенность бетонной смеси Ю.М. Баженов объясняет следующим образом. Увеличение содержания цемента в бетонной смеси повышает толщину обмазки зерен заполнителя цементным тестом. Однако при этом уменьшается отношение В/Ц (при постоянном расходе воды), т.е. влияние этих факторов, один из которых должен был бы увеличить, а второй – уменьшить консистенцию бетонной смеси, суммируется таким образом, что изменение расхода цемента в указанных пределах не влияет на подвижность бетонной смеси.

С увеличением содержания цементного теста при постоянном В/Ц или с уменьшением количества заполнителей подвижность бетонной смеси возрастает, а прочность остается практически неизменной. Если цементное тесто взять в количестве, необходимом только для заполнения пустот между заполнителями, то бетонная смесь получается жесткой, неудобной для укладки. Для того чтобы смесь стала подвижной, следует не только заполнить пустоты, но и раздвинуть зерна заполнителя прослойками из цементного теста. В зависимости от свойств заполнителя и соотношения между песком, щебнем минимальное содержание цементного теста в бетонной смеси, обеспечивающее ее нераслаиваемость и качественное уплотнение, составляет от 170–200 л в жесткой смеси до 220–270 л в подвижной и литой смесях.

Изменение содержания воды – главный фактор, с помощью которого регулируют консистенцию бетонной смеси. Если говорить более точно, подвижность бетонной смеси зависит от «истинного» водосодержания смеси, т.е. от количества воды в смеси за вычетом воды, поглощенной и адсорбированной твердыми составляющими. Например, бетонные смеси, содержащие пуццолановый портландцемент с активной кремнеземистой добавкой, обладающей высокой адсорбцией, при одном и том же расходе воды имеют значительно меньшую подвижность, чем смеси с обычным портландцементом.

Однако каждая бетонная смесь обладает вполне определенной водоудерживающей способностью, и при большем содержании воды часть ее отделяется от бетонной смеси, т.е. бетонная смесь расслаивается, что недопустимо. Характеристикой расслаиваемости бетонной смеси является второй важный показатель бетонной смеси – *связность*.

Подвижность бетонной смеси зависит от *крупности зерен заполнителя*. С увеличением крупности зерен суммарная площадь их поверхности уменьшается, снижается их влияние на цементное тесто, в результате подвижность бетонной смеси возрастает. Пыль, глинистые и другие загрязняющие примеси обычно снижают подвижность жирной бетонной смеси.

Подвижность также зависит от *соотношения между песком и щебнем*.

Наилучшая подвижность достигается при некотором оптимальном соотношении, при котором толщина прослойки цементного теста максимальная. При содержании песка в смеси заполнителей сверх этого значения бетонная смесь делается менее подвижной, что объясняется увеличением площади поверхности смеси заполнителей.

Эффективным регулятором подвижности бетонной смеси являются добавки пластификаторов и суперпластификаторов. Введение добавок позволяет повысить подвижность бетонной смеси и уменьшить ее водопотребность, т.е. можно готовить бетонные смеси равной подвижности при меньшем расходе воды и цемента.

В жестких бетонных смесях эффективность действия пластификаторов и суперпластификаторов снижается, так как количество воды оказывается недостаточным для обеспечения их действия.

Подвижность бетонной смеси с течением времени постепенно уменьшается вследствие физико-химического воздействия цемента и воды. Особенно сильно ухудшается удобоукладываемость жесткой бетонной смеси, поэтому ее следует укладывать как можно быстрее.

Жесткость легкобетонных смесей конструкционного бетона (или водопотребность, т.е. расход воды для получения заданной удобоукладываемости) в значительной мере зависит от содержания крупного заполнителя. Существует оптимальный диапазон содержания крупного заполнителя в бетоне, обеспечивающего наименьшую водопотребность бетонной смеси и, следовательно, наименьший расход цемента. Минимальную водопотребность легкобетонные смеси на плотных песках имеют при концентрации крупного заполнителя  $\varphi=0,3-0,4$ . Это соответствует расходу, например, керамзита по насыпному объему, примерно равному  $0,6-0,75 \text{ м}^3$  на  $1 \text{ м}^3$  бетона. Уменьшение, а особенно увеличение, расхода заполнителя по сравнению с указанными значениями резко повышает водопотребность бетонной смеси – снижает подвижность и повышает жесткость.

Рост жесткости (водопотребности) в области низких  $\varphi$  связан с увеличением вязкости растворной составляющей при насыщении ее песком. В области высоких  $\varphi$  жесткость (водопотребность) растет, несмотря на уменьшение вязкости растворной составляющей. Это объясняется в основном повышенным взаимодействием зерен керамзита при их сближении, так как уменьшается толщина растворной прослойки.

Помимо состава, на реологические свойства легкобетонных смесей влияют свойства применяемых материалов. Уменьшение предельной крупности и увеличение межзерновой пустотности заполнителя повышают жесткость бетонной смеси вследствие уменьшения толщины прослойки цементного раствора. При этом уменьшается и оптимальное значение  $\varphi$ . Точно также на реологические свойства смесей влияют факторы, способ-

ствующие увеличению вязкости растворной составляющей: уменьшение крупности песка, замена плотного песка пористым, увеличение нормальной плотности цемента. Влияние последнего фактора особенно резко проявляется в бетоне марки 400, а также в конструкционных бетонах с низкими значениями  $V/C < V/C_{\text{крит.}}$ .

**Связность** характеризует способность бетонной смеси сохранять однородную структуру, т.е. не расслаиваться в процессе транспортирования, кладки и уплотнения. В результате уплотнения смеси частицы сближаются, а часть воды, как наиболее легкого компонента, отжимается вверх, образуются капиллярные ходы и полости под зернами крупного заполнителя. Крупный легкий заполнитель, плотность которого отличается от плотности растворной части (смесь цемента, песка и воды), перемещается в теле бетонной смеси вверх. Все это ухудшает структуру бетона, делает ее неоднородной, увеличивает водопроницаемость и снижает морозостойкость. Чтобы повысить связность и предотвратить расслоение легобетонной смеси, необходимо правильно назначать количество мелкого заполнителя в составе бетона, а также сокращать расход воды затворения, используя пластифицирующие добавки.

Связность (расслаиваемость) бетонной смеси определяют по ГОСТ 10181.4. Сущность метода состоит в определении показателей *раствороотделения* и *водоотделения*.

Раствороотделение бетонной смеси определяют путем сопоставления содержания растворной составляющей в нижней и верхней частях свежеотформованного образца бетона размером 200×200×200 мм. Для этого испытываемую бетонную смесь укладывают и уплотняют в сборно-разборных металлических формах в соответствии с принятым способом уплотнения, а затем дополнительно вибрируют на лабораторном вибростолу в течение не менее 25 с. Образцы распалубливают, бетонную смесь разделяют примерно на две равные части: верхнюю и нижнюю.

Отобранные пробы бетонной смеси взвешивают и подвергают мокрому расसेву с отделением цементного раствора от заполнителя. Заполнитель промывают чистой водой, высушивают и взвешивают. Показатель раствоороотделения  $P_p$  в процентах вычисляют по формуле

$$P_p = 100(m_3^B/m_{\text{см}}^B - m_3^H/m_{\text{см}}^H) / (m_{\text{см}}^B \times m_{\text{см}}^H - m_3^B/m_{\text{см}}^B - m_3^H/m_{\text{см}}^H), \quad (1.62)$$

где  $m_3^B, m_3^H$  – масса отмытого, высушенного крупного заполнителя из верхней и нижней частей соответственно, кг;

$m_{\text{см}}^B, m_{\text{см}}^H$  – массы бетонной смеси верхней и нижней частей соответственно, кг.

Водоотделение бетонной смеси, характеризующее ее связность в состоянии покоя, оценивают по массе воды, выделившейся из бетонной смеси после отстаивания смеси в цилиндрическом сосуде в течение 1,5 ч. Для этого бетонную смесь укладывают в цилиндрический сосуд и уплот-

няют способом, выбор которого зависит от подвижности (жесткости) бетонной смеси. Уровень бетонной смеси после уплотнения должен быть ниже края сосуда на 10-15 мм. Сосуд накрывают стеклом и оставляют в покое. Периодически пипеткой отбирают воду, появившуюся на поверхности бетона и взвешивают.

**Пористость.** Принято различать объем вовлеченного воздуха, что очень важно для оценки качества плотного и поризованного бетонов, и объем межзерновых пустот, знание о котором важно для оценки качества крупнопористого бетона.

ГОСТ 10181 допускает определение объема вовлеченного воздуха производить экспериментальным и расчетным путем.

Экспериментально объем вовлеченного воздуха определяют с помощью специального прибора-объемомера, представляющего собой цилиндр с металлической пластинкой, в центре которой установлена стрелка с острым концом. Объем прибора должен быть: не менее 5 л – при испытании бетонов на заполнителе с предельной крупностью 20 мм и 10 л – при испытании бетона на заполнителе с предельной крупностью 40 мм. После определения плотности бетонной смеси от нее отбирают навеску, объем которой должен быть примерно в 2-2,5 раза меньше объема прибора, и загружают ее в прибор. Бетонную смесь заливают водой, перемешивают металлическим стержнем, снимают образовавшуюся пену, которую собирают в отдельный сосуд и взвешивают. Процедуру повторяют до тех пор, пока не будет образовываться пена. На пористые заполнители устанавливают пригружающий пуансон, чтобы они не всплывали. На сосуд устанавливают пластину со стрелкой и доливают воду до кончика стрелки. Сосуд взвешивают.

Объем вовлеченного воздуха  $V_B$  вычисляют по формуле

$$V_B = (V_{см} + m_B - V_0 - 0,9m_{п} - nW_{щ} \text{Щ} V_{см}/100000) / V_{см}, \quad (1.63)$$

где  $V_{см}$  – объем испытываемой смеси в уплотненном состоянии,  $см^3$ ;

$m_B$  – масса залитой воды, г;

$V_0$  – постоянная прибора,  $см^3$ ;

$m_{п}$  – масса пены, отобранная при испытании, г;

$n$  – коэффициент, равный: 0,4 – для гравия и 0,75 – для щебня;

$W_{щ}$  – водопоглощение щебня (гравия) в момент проведения испытания;

$\text{Щ}$  – содержание щебня (гравия) в бетонной смеси,  $кг/м^3$ .

Объем межзерновых пустот (%) в уплотненной бетонной смеси с погрешностью 0,1 % можно вычислить по формуле

$$V_{п} = 100 - (Ц/\rho_{ц} + П/\rho_{п} + Щ/\rho_{щ} + В)/10, \quad (1.64)$$

где Ц, П, Щ, В – расходы соответственно цемента, песка, щебня (гравия) и воды,  $кг/(м^3 \text{ бетонной смеси})$ ;

$\rho_{ц}$ ,  $\rho_{п}$ ,  $\rho_{щ}$  – плотности соответственно цемента, песка и щебня,  $кг/дм^3$ .

## Лабораторная работа №5 ПОДБОР СОСТАВА ЛЕГКОГО БЕТОНА. ОСНОВНЫЕ ПРИНЦИПЫ ПОДБОРА

Основная цель подбора – получить состав бетона, который обеспечивал бы заданную прочность и другие показатели качества бетона и бетонной смеси при минимальном расходе цемента или другого вяжущего.

Подбор состава легких бетонов следует производить по правилам, изложенным в ГОСТ 27006–86.

Подбор состава бетона осуществляется поэтапно в следующей последовательности:

- 1) определяется номинальный состав;
- 2) рассчитывается и корректируется рабочий состав;
- 3) рассчитываются рабочие дозировки.

В дальнейшем по результатам контроля качества материалов и получаемой из них бетонной смеси, а также приемочного контроля качества бетона производят корректировку рабочих составов.

На подбор состава бетона выдается задание, которое должно содержать:

- нормируемые показатели качества бетона в соответствии с техническими требованиями стандартов, технических условий или проектной документации на конструкции конкретных видов, для которых предназначен бетон;
- показатели качества бетона и бетонной смеси, длительность и режимы твердения бетона, принимаемые по технологической документации;
- показатели однородности прочности и плотности легких бетонов, а также соответствующий им средний уровень прочности и плотности, планируемые на предстоящий период;
- ограничения по составу бетона и применению материалов для его приготовления.

Состав бетона следует подбирать исходя из среднего уровня прочности и плотности бетона.

### **Подбор номинального состава бетона**

Подбор номинального состава бетона производят в следующей последовательности:

- выбирают и определяют характеристики исходных материалов;
- рассчитывают начальный состав;
- рассчитывают дополнительные составы бетона с параметрами, отличающимися от принятых в начальном составе в большую и меньшую сторону;
- изготавливают пробные замесы начального и дополнительного составов и определяют свойства бетонной смеси, изготавливают образцы и испытывают их с определением всех нормируемых показателей качества;

- обрабатывают полученные результаты с установлением зависимостей, отражающих влияние параметров состава на нормируемые показатели качества бетонной смеси и бетона;

- назначают номинальный состав бетона, обеспечивающего получение бетонной смеси и бетона требуемого качества при минимальном расходе вяжущего.

Выбор материалов, применяемых для изготовления бетона, лучше производить на основе паспортных характеристик, выдаваемых предприятием-поставщиком, или собственных длительных наблюдений за качеством материалов. До начала работы по подбору состава бетона следует провести испытания материалов по соответствующим стандартам для определения показателей их качества, необходимых для выполнения расчетов.

Активность цемента для расчета начального и дополнительных составов следует принимать в зависимости от его фактической прочности в бетоне постоянного состава. Допускается активность цемента для расчета состава бетона принимать равной его гарантированной марке.

Т а б л и ц а 1 . 4 7

Минимальный расход цемента для легких бетонов, обеспечивающий устойчивую работу конструкций в данных условиях эксплуатации

Условия службы легкобетонных конструкций	Минимальный расход цемента, кг/м <sup>3</sup> , легкого бетона				
	плотной структуры		поризованной структуры		Крупно- пористой, малопесчаной структуры
	без арматуры	Армиро- ванный	Без арматуры	Армиро- ванный	
В сооружениях с: неагрессивной средой	Не норми- руется	200	200	220	Не норми- руется
слабоагрессивной средой	200	250	250	300	250
среднеагрессивной средой	250	300	300	Не прим.	Не прим.
В сооружениях, требую- щих применения бето- нов морозостойкостью:					
F35	220	250	300	320	300
F50	250	300	320	350	350
F150	300	350	Не прим.	Не прим.	Не прим.
F300 и более	350	400	«	«	«
В сооружениях, тре- бующих применения бетонов водонепрони- цаемостью:					
W2	250	300	Не прим.	Не прим.	Не прим.
W4	300	350	«	«	«
W6	350	400	«	«	«
W8 и более	400	450	«	«	«

Отобранные для проведения работ по подбору составов пробы заполнителей высушивают до постоянной массы и просеивают с выделением требуемой фракции заполнителей. Начальный состав бетона рассчитывают по фактическим характеристикам исходных материалов в соответствии с методиками, пособиями и рекомендациями научно-исследовательских институтов или по методикам, изложенным ниже.

При подборе составов легких бетонов всех видов в качестве основного варьируемого параметра рекомендуется принимать расход цемента. Для обеспечения стойкости легких бетонов в разных средах расход цемента не должен быть меньше величин, указанных в табл. 1.47. При необходимости допускается замена части портландцемента активными тонкомолотыми гидравлическими добавками в количестве не более 30 % при пропаривании и 50 % – при автоклавной обработке после соответствующего испытания легкого бетона с добавками (на морозостойкость, коррозию арматуры, долговечность в эксплуатационных условиях и т.п.).

Для получения бетонов требуемого класса по прочности минимальная марка цемента должна быть не меньше рекомендуемой (табл. 1.48).

Т а б л и ц а 1 . 4 8

Минимальные марки цемента для приготовления легких бетонов

Условия твердения бетона	Минимальная марка цемента для бетона класса			
	B3,5 – B5,0	B7,5 – B10	B12,5 – B22,5	B25 – B40
Нормальные	-	300	400	500
Тепловая обработка	300	400	500	600

При подборе конструкционно-теплоизоляционных поризованных бетонов дополнительными варьируемыми параметрами должны быть расходы воздухововлекающих или пенообразующих добавок, а также мелкого заполнителя, если предусматривается его введение. При подборе составов конструкционных бетонов в дополнение к расходу цемента целесообразно ввести в качестве варьируемых параметров расходы крупного заполнителя и добавок (пластифицирующих, противоморозных и пр. в соответствии с заданиями на подбор).

Для конструкционных легких бетонов лучше использовать цементы высоких марок, хотя желательно эти цементы применять и для конструкционно-теплоизоляционных бетонов.

Дополнительные составы рассчитывают аналогично начальному при значениях варьируемых параметров состава, отличающихся от принятых при расчете начального состава в меньшую и большую сторону на 15-30 %. Число дополнительных составов по каждому из этих параметров должно быть не менее двух.

Объем каждого опытного замеса должен не менее чем на 10 % превышать суммарный объем изготавливаемых из него образцов и проб, используемых для контроля свойств бетонной смеси и бетона.

Материалы следует дозировать по массе с погрешностью не более 1,0 %. Дозирование пористых заполнителей можно производить по объему с обязательным контролем насыпной плотности.

Приготовление опытных замесов лучше производить в лабораторном смесителе принудительного или гравитационного действия. При его отсутствии опытные замесы без структурообразующих добавок допускается производить вручную на предварительно увлажненном противне с перемешиванием в течение 3-5 минут. Приготовление опытных замесов начинают с перемешивания сухих материалов, а затем постепенно добавляют в замес назначенное по расчету количество воды, раствора добавки или синтетической смолы.

После окончания перемешивания отбирают пробы для определения удобоукладываемости и других свойств бетонной смеси. При этом определение удобоукладываемости начинают не ранее чем через 15 мин после начала перемешивания смеси с водой.

Если свойства бетонной смеси не соответствуют каким-либо требованиям ГОСТ на подбор состава бетона, следует произвести корректировку составов до получения в замесе каждого состава смеси с заданными свойствами.

Бетонную смесь, которая не удовлетворяет требованиям ГОСТ по удобоукладываемости, корректируют при вторичном перемешивании с добавлением воды, цемента, заполнителей и добавок.

После получения бетонной смеси с заданными свойствами определяют ее плотность по ГОСТ 10181.2 и для каждого компонента рассчитывают фактический расход материалов на 1 м<sup>3</sup> бетона по формулам:

$$П = \rho_{см} g_{п} / \Sigma g, \quad (1.65)$$

$$Ц = \rho_{см} g_{ц} / \Sigma g, \quad (1.66)$$

$$Щ = \rho_{см} g_{щ} / \Sigma g, \quad (1.67)$$

$$В = \rho_{см} g_{в} / \Sigma g, \quad (1.68)$$

где Ц, П, Щ, В – расход соответственно цемента, мелкого заполнителя, крупного заполнителя и воды, кг/м<sup>3</sup> бетона;

$g_{ц}, g_{п}, g_{щ}, g_{в}$  – масса соответственно цемента, мелкого заполнителя, крупного заполнителя и воды в замесе, кг;

$\rho_{см}$  – плотность бетонной смеси, кг/м<sup>3</sup>;

$\Sigma g$  – суммарная масса всех материалов в замесе, кг.

Режим твердения образцов должен соответствовать принятому режиму твердения бетона в конструкциях, для которых произведен подбор состава бетона.

По результатам испытаний бетонной смеси и бетона рассчитанных составов устанавливают зависимости свойств бетонной смеси от параметров состава или (и) расхода материалов, а также строят графики зависимости прочности бетона и других его свойств от выбранных параметров.

По графику зависимости прочности бетона от расхода цемента определяют значение расхода цемента, обеспечивающее прочность бетона, указанную в задании. Пересчитывают состав бетона, исходя из найденного значения расхода цемента, и проверяют его соответствие всем другим нормируемым показателям качества (например, плотности, водонепроницаемости, морозостойкости и др.).

При положительных результатах испытаний подобранный состав бетона принимают за номинальный.

В случаях, когда подбираемый состав бетона отвечает требованиям по прочности, но не отвечает каким-либо другим требованиям задания на подбор состава, следует произвести новый подбор состава с применением технологических приемов.

### Расчет рабочих дозировок

Дозировки материалов – цемента, заполнителей, воды и добавки – рассчитывают по формуле

$$D_i = VP_i, \quad (1.69)$$

где  $D_i$  – доза  $i$ -го материала по массе, кг, или объему,  $\text{м}^3$ ;

$P_i$  – расход  $i$ -го материала в рабочем составе по массе,  $\text{кг}/\text{м}^3$ , или по объему,  $\text{м}^3/\text{м}^3$ ;

$V$  – объем замеса,  $\text{м}^3$ .

Ниже приводятся примеры подбора составов легких бетонов различного назначения: конструкционных, конструкционно-теплоизоляционных и теплоизоляционных – и структуры: слитной, поризованной и крупнопористой.

### Примеры подбор состава конструкционного легкого бетона

Излагаемая ниже схема подбора состава конструкционных легких бетонов разработана НИИЖБом и ВНИИжелезобетоном.

Подбор состава конструкционного легкого бетона производят исходя из условий обеспечения его прочности, плотности и долговечности. Перед подбором состава легкого бетона определяют следующие характеристики исходных материалов:

- для цемента – активность (марка);

➤ для заполнителей – насыпная плотность, плотность зерен крупного заполнителя в цементном тесте, прочность и межзерновая пустотность крупного заполнителя, его водопоглощение за 30 минут, водопотребность мелкого заполнителя по ГОСТ 9758.

Расчет состава конструкционного легкого бетона из условия обеспечения его прочности и объемной массы производится в следующем порядке:

- а) по табл. 1.49 и 1.50 определяют ориентировочный расход цемента, Ц;
- б) по табл. 1.51 находят начальный расход воды,  $V_0$ ;
- в) по табл. 1.52 определяют объемную концентрацию крупного заполнителя  $\varphi$ ;
- г) расход кварцевого песка вычисляют по формуле

$$П_{кв.п} = 2,65(1000 - Ц/\rho_{ц} - V_0 - 1000\varphi), \quad (1.70)$$

где Ц – расход цемента, кг;

$\rho_{ц}$  – плотность цемента,  $кг/м^3$ .

Т а б л и ц а 1 . 4 9

Рекомендуемый расход цемента марки 500  $кг/м^3$  бетонной смеси для обеспечения данного класса легкого бетона

Класс бетона	Рекомендуемая марка цемента	Расход цемента при марке пористого заполнителя								
		По прочности, не менее								
		П75	П100	П125	П150	П200	П250	П300	П350	П400
B12,5	400	300	280	260	240	230	220	210	210	200
B15	400	–	340	320	300	280	260	250	240	230
B20	400	–	–	390	360	330	310	290	280	250
B22,5	500	–	–	–	420	390	360	330	310	280
B25	500	–	–	–	–	450	410	380	350	310
B27,5	500	–	–	–	–	–	480	450	400	360
B30	550	–	–	–	–	–	–	540	480	420
B35	600	–	–	–	–	–	–	–	550	480
B40	600	–	–	–	–	–	–	–	–	570

Расход крупного заполнителя Щ в  $кг/м^3$  определяется по формуле

$$Щ = 1000\varphi\rho_з, \quad (1.71)$$

где  $\rho_з$  – плотность зерен крупного заполнителя в цементном тесте, определенная по ГОСТ 9758–86,  $кг/дм^3$ .

Рассчитывается ожидаемая плотность бетонной смеси  $\rho_{б.см}$  в высушенном состоянии по формуле

$$\rho_{б.см} = Щ + 1,15Ц + П_{кв.п}. \quad (1.72)$$

Если заданием на подбор состава легкого бетона определена необходимость обеспечить заданную плотность бетона, то ее сравнивают с ожи-

даемой плотностью, определяемой по формуле (1.72). Если ожидаемая плотность бетона, вычисленная по формуле (1.72), превышает заданную, то вместо плотного песка применяют смесь плотного с пористым песком или с золой ТЭС либо только пористый песок.

Соотношение между плотным и пористым песками подбирается таким образом, чтобы была обеспечена заданная плотность бетона по массе  $\rho_{б.зад}$  согласно формуле

$$\rho_{б.см} = \Pi + 1,15\Pi + \Pi_{кв} + \Pi_{пор} < \rho_{б.зад}, \quad (1.73)$$

а также выдержан принцип абсолютных объемов согласно формуле

$$\Sigma = \Pi/\rho_{\Pi} + \Pi/\rho_{\Pi} + \Pi_{кв}/\rho_{пкв} + \Pi_{пор}/\rho_{пор} + В = 1000 \text{ л}, \quad (1.74)$$

где  $\rho_{\Pi}$ ,  $\rho_{\Pi}$ ,  $\rho_{пкв}$ ,  $\rho_{пор}$  – соответственно плотность зерен крупного пористого заполнителя в цементном тесте, плотность цемента, плотность плотного (кварцевого) песка, плотность пористого песка в цементном тесте, кг/дм<sup>3</sup>;

В – расход воды, л.

Т а б л и ц а 1.50

Поправочные коэффициенты на расходы цемента  
при применении иных компонентов бетона

Фактор изменения	Значение коэффициентов изменения расхода цемента для бетона марки класса							
	В12,5	В15	В20	В25	В30	В35	В40	
Применение цемента марки								
400	1,15	1,20	–	–	–	–	–	
500	1,00	1,00	1,00	1,15	1,20	–	–	
600	0,80	0,85	0,90	1,00	1,10	1,15	–	
Применение песка: плотного с водопотребностью 7% пористого или смеси	– 1,00	– 1,00	– 1,00	0,85 1,00	0,90 1,00	1,00 1,00	1,00 1,00	1,00 1,00
Применение заполнителя с наибольшей крупностью, мм:								
20	1,10	1,10	1,10	1,10	1,10	1,10	1,10	
10	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	
5	1,10	1,10	1,07	1,07	1,05	1,05	1,05	
Применение смесей жесткостью, с:								
10-15	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	
более 15	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	
подвижностью, см:								
1-2	1,07	1,07	1,07	1,07	1,07	1,07	1,07	
3-5	1,10	1,10	1,10	1,10	1,10	–	–	

П р и м е ч а н и е . При увеличении водопотребности плотного песка на каждый 1 % начальный расход цемента увеличивают на 10 кг.

Т а б л и ц а 1 . 5 1

Ориентировочные расходы воды для бетонной смеси при использовании  
плотного песка

Осадка конуса, см	Жесткость, с	Расход воды, л/м <sup>3</sup> , при использовании пористого заполнителя с предельной крупностью, мм			
		Пористого гравия предельной крупностью, мм		Пористого щебня предельной крупностью, мм	
		10	20	10	20
3-7	-	220	205	250	235
1-2	10-20	205	190	230	215
-	20-30	195	180	215	200
-	30-50	185	170	200	185

П р и м е ч а н и я : 1. При замене плотного песка пористым расход воды следует увеличить на 30-50 л.

2. При применении шлакопортландцементов или пуццолановых портландцементов, а также тонкомолотых добавок к портландцементу расход воды увеличивают на 15-40 л.

Т а б л и ц а 1 . 5 2

Рекомендуемая объемная концентрация крупного пористого заполнителя ф

Межзерновая пустотность крупного пористого заполнителя	Объемная концентрация крупного пористого заполнителя при удобоукладываемости бетонной смеси		
	Жесткость смеси свыше 15 с	Жесткость менее 15 с Осадка конуса менее 2 см	Осадка конуса более 2 см
0,36	0,52	0,49	0,47
0,38	0,50	0,47	0,45
0,40	0,48	0,45	0,43
0,42	0,46	0,43	0,41
0,44	0,44	0,41	0,39
0,46	0,42	0,39	0,37
0,48	0,40	0,37	0,35
0,50	0,38	0,35	0,33
0,52	0,36	0,33	0,31
0,54	0,34	0,31	0,29

По изложенной методике рассчитываются еще два дополнительных состава керамзитобетона, в которых расходы цемента отличаются от исходного на  $\pm 10-20\%$ .

Опытными замесами корректируют расходы воды для каждого состава. Для этого изготавливают опытные замесы бетона объемом по 3-4 литра. Приготовление бетонной смеси ведут к следующей последовательности. Отвешивают расчетные количества крупного заполнителя, цемента, кварцевого и пористого песков, высыпают их в лабораторную мешалку принудительного действия и тщательно перемешивают. В смесь выливают воду – примерно  $\frac{3}{4}$  от расчетного количества – и вновь тщательно

перемешивают в течение 3-4 минут. Если мешалки нет, перемешивание ведут вручную в чаше затворения в течение 5-6 минут. Измеряют удобоукладываемость бетонной смеси. Если удобоукладываемость смеси ниже заданной, то в лабораторный замес добавляют воду и вновь тщательно перемешивают смесь, добиваясь того, чтобы удобоукладываемость смеси соответствовала заданной. Указанную процедуру выполняют для каждого из трех расчетных составов бетона.

Изготавливают три пробных замеса бетонной смеси с откорректированными составами. Объем каждого пробного замеса принимают равным объему контрольных образцов-кубов плюс один литр.

Формуют контрольные образцы и измеряют плотность бетонной смеси. Плотность бетонной смеси не должна отличаться от расчетной более чем на 2 %.

По формулам (1.65)-(1.68) вычисляют фактические расходы материалов на  $1 \text{ м}^3$  бетона.

Образцы в течение суток хранят в формах в помещении с температурой 15-20 °С; затем распалубливают, маркируют и до момента испытания хранят в камере с влажностью 100 % или в периодически смачиваемом песке, опилках и т.д. При необходимости, если ставится такая задача, образцы могут пропариваться по заданному режиму, но не раньше, чем через сутки после их изготовления.

Перед испытанием образцы тщательно осматривают, измеряют грани (с точностью до 1 мм), взвешивают. По ГОСТ 12730.1-78 определяют плотность бетона и влажность, по ГОСТ 10180-90 – прочность.

Вычисляют средние значения прочности образцов для каждого состава бетона и строят графики зависимости прочности керамзитобетона от фактических расходов цемента.

Если на оси ординат нанесены значения прочности керамзитобетона в 28-суточном возрасте, то по графику можно определить расход цемента для обеспечения марочной прочности бетона и т.д.

Корректировку состава бетона производят по ГОСТ 27006-86.

При необходимости в бетон могут вводиться различного рода добавки (для уменьшения водопотребности бетонной смеси, вовлечения в нее воздуха, ускорения сроков твердения, повышения долговечности бетона и пр.). Рекомендуемые дозировки некоторых добавок, применяемых для пластифицирования бетонной смеси, приведены в табл. 1.53.

При подборе состава легких бетонов с поверхностно-активными добавками до тепловой обработки образцы необходимо выдерживать при комнатной температуре не менее 8-10 часов, так как резкие режимы прогрева могут вызвать вспучивание и нарушение структуры бетона.

Т а б л и ц а 1 . 5 3

Добавки, рекомендуемые для повышения качества  
конструкционных легких бетонов

Вид цемента	Добавки в расчете на сухое вещество, % от массы цемента		
	С-3	ЛСТМ	10-03
Портландцемент, быстротвердеющий портландцемент	0,5-1,1	0,1-0,5	0,2-0,6
Сульфатостойкий портландцемент	0,1-0,4	0,05-0,1	0,1-0,2
Шлакопортландцемент	0,2-0,3	0,5-0,2	0,1-0,3

Примечания: 1. Оптимальное количество добавок подбирается по ГОСТ 30459–2008 «Добавки для бетонов. Методы определения эффективности».

2. Добавки применяются в виде растворов, которые готовят заранее, если добавки поступают в виде сухих порошков.

**Пример.** Требуется рассчитать начальный состав керамзитобетона марки 350 (класс В25) с плотностью в сухом состоянии  $1700 \text{ кг/м}^3$ . Жесткость керамзитобетонной смеси 10-20 с.

Используемые материалы: портландцемент марки 600; кварцевый песок с модулем крупности  $M=1,8$ , водопотребностью 7 % и плотностью  $2,62 \text{ г/см}^3$ ; керамзитовый гравий фракции 5-20 мм, марки 700, прочностью  $R_k^u=6 \text{ МПа}$  (марка по прочности П250), плотностью зерен в цементном тесте  $\rho_{зк}=1,1 \text{ кг/м}^3$ , водопоглощением в воде за 1 ч  $W_k=5 \text{ %}$ . Межзерновая пористость керамзитового гравия  $\Pi=1 - 0,7/1,1 = 0,364$ .

Определим расходы материалов для начального состава.

Расход цемента устанавливаем по табл. 1.49 и 1.50:

$$Ц = 410 \times 0,85 = 350 \text{ кг.}$$

Расход керамзитового гравия – по формуле (1.71) и рекомендаций табл. 1.52:

$$\Pi \text{Ц} = 1000\phi \cdot \rho_з = 1000 \times 0,49 \times 1,1 = 539 \text{ кг.}$$

Расход воды определим по табл. 1.51:

$$В = 190 \text{ л/м}^3.$$

При заданных материалах и составе керамзитобетона поправки на расход воды не требуется. Поэтому общий расход воды  $В = 190 \text{ л/м}^3$ .

Расход песка рассчитаем по формуле (1.70):

$$\Pi_{кв} = 2,65(1000 - 350/3,1 - 190 - 1000 \times 0,49) = 550 \text{ кг.}$$

Для проверки по формуле (1.72) вычислим плотность керамзитобетона в сухом состоянии:  $\rho_{б.рас} = 1,15 \times 350 + 539 + 550 = 1490 \text{ кг/м}^3$ , что соответствует заданию.

Получили следующий начальный состав керамзитобетона: цемент марки 600-350  $\text{кг/м}^3$ ; кварцевый песок – 550  $\text{кг/м}^3$ ; керамзит – 540  $\text{кг/м}^3$ ; вода – 190  $\text{л/м}^3$ .

## Пример подбора состава конструкционно-теплоизоляционного легкого бетона

В связи с резким повышением требований к теплозащитным свойствам стеновых конструкций для ограждающих конструкций в настоящее время применяют либо поризованные, либо крупнопористые легкие бетоны плотностью не выше  $900 \text{ кг/м}^3$ . Особенность этих бетонов состоит в том, что их прочность при сжатии не превышает  $100 \text{ кг/м}^3$ . Бетоны могут изготавливаться с применением мелкого заполнителя или без него.

В настоящем подразделе рассматривается методика подбора состава поризованного бетона, в следующем подразделе – методика подбора крупнопористого бетона, который может применяться и как конструкционно-теплоизоляционный, и как теплоизоляционный.

До начала подбора состава поризованного легкого бетона устанавливают характеристики исходных материалов.

Расход цемента Ц,  $\text{кг/м}^3$ , принимается по табл. 1.54.

Т а б л и ц а 1 . 5 4

Ориентировочный расход цемента марки 400 в поризованных легких бетонах, приготовленных из малоподвижных смесей с жесткостью 20-30 с

Класс бетона по прочности	Марка крупного заполнителя	Расход цемента и плотность бетона, $\text{кг/м}^3$ , на песке		
		дробленом	шлаковом	Без песка
На керамзитовом гравии				
В2,5	250	240/700	260/800	340/700
	300	220/750	240/850	320/750
	350	200/800	220/900	280/800
	400	180/850	200/950	240/900
	450	170/900	–	230/950
В3,5	300	230/750	270/900	330/800
	350	220/800	250/950	290/850
	400	210/850	230/1000	250/900
	500	200/900	–	220/950
В5	300	220/850	250/950	-
	350	200/900	220/1000	320/900
	450	190/950	–	280/950
В7,5	350	250/1000	-	-
На щебне (аглопорите, шлаковой пемзе)				
В2,5	400	230/900	-	290/900
	500	210/1000	-	250/1000
В3,5	500	230/1050	-	290/1050
В5	500	250/1100	-	330/1100
В7,5	600	250/1250	-	330/1250

Примечания: 1. Слева от черты приведен расход цемента, справа – минимальная плотность сухого бетона.

2. Для армированных поризованных бетонов расход цемента должен быть не менее  $220 \text{ кг/м}^3$ .

Расход воды принимают по табл. 1.55 в зависимости от требуемой удобоукладываемости смеси и свойств применяемых заполнителей.

Т а б л и ц а 1 . 5 5

Ориентировочные расходы воды для подбора состава поризованных легких бетонов

Поризованный бетон	Пористый заполнитель	Ориентировочные расходы воды, л/м <sup>3</sup> , при			
		подвижности смеси, см		жесткости смеси, с	
		5-10	до 5	до 30	30-60
Без песка	Керамзитовый гравий	160-190	130-160	–	–
	Пористый щебень (аглопоритовый, шлакопемзовый и т.д.)	190-220	160-190	–	–
	Керамзитовый гравий и дробленый керамзитовый песок	240-260	210-240	200-230	170-200
	То же, шлаковый песок	220-240	190-220	180-210	150-170
	Пористый щебень и дробленый пористый песок	280-310	250-280	230-270	200-230

Примечания: 1. В таблице указан общий расход воды с учетом воды, требуемой для приготовления порообразователей и добавок.

2. Данные таблицы относятся к бетонам, содержащим крупный заполнитель 0,9-1 м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup> и дробленый песок (для песчаных бетонов) до 300 л/м<sup>3</sup>. При расходе песка более 300 л/м<sup>3</sup> начальный расход воды нужно увеличить до 10 %; при меньшем расходе песка расход воды нужно уменьшить до 15 %.

Расход песка при подборе состава песчаных поризованных легких бетонов для каждого принятого расхода цемента рассчитывают по формуле

$$П = \rho_6 - 1,15Ц - Щ, \quad (1.75)$$

где П – расход песка, кг/м<sup>3</sup>;

Ц и Щ – расходы цемента и щебня (гравия), кг/м<sup>3</sup>.

Расход воздухововлекающих добавок определяют по табл. 1.57. Вначале вычисляют необходимый объем вовлеченного в бетон воздуха (в %):

$$V_v = 0,1[1000 - (Ц/\rho_ц + П/\rho_п + Щ/\rho_щ + B)], \quad (1.76)$$

где  $\rho_ц$  – плотность цемента, кг/дм<sup>3</sup>;

$\rho_п$  – плотность зерен песка, кг/дм<sup>3</sup>;

$\rho_з$  – плотность зерен крупного заполнителя, кг/дм<sup>3</sup>.

Принятый объем вовлеченного воздуха при использовании пены или газа не должен быть более 25 %, а при применении воздухововлекающих добавок – не более 12 %.

Расход порообразующей добавки для опытных замесов принимается на основании данных табл. 1.56-1.57 в зависимости от способа поризации, вида добавки и других факторов, а также необходимого объема вовлеченного воздуха. Для каждого рассчитанного состава рекомендуется назначить три расхода поризующей добавки в пределах, указанных в табл. 1.56-1.57, и с отклонением от них на 10-15 %.

Т а б л и ц а 1 . 5 6

Ориентировочные расходы воздухововлекающих добавок  
для приготовления поризованных легких бетонов  
с использованием пористого песка

Добавки	Требуемый объем вовлеченного воздуха, %	Ориентировочный расход добавки, % от массы цемента, при использовании песка		
		керамзитового дробленого	аглопоритового или кварцевого	шлакового
Смола воздухововлекающая пековая, СВП	4-8	0,02-0,12	0,05-0,17	0,07-0,2
	8-12	0,07-0,17	0,12-0,25	0,15-0,28
Смола древесная омыленная, СДО	4-8	0,02-0,12	0,05-0,17	0,09-0,23
	8-12	0,07-0,17	0,12-0,25	0,15-0,30
Щелочной сток производства капролактама, ЩСПК	4-8	0,25-1,00	0,5-1,50	1,0-2,0
	8-12	0,50-1,50	1,1-2,50	1,5-3,0

Т а б л и ц а 1 . 5 7

Ориентировочные расходы пенообразователя  
для приготовления легких бетонов, поризованных пеной

Пенообразователь, наименование и условная марка по ГОСТ 24211	Ориентировочный расход пенообразователя на 1 м <sup>3</sup> бетонной смеси, л	Состав водного раствора (масса сульфанола: масса воды)
Сульфанол, С	1,1-2,2	1 : 20

Т а б л и ц а 1 . 5 8

Ориентировочные расходы газообразующей добавки для приготовления  
легких поризованных бетонов

Крупный пористый заполнитель	Ориентировочный расход алюминиевой пудры (ПАК, ПАП-1), кг/(м <sup>3</sup> бетонной смеси), от объема бетонной смеси при объеме вовлеченного воздуха, %			
	5-10	11-15	16-20	21-25
Гравий	0,3-0,5	0,5-0,7	0,7-0,9	0,9-1,1
Щебень	0,4-0,6	0,6-0,8	0,8-1,0	1,0-1,3

Пр и м е ч а н и е . При изготовлении песчаных поризованных бетонов расходы алюминиевой пудры увеличиваются на 10-15 %.

На основании данных испытания опытных образцов-кубов строятся графики зависимости прочности бетона и его плотности от расходов цемента и добавок. С использованием графиков назначаются такие расходы цемента и добавки, при которых достигаются требуемые плотность и прочность поризованного легкого бетона при слитной (псевдоплотной) структуре и заданной удобоукладываемости бетонной смеси.

При подборе состава рассчитывается не менее девяти составов поризованных легких бетонов для опытных замесов, различающихся расходом цемента, крупного заполнителя и поризующей добавки (для беспесчаных бетонов) и расходом цемента, песка и добавки (для песчаных бетонов).

По полученным составам рассчитываются расходы материалов для приготовления опытных замесов объемом не менее 15 л (для получения трех образцов 15×15×15 см). Из полученной смеси изготавливаются образцы в соответствии с ГОСТ 11054, по результатам испытания которых назначают рабочий состав бетона.

### **Пример подбора состава поризованного легкого бетона с воздухововлекающими добавками**

Предлагаемая схема подбора поризованных легких бетонов разработана В.Г. Довжиком. Требуется подобрать состав керамзитобетона класса В3,5 плотностью 800 кг/м<sup>3</sup> в сухом состоянии.

Материалы: портландцемент марки 400; керамзитовый гравий фракции 5-20 мм насыпной плотностью 400 кг/м<sup>3</sup> (плотность зерен в цементном тесте 0,75 кг/дм<sup>3</sup>) и прочностью по ГОСТ 9758 1,7 МПа; дробленый керамзитовый песок (насыпная плотность 700 кг/м<sup>3</sup>, плотность зерен в цементном тесте 1,37 кг/дм<sup>3</sup>); воздухововлекающая добавка СДО. Требуемая жесткость бетонной смеси – 20-30 с.

По табл. 1.54 находим, что на данном керамзите можно изготовить поризованный керамзитобетон плотностью 850, применяя дробленый керамзитовый песок. Учитывая, что прочность заполнителя превышает требования ГОСТ 9757-90, делаем попытку получить бетон с требуемыми показателями качества.

Определим начальный состав поризованного керамзитобетона.

По табл. 1.54 находим расход цемента Ц=210 кг/м<sup>3</sup>.

Расход керамзита принимаем равным 1,0 м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup> или по весу,

$$\text{Щ}=400 \text{ кг/м}^3.$$

По формуле (1.75) определяем расход песка:

$$\text{П}=800 - 1,15 \times 210 - 400 = 158 \text{ кг/м}^3.$$

По табл. 1.55 определяем ориентировочный расход воды

$$\text{В}=210 \text{ кг/м}^3.$$

По формуле (1.76) вычисляем ориентировочный объем воздуха, который должен быть вовлечен в смесь для получения слитной структуры бетона:

$$V_{\text{в}}=0,1[1000 - (210/3,1+158/1,37+400/0,75+210)]=7,4 \text{ \%}.$$

По табл. 1.56 принимаем расход добавки СДО = 0,07 % от массы цемента или СДО=0,07×0,01×210=0,147 кг/м<sup>3</sup>.

Принимая в качестве варьируемых параметров расходы цемента и воздухововлекающей добавки, рассчитываем еще 8 составов керамзитобетона. Опытные замесы объемом 15 л приготавливаем в лабораторном растворосмесителе, уточняя расход воды для получения необходимой жесткости смеси (чем меньше расход цемента и больше расход добавки, тем меньше водопотребность смеси).

Изготавливаем бетонные образцы размером 15×15×15 см, определяя плотность свежесушеного бетона. Образцы выдерживаем в течение суток, затем распалубливаем и пропариваем по режиму: 4+4+4=12 ч. Через 4 ч после тепловой обработки определяем прочность образцов при сжатии. Подсчитываем фактический расход материалов на 1 м<sup>3</sup> бетона по формулам (1.65)-(1.68) и определяем плотность бетона в сухом состоянии. По полученным данным строим графики зависимости прочности и плотности сухого бетона от расхода цемента и добавки. По графикам устанавливаем номинальный состав бетона: расход цемента Ц=205 кг/м<sup>3</sup>, расход керамзита Щ=400 кг/м<sup>3</sup> (1,0 м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup>); расход пористого дробленого песка П= 160 кг/м<sup>3</sup>; расход воды В=212 л/м<sup>3</sup>; добавки СДО = 150 г/м<sup>3</sup>.

### **Пример подбора состава крупнопористого легкого бетона**

Излагаемая ниже схема подбора состава крупнопористого бетона разработана Г.А. Бужевичем.

Расход цемента Ц марки 400, кг/м<sup>3</sup>, определяют либо по табл. 1.59, либо по формуле

$$Ц=(2 - \rho_{\text{щ}}) \times (100+2,5R_6). \quad (1.77)$$

При применении цемента другой марки полученное значение Ц умножают на поправочный коэффициент  $K_{\text{ц}}$ , вычисляемый по формуле

$$K_{\text{ц}}=600/(R_{\text{ц}}+200). \quad (1.78)$$

Расход сухого заполнителя (Щ) в дм<sup>3</sup>/м<sup>3</sup> вычисляют по формуле

$$Щ=1000\rho_{\text{щ}}(1,4-0,3 \rho_{\text{щ}}). \quad (1.79)$$

Расход воды определяется по формуле

$$В=(NЦ+3W_{\text{щ}})/100, \quad (1.80)$$

где  $N$  – нормальная густота цементного теста, %;

- $\rho_{\text{ш}}$  – насыпная плотность пористого заполнителя, кг/дм<sup>3</sup>;  
 $W_{\text{ш}}$  – водопоглощение заполнителя за 30 мин, %;  
 $R_{\text{ц}}$  – активность (марка) цемента, кгс/см<sup>2</sup>;  
 $R_{\text{б}}$  – прочность (марка) бетона, кгс/см<sup>2</sup>.

Т а б л и ц а 1 . 5 9

Ориентировочные расходы цемента марки 400 для приготовления крупнопористого беспесчаного керамзитобетона

Насыпная плотность керамзитового гравия, кг/м <sup>3</sup>	Показатели	Марка бетона				
		5	10	15	25	35
800	Расход цемента, кг/м <sup>3</sup>	-	-	165	195	225
	Плотность сухого бетона, кг/м <sup>3</sup>			1120	1150	1190
600	Расход цемента, кг/м <sup>3</sup>	-	175	193	228	265
	Плотность сухого бетона, кг/м <sup>3</sup>		993	950	1000	1050
400	Расход цемента, кг/м <sup>3</sup>	180	200	220	260	-
	Плотность сухого бетона, кг/м <sup>3</sup>	719	740	760	800	
350	Расход цемента, кг/м <sup>3</sup>	186	206	227	-	-
	Плотность сухого бетона, кг/м <sup>3</sup>	667	690	712		
300	Расход цемента, кг/м <sup>3</sup>	190	213	235	-	-
	Плотность сухого бетона, кг/м <sup>3</sup>	610	640	665		
250	Расход цемента, кг/м <sup>3</sup>	219	213	-	-	-
	Плотность сухого бетона, кг/м <sup>3</sup>	445	580			

Примечание. При использовании в качестве крупного заполнителя пористого щебня расходы цемента увеличиваются на 10-15 %.

За варьируемый параметр принимают расход цемента. После назначения начального состава бетона рассчитывают два дополнительных состава бетона с расходами цемента, большими и меньшими, чем в начальном составе, на 20-25 %. При изготовлении опытных образцов особое внимание следует уделять определению оптимального количества воды затворения. Даже небольшие отклонения количества воды от оптимального значения приводят либо к расслоению бетонной смеси, либо к неравномерному распределению цементного теста по поверхности заполнителей. Поиск оптимального количества воды затворения целесообразно вести методом, впервые предложенным Н.А. Поповым. Для каждого принятого соотношения между расходами заполнителя и цемента изготавливают несколько бетонных смесей с разными расходами воды. Определяют их расслаиваемость и плотность. Оптимальному расходу воды отвечает нарастающая бетонная смесь с максимальной плотностью.

#### 1.4.1. Особенности изготовления изделий из легких бетонов

**Приготовление бетонной смеси.** Так как качество пористых заполнителей оказывает значительное влияние на качество бетона, желательно их хранить в закрытых складах, по фракциям. Транспортирование и перемещение пористых заполнителей нужно производить способами, исключаящими их разрушение и загрязнение. Дозирование пористых заполнителей (и крупных, и мелких) следует производить объемно-весовым методом. Для этого действующие весовые дозаторы, применяемые для дозирования тяжелых заполнителей, необходимо переделать на объемно-весовые, например, по чертежам ВНИИЖелезобетона. Остальные материалы дозируют по массе.

Для каждой бетонной смеси (каждого состава бетона) желательно иметь математическую модель (лучше в виде графика или таблицы), выражающую корреляционную связь между расходом воды и силой тока на статоре (якоре) двигателя бетономешалки, которую оператор может использовать для регулирования расхода воды. Последним в смеситель вводят водный раствор добавки. Раствор можно вводить в дозатор воды и подавать в бетономешалку вместе с водой.

Приготовление бетонной смеси следует производить в смесителях принудительного действия. Гравитационные смесители можно применять только в том случае, если готовится подвижная бетонная смесь с осадкой конуса более 3 см, а плотность бетонной смеси превышает  $1700 \text{ кг/м}^3$ . Продолжительность перемешивания бетонной смеси в бетоносмесителях устанавливается опытным путем. В первом приближении ориентировочную продолжительность перемешивания бетонной смеси в бетономешалках принудительного перемешивания можно принять по табл. 1.60.

Т а б л и ц а 1 . 6 0

#### Продолжительность перемешивания легкобетонной смеси

Емкость барабана смесителя, л	Продолжительность перемешивания, с, бетонной смеси подвижностью 3 см (по осадке конуса) для бетона плотностью в высушенном состоянии	
	менее $1700 \text{ кг/м}^3$	более $1700 \text{ кг/м}^3$
До 500	120	100
500-1000	150	120
Более 1000	180	150

Пр и м е ч а н и я : 1. Для смеси жесткостью более 20 с продолжительность перемешивания увеличивается на 60 с.

2. Для смесей с подвижностью 5-8 см продолжительность перемешивания уменьшается на 30 с.

**Укладка и уплотнение бетонной смеси.** Укладку легкобетонной смеси в формы желательно производить не позднее 45 мин, а для смесей с добавками-ускорителями твердения – 20 мин после выгрузки бетонной

смеси из смесителя. Укладку смеси следует осуществлять с помощью бетоноукладчиков и других механизмов с равномерным распределением смеси по всей площади формируемого изделия; процесс подачи и укладки смеси должен быть непрерывным.

При вынужденных перерывах время перерыва и время от выгрузки смеси из смесителя до ее укладки не должны превышать половины времени, соответствующего началу схватывания цементного теста.

В табл. 1.61 приведены режимы уплотнения бетонных смесей, рекомендуемые НИИЖБом.

Т а б л и ц а 1 . 6 1

Рекомендуемые режимы уплотнения легкобетонных смесей

Удобоукладываемость смеси по ГОСТ 10181	Продолжительность уплотнения, с, при режимах	
	вибрационном ( $n = 1500-3000$ кол/мин) и ударно-вибрационном ( $n = 600-900$ кол/мин)	ударном ( $n = 200-300$ кол/мин)
К = 5-15 с	100-150	150-300
К = 2-5 с	70-100	100-150
ОК = 3-8 см	30-70	60-100

При формировании многпустотных панелей с использованием вибровкладышей следует применять пригруз или вибропригруз, обеспечивающий величину статического давления в пределах  $P = 0,003 - 0,01$  МПа. При этом амплитуда смещения вибровкладышей должна быть не более  $0,01 d_{вк}$ . Здесь  $d_{вк}$  – диаметр вкладышей.

Уплотнение легкобетонных смесей в горизонтальных формах можно производить с помощью поверхностных вибраторов, но при соблюдении следующих условий:

- а) жесткость бетонной смеси не более 5 с;
- б) толщина уплотняемого слоя не более 200 мм;
- в) продолжительность уплотнения каждого участка изделия – 20-30 с;
- г) перекрытие смежных позиций – не менее 5 см.

**Тепловая обработка изделий из легких бетонов.** Тепловую обработку изделий, как правило, производят при атмосферном давлении либо в пропарочных камерах периодического или непрерывного действия, либо под переносными колпаками, на стендах, а также в любых других установках или в специальных термоформах, термопакетах и кассетах.

Режим тепловой обработки и способ твердения изделий из легких бетонов в каждом отдельном случае устанавливают опытным путем с учетом свойств материалов, подвижности смеси, принятой технологии и требований, предъявляемых к готовой продукции. Ориентировочные параметры тепловой обработки изделий можно назначать, руководствуясь правилами, изложенными ниже.

В качестве теплоносителя в зависимости от принятой технологии можно использовать водяной пар, паровоздушную смесь, горячий воздух, различные типы электронагревателей, а также другие виды теплоносителей, обеспечивающие равномерность прогрева поверхности смеси или формы.

Общий цикл тепловой обработки включает четыре этапа:

1-й этап – предварительное выдерживание изделия от момента окончания формования до начала повышения температуры;

2-й этап – подъем температуры бетона (температуры в камере) до максимальной;

3-й этап – изотермическое выдерживание при максимальной температуре;

4-й этап – остывание.

Время предварительного выдерживания бетона следует назначать с момента окончания процесса уплотнения бетона. В табл. 1.62 приводятся примерные режимы пропаривания изделий из легкого бетона, рекомендуемые НИИЖБом и ВНИИЖелезобетоном.

Т а б л и ц а 1 . 6 2

Время предварительного выдерживания и скорость подъема температуры легкого бетона на портландцементе или шлакопортландцементе

Время предварительного выдерживания, с	Скорость подъема температуры, °С/ч, при прогреве			
	по плавному режиму	по прогрессивно-нарастающему режиму в		
		1-й час	2-й час	3-й час
1	10/15	10/15 15/20	15/20	20/30
2	15/20	30/40	20/30	30/40
3	30/40	40/50	40/50	40/50
4	40/50	–	50/50	50/50

П р и м е ч а н и я : 1. При использовании быстротвердеющих цементов или смесей с добавками-ускорителями твердения продолжительность первого периода может быть уменьшена на – 30-40 %.

2. Перед чертой – для бетона плотностью до 1300 кг/м<sup>3</sup> при  $\mu < 5$ ; после черты – для бетона плотностью более 1300 кг/м<sup>3</sup> или при  $\mu > 5$  (где  $\mu$  – модуль открытой поверхности, равный отношению площади открытой поверхности изделия в форме «S» к его объему «V», т.е.  $\mu = S/V$ ).

Продолжительность изотермического выдерживания бетона на портландцементе рекомендуется устанавливать по табл. 1.63.

Во избежание образования трещин в бетоне скорость снижения температуры в камере принимается в зависимости от толщины изделия:

при  $h < 100$  мм  $v = 30-40$  °С/ч;

при  $h < 100-200$  мм  $v = 20-30$  °С/ч;

при  $h < 200$  мм  $v = 10-20$  °С/ч.

Т а б л и ц а 1 . 6 3

## Продолжительность изотермического прогрева легкого бетона

Толщина изделия, см	Требуемая прочность после пропаривания, % от проектной	Продолжительность изотермического выдерживания, ч, при испытании контрольных образцов через		
		0,5 ч	4 ч	12 ч
Менее 10	60	-	3-4	2-3
	70	6-8	4-6	3-5
	80	10-13	8-11	6-9
10-30	70	7-9	5-7	4-6
	80	11-14	9-12	7-10
Более 30	70	9-11	7-9	6-8
	80	12-15	10-13	8-11

Распалубку конструкций следует производить только тогда, когда разница между температурой окружающей среды и температурой открытой поверхности бетона составляет не более  $t = 40^\circ\text{C}$ .

**Отпуск арматуры, распалубка и доводка изделий.** В связи с тем, что легкий бетон обладает повышенной деформативностью, отпуску натяжения арматуры должно предшествовать снятие или ослабление формообразующих вкладышей или других устройств, препятствующих свободному перемещению изделия относительно формы.

Распалубку изделий производят после достижения бетоном требуемой прочности при условии исключения случайных силовых факторов, которые могли бы повредить наружную поверхность изделия.

При распалубке крупногабаритных конструкций их следует устанавливать в рабочее положение с помощью специальных траверс или кантующих устройств.

#### 1.4.2. Оптимизация состава легкого конструкционного бетона и исследование факторов, влияющих на его свойства

Для подбора состава легкого бетона прочностью 30 МПа, минимальной плотности в качестве критерия оптимизации следует принять стоимость материалов на  $1\text{ м}^3$  бетонной смеси без затрат на приготовление.

Работа выполняется в следующей последовательности:

- назначение требований к бетону исходя из особенностей изготовления и эксплуатации конструкций;
- выбор исходных материалов для бетона и получение необходимых данных, характеризующих их свойства;
- ориентировочное определение состава легкого бетона;
- изготовление пробных замесов с разным расходом цемента;
- испытание опытных образцов и построение зависимостей прочности  $R_6 = f(\text{Ц})$  и плотности бетона  $\rho_6 = f(\text{ц})$  от расхода цемента;
- выбор оптимального состава легкого бетона.

### 1. Выбор факторов.

Известно, что на прочность и плотность легкого бетона определяющее влияние оказывает прочность легкого пористого заполнителя.

В качестве крупного заполнителя для получения бетонов были использованы три вида керамзитового гравия с различными характеристиками по насыпной плотности и прочности при сжатии в стандартном цилиндре. Прочность растворной составляющей легкого бетона зависит от таких факторов, как расход цемента и воды, содержание песка, которые, в свою очередь, определяют удобоукладываемость бетонной смеси. Немаловажное значение для обеспечения прочности и плотности легкого бетона имеет степень насыщения бетона крупным заполнителем.

С учетом вышеизложенного в качестве варьируемых параметров были приняты следующие факторы:

$X_1$  – расход цемента  $C$ , кг/м<sup>3</sup>;

$X_2$  – расход керамзита  $V$ , м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup>;

$X_3$  – расход воды  $B$ , л/м<sup>3</sup>;

$X_4$  – прочность керамзита  $R_{ц}$ , МПа.

При проведении опытов все факторы варьировались на трех уровнях (табл.1.64).

Т а б л и ц а 1 . 6 4

#### Условия проведения эксперимента

Уровень варьирования	Кодовое значение факторов	Физическое значение факторов			
		$C$ , кг/м <sup>3</sup>	$V$ , м <sup>3</sup> /м <sup>3</sup>	$B$ , л/м <sup>3</sup>	$R_{ц}$ , МПа
Верхний	+1	600	0,9	260	5,0
Нижний	-1	200	0,5	180	2,0
Основной	0	400	0,7	220	3,5

Для проведения эксперимента в качестве компонентов бетонной смеси использовались следующие материалы:

- портландцемент марки ПЦ500-Д<sub>0</sub>: нормальная густота – 26 %, сроки схватывания: НС – 2 ч 30 мин, КС – 7 ч 20 мин, плотность – 3,1 г/см<sup>3</sup>, удовлетворяет требованиям ГОСТ 10178–85, стоимость – 24 руб. за 1 т;

- песок природный кварцевый: средняя плотность – 1400 кг/м<sup>3</sup>, модуль крупности – 2,0, удовлетворяет требованиям ГОСТ 8736–85, стоимость – 2,36 руб. за 1 т;

- керамзитовый гравий трех марок (П100, П150, П300) с характеристиками, представленными в табл. 1.65, отвечает требованиям ГОСТ 9759–83, стоимость – 13 руб. за 1 м<sup>3</sup>.

- вода из промышленного водопровода, удовлетворяющая требованиям ГОСТ 23732–79.

Таблица 1.65

## Характеристика керамзитового гравия

Марка керамзита по прочности	Марка керамзита по средней плотности	Плотность, $\rho_k^k$ , кг/л	Результаты испытания	
			средняя плотность $\rho_k$ , кг/м <sup>3</sup>	прочность $R_{ц}$ , МПа
П100	600	1,05	540	2,0
П150	700	1,20	650	3,5
П200	800	1,30	730	5,0

## 2. Составление плана эксперимента.

Предполагаем, что зависимость плотности, прочности и стоимости от исследуемых факторов представлена в виде полинома второй степени

$$Y = r_0 + r_1X_1 + r_2X_2 + r_3X_3 + r_4X_4 + r_5X_5 + r_5X_1^2 + r_6X_2^2 + r_7X_3^2 + r_8X_4^2. \quad (1.81)$$

Коэффициенты в этом уравнении определялись с помощью полного факторного центрального композиционного планирования  $\alpha=1$  и  $\beta=0$ .

Матрицы такого планирования и результаты эксперимента представлены в табл. 1.66.

Показатели плотности, прочности и стоимости бетона взяты как средние по трем испытаниям.

## 3. Реализация плана и построение математических моделей.

В соответствии с планом проведения эксперимента (см. табл. 1.66) для каждого опыта рассчитывается состав бетона. Каждая бригада определяет расход материалов на 1 м<sup>3</sup> бетонной смеси для конкретного номера опыта, принимая постоянными заданные величины варьируемых факторов. Например, для первого опыта приняты постоянными:  $\Pi = 200$  кг/м<sup>3</sup>,  $V = 0,5$  м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup>,  $B = 260$  л/м<sup>3</sup>.

Бетонная смесь для первого опыта должна готовиться на керамзитовом гравии плотностью 730 кг/м<sup>3</sup> и прочностью при сжатии в цилиндре 5,0 МПа.

Определяем весовой расход пористого заполнителя на 1 м<sup>3</sup> бетона, зная объемное содержание крупного заполнителя в бетоне ( $V = 0,5$  м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup>) и среднюю плотность:

$$K = V \cdot \rho_k = 0,5 \cdot 730 = 363 \text{ кг/м}^3.$$

Расход мелкого заполнителя вычисляем по формуле

$$\begin{aligned} \Pi &= \left[ 1000 - \left( \frac{\Pi}{\rho_{\Pi}} + \frac{B}{\rho_B} + \frac{K}{\rho_k^k} \right) \right] \cdot \rho_{\Pi} = \\ &= \left[ 1000 - \left( \frac{200}{3,1} + \frac{260}{1} + \frac{365}{1,3} \right) \right] \cdot 2,65 = 1044 \text{ кг/м}^3. \end{aligned}$$

Таблица 1.66

## План проведения эксперимента

Номер опыта	Матрица планирования																Плотность бетона $\rho_6$ , кг/м <sup>3</sup>	Прочность бетона $R_6$ , МПа	Стоимость бетона $C \cdot 10^{-4}$ , руб.
	в кодovém выражении								в натуральном выражении										
	$X_0$	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$X_4$	$X_1^2$	$X_2^2$	$X_3^2$	$X_4^2$	$C$ , кг/м <sup>3</sup>	$V$ , м <sup>3</sup> /м <sup>3</sup>	$B$ , л/м <sup>3</sup>	$R_{ц}$ , МПа						
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17			
1	+1	-1	-1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	200	0,5	260	5,0	1845	7,4	13,75			
2	+1	+1	-1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	600	0,5	260	5,0	1832	24,8	22,55			
3	+1	-1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	200	0,9	260	5,0	1710	11,4	17,56			
4	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	600	0,9	260	5,0	1698	29,7	26,35			
5	+1	-1	-1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	200	0,5	180	5,0	1785	8,8	14,26			
6	+1	+1	-1	-1	+1	+1	+1	+1	+1	600	0,5	180	5,0	1870	32,2	23,06			
7	+1	-1	+1	-1	+1	+1	+1	+1	+1	200	0,9	180	5,0	1758	16,6	17,09			
8	+1	+1	+1	-1	+1	+1	+1	+1	+1	600	0,9	180	5,0	1800	42,9	26,85			
9	+1	-1	-1	+1	-1	+1	+1	+1	+1	200	0,5	260	2,0	1740	6,5	13,99			
10	+1	+1	-1	+1	-1	+1	+1	+1	+1	600	0,5	260	2,0	1755	22,0	22,71			
11	+1	-1	+1	+1	-1	+1	+1	+1	+1	200	0,9	260	2,0	1580	10,0	17,82			
12	+1	+1	+1	+1	-1	+1	+1	+1	+1	600	0,9	260	2,0	1750	23,6	26,63			
13	+1	-1	-1	-1	-1	+1	+1	+1	+1	200	0,5	180	2,0	1890	7,7	14,42			
14	+1	+1	-1	-1	-1	+1	+1	+1	+1	600	0,5	180	2,0	1860	25,4	23,21			
15	+1	-1	+1	-1	-1	+1	+1	+1	+1	200	0,9	180	2,0	1685	12,0	18,33			
16	+1	+1	+1	-1	-1	+1	+1	+1	+1	600	0,9	180	2,0	1727	24,5	27,12			
17	+1	-1	0	0	0	+1	0	0	0	200	0,7	220	3,5	1748	7,3	16,00			
18	+	+1	0	0	0	+1	0	0	0	600	0,7	220	3,5	1920	30,0	24,79			
19	+1	0	-1	0	0	0	+1	0	0	400	0,5	220	3,5	1830	24,5	18,48			
20	+1	0	+1	0	0	0	+1	0	0	400	0,9	220	3,5	1820	28,4	22,33			
21	+1	0	0	-1	0	0	0	+1	0	400	0,7	180	3,5	1800	21,8	20,65			
22	+1	0	0	+1	0	0	0	+1	0	400	0,7	260	3,5	1800	18,9	20,15			
23	+1	0	0	0	-1	0	0	0	+1	400	0,7	220	2,0	1900	20,0	20,52			
24	+1	0	0	0	+1	0	0	0	+1	400	0,7	220	5,0	1818	34,8	20,31			
25	+1	0	0	0	0	0	0	0	0	400	0,7	220	3,5	1840	33,0	20,40			

Аналогично производим расчеты составов бетона для других опытов в соответствии с планом проведения эксперимента. Данные по расходу материалов для приготовления 1 м<sup>3</sup> бетонной смеси и на замес заносим в табл. 1.67.

В ходе выполнения работы определяем плотность, прочность и стоимость бетона. Результаты эксперимента заносим в табл. 1.66.

Т а б л и ц а 1 . 6 7

Расход материалов для приготовления бетонной смеси

Номер опыта	Расход материалов на 1 м <sup>3</sup>				Расход материалов на замес (4 литра)			
	цемент, кг	керамзит, л	песок, кг	вода, л	цемент, кг	керамзит, л	песок, кг	вода, л
1	200	500	1046	260	0,8	2,0	4,2	1,04
2	600	500	702	260	2,4	2,0	2,8	1,04
3	200	900	451	260	0,8	3,6	1,8	1,04
4	600	900	110	260	2,4	3,6	0,4	1,04
5	200	500	1256	180	0,8	2,0	5,0	0,72
6	600	500	914	180	2,4	2,0	3,6	0,72
7	200	900	250	180	0,8	3,6	1,0	0,72
8	600	900	320	180	2,4	3,6	1,3	0,72
9	200	500	1140	260	0,8	2,0	4,6	1,04
10	600	500	765	260	2,4	2,0	3,1	1,04
11	200	900	560	260	0,8	3,6	2,2	1,04
12	600	900	23	260	2,4	3,6	0,9	1,04
13	200	500	1320	180	0,8	2,0	5,3	0,72
14	600	500	973	180	2,4	2,0	3,9	0,72
15	200	900	774	180	0,8	3,6	3,1	0,72
16	600	900	432	180	2,4	3,6	1,7	0,72
17	200	700	890	220	0,8	2,8	3,6	0,88
18	600	700	549	220	2,4	2,8	2,2	0,88
19	400	500	1010	220	1,6	2,0	4,0	0,88
20	400	900	435	220	1,6	3,6	1,7	0,88
21	400	700	827	180	1,6	2,8	3,3	0,72
22	400	700	615	260	1,6	2,8	2,5	1,04
23	400	700	770	220	1,6	2,8	3,1	0,88
24	400	700	684	220	1,6	2,8	2,7	0,88
25	400	700	720	220	1,6	2,8	2,9	0,88

Обработку экспериментальных данных производим на ЭВМ. Получаем математические зависимости плотности, прочности и стоимости легкого бетона от исследуемых факторов следующего вида:

$$\rho_6 = 250,3750 + 0,4460Ц + 629,7266V + 13,108B - 17,4179R_{ц} - 0,0004Ц^2 - 631,0156V^2 - 0,0314B^2 + 3,8882R_{ц}^2; \quad (1.82)$$

$$R_6 = -131,9648 + 0,1737Ц - 39,2299V + 1,2299B - 5,3156R_{ц} - 0,0001Ц^2 + 35,9201V^2 - 0,0000B^2 - 0,0032R_{ц}^2; \quad (1.83)$$

$$C = 43867,0 + 199,0Ц + 130331,0 - 8,8V - 516,0R_{ц} + 0,02Ц^2 - 13014,0V^2 - 0,1B^2 - 32,0R_{ц}^2.$$

Проверка полученных моделей по критерию Фишера подтвердила их адекватность.

Для моделей вида  $\rho_6 = f(X_1, X_2, X_3, X_4)$  гипотеза об адекватности не отвергается, так как  $F = 1,935 < F_{кр} = 2,089$ .

Для модели вида  $R_6 = f(X_1, X_2, X_3, X_4)$  гипотеза об адекватности не отвергается, так как  $F = 1,935 < F_{кр} = 2,089$ .

Для модели вида  $C = f(X_1, X_2, X_3, X_4)$  гипотеза об адекватности не отвергается, так как  $F = 1,935 < F_{кр} = 2,089$ .

Для наглядности полученные математические модели представлены в виде графических зависимостей (рис. 1.12, 1.13 и 1.14).

Аналогичные зависимости прочности бетона и его стоимости от исследуемых факторов приведены на рис. 1.15-1.20.

Все изолинии построены для постоянного значения фактора  $X_2$ -В.

По полученным изолиниям можно подобрать состав бетона необходимой прочности и плотности.

В качестве примера произведем подбор состава бетона марки 300 минимальной плотности.

Осуществим поиск необходимых изолиний плотности и прочности бетона. Принятое условие соответствует поставленной задаче подбора состава конструкционного высокопрочного бетона марки 300. Известно, что для получения высокопрочных легких бетонов марок 300 и выше прочность пористого заполнителя должна быть не менее 4,0-4,5 МПа.

Перенесем найденные изолинии на отдельный график (рис. 1.21) и определим область, удовлетворяющую заданному условию. Так, любая точка внутри области, ограниченной четырехугольником АБВГ, соответствует составу бетона прочностью 25-30 МПа и плотностью в пределах 1800-1850 кг/м<sup>3</sup>. С учетом стоимости материалов на 1 м<sup>3</sup> бетонной смеси можно выделить наиболее экономичную область АЕВГ.

Бетон марки 300 может быть получен при следующих значениях переменных факторов:

$$П = 260+360 \text{ кг/м}^3; V = 0,71+0,85; R_{ц} = 5,0 \text{ МПа.}$$

Таким образом, с помощью метода математического планирования эксперимента удалось подобрать состав бетона марки 300 минимальной плотности и стоимости.

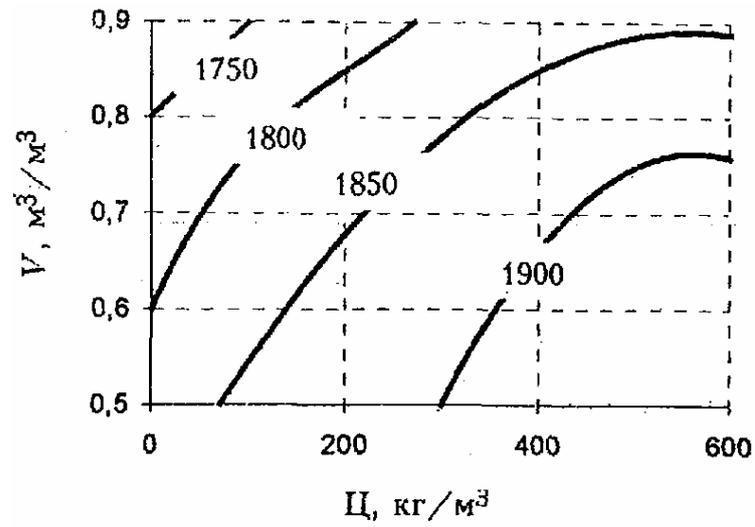


Рис.1.12. Изолинии изменения плотности бетона при  $X_4=2,0$

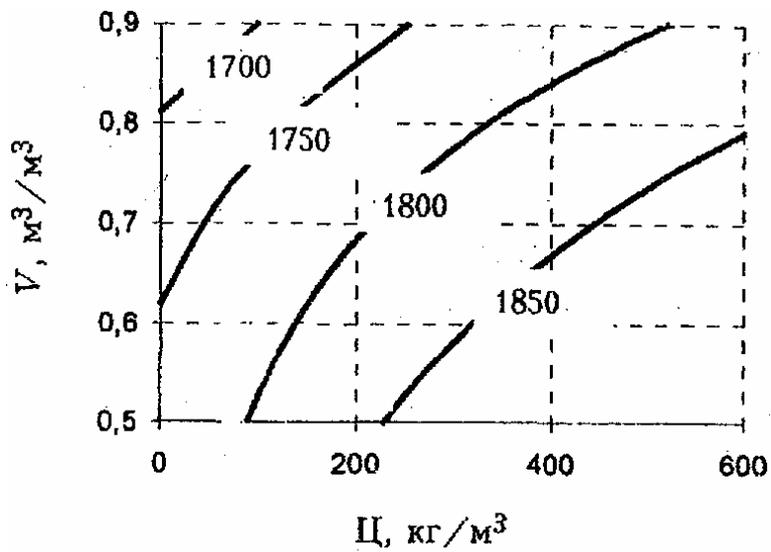


Рис.1.13. Изолинии изменения плотности бетона при  $X_4=3,5$

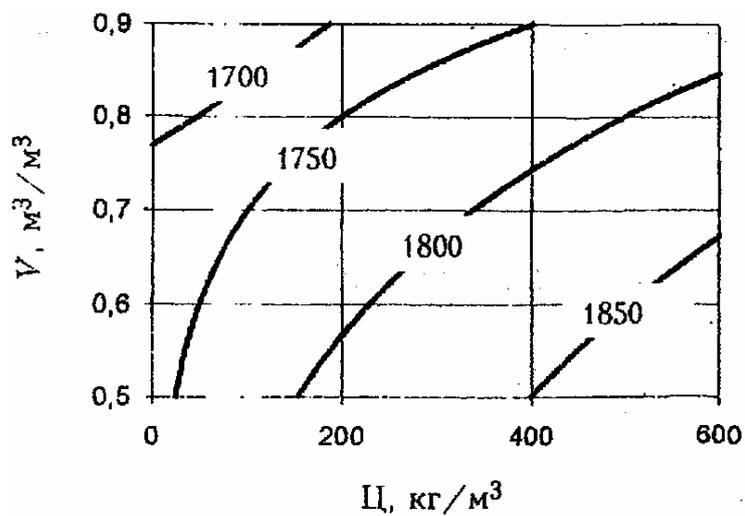


Рис.1.14. Изолинии изменения плотности бетона при  $X_4=5$

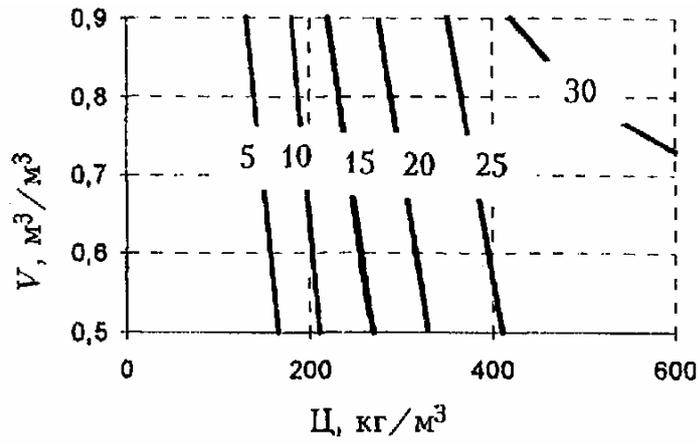


Рис.1.15 Изолинии изменения плотности бетона при  $X_4=2,0$

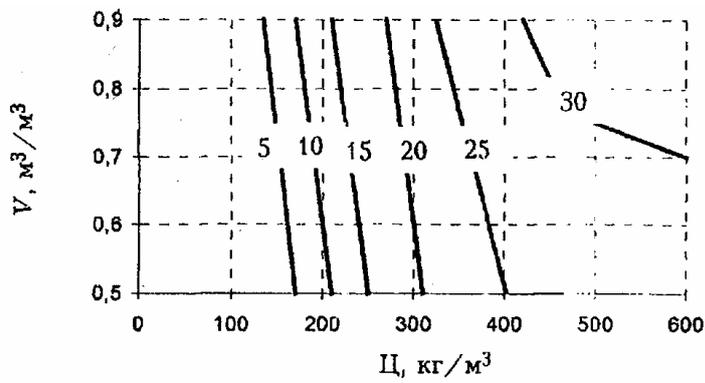


Рис.1.16. Изолинии изменения плотности бетона при  $X_4=3,5$

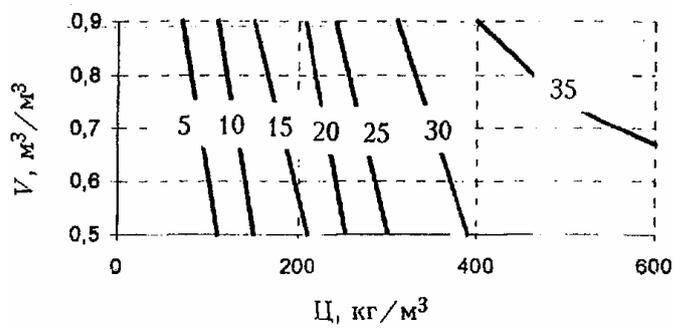


Рис.1.17. Изолинии изменения плотности бетона при  $X_4=5$

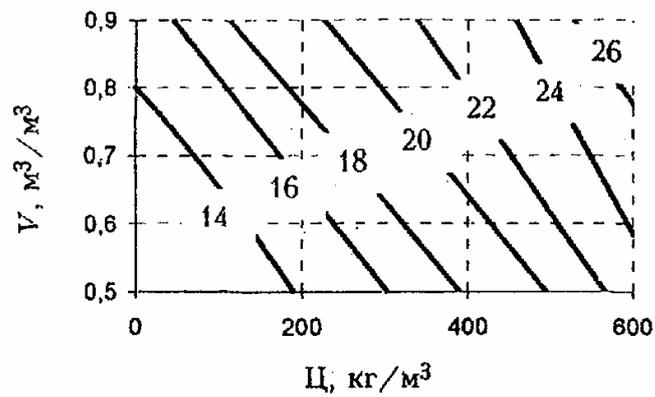


Рис.1.18. Изолинии изменения плотности бетона при  $X_4=2$

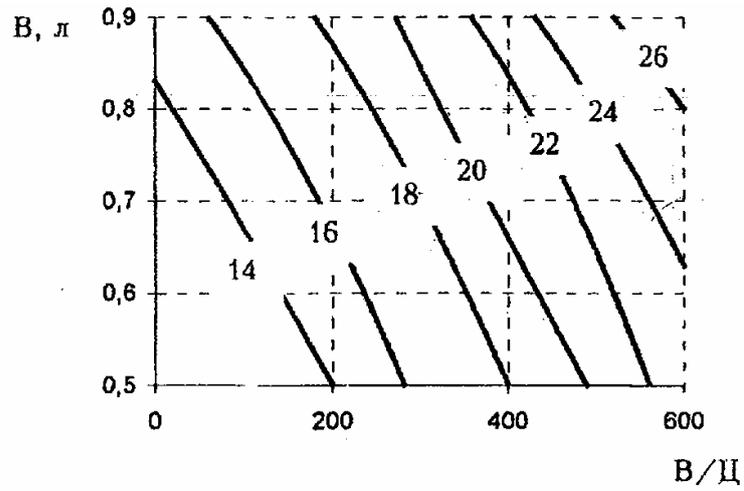


Рис.1.19. Изолинии изменения плотности бетона при  $X_4=3$

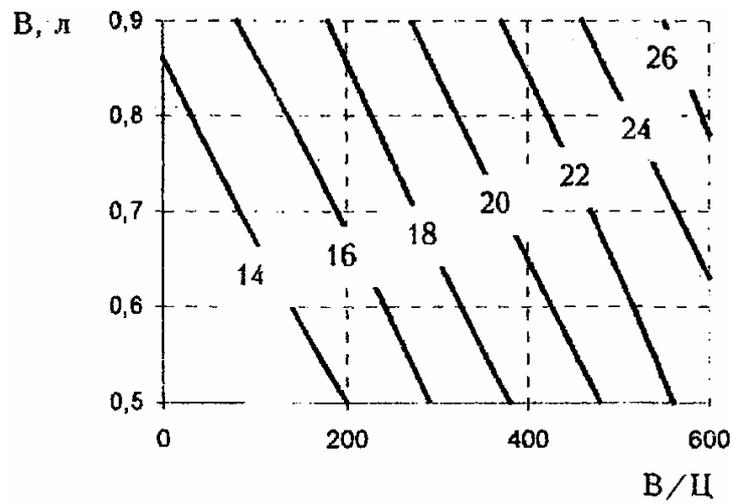


Рис.1.20. Изолинии изменения плотности бетона при  $X_4=5$

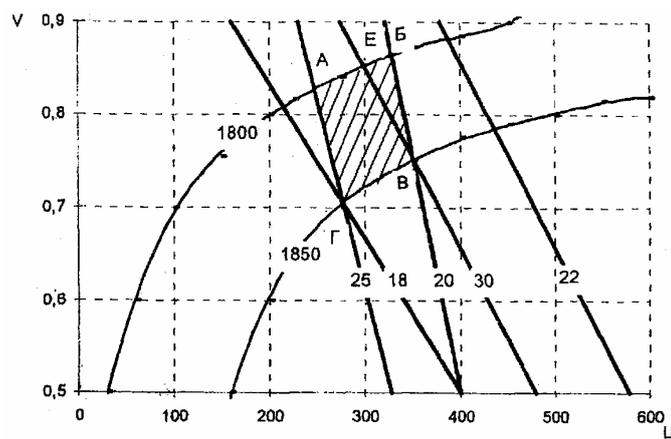


Рис.1.21. Изолинии изменения плотности, прочности и стоимости бетона для нахождения заданного состава бетона

## 1.5. Выбор химических добавок для производства бетонных и железобетонных изделий. Оценка эффективности добавок

Для регулирования свойств бетонной смеси и бетона, а также экономии цемента в бетон при приготовлении вводят различные виды добавок. Вводимые в незначительных количествах – в десятых долях процента по отношению к массе цемента – они существенно влияют на скорость химических процессов твердения бетона, обеспечивают улучшение его механических и физико-технических свойств. Номенклатура химических добавок и рекомендации по их применению регламентированы ГОСТ 24211–2008. В табл. 1.68 приведен перечень добавок, применяемых в строительстве, а в табл. 1.69 – показатели основного эффекта действия и критерии эффективности добавок.

Т а б л и ц а 1.68

### Перечень добавок, применяемых в строительстве

Вид и наименование добавки	Условная марка	Нормативный документ
1	2	3
<b>1. Пластификаторы, водоредуцирующие добавки</b>		
Разжижитель С-3	С-3	ТУ 6-36-020429-625
Дофен	ДФ	ТУ 14-6-55
10-03	10-03	ТУ 44-3-874
Меламинформальдегидная анионоактивная смола МФ-АР	МФ-АР МКФ-АР	ТУ 6-05-1926
НКНС 40-03	40-03	ТУ 38-4-0258
Разжижитель СМФ	СМФ	ТУ 6-14-929
Лигносульфоната технические	ЛСТ	ТУ 13-0281036-05
Лигносульфоната технические модифицированные ЛТМ	ЛТМ	ТУ 480-2-4
Лигносульфоната технические модифицированные ЛСТМ-2	ЛСТМ-2	ТУ 13-0281036
Пластификатор МТС-1	МТС-1	ТУ 67-542
Меласная упаренная после дрожжевая барда	УПБ	ОСТ 18-126
Водорастворимый препарат	ВРП-1	ТУ 64.11.02
Водорастворимый препарат ВРП-Э <sub>50</sub>	ВРП-Э <sub>50</sub>	ТУ 64.11.02
Пластификатор Монолит-1	М-1	ТУ 69 БСССР 350
Полисопряженный полимерный фенол	ПФп	ТУ УзССР 33ПБ-02
Плав дикарбонатных кислот	ПДК	Ту 6-03-20-70
Щелочный сток производства капролактама	ЩСПК ЩСПК <sub>м</sub>	ТУ 113-03-488 ТУ 113-03-616
Нейтрализованный черный контакт	НЧК	Ту 38-602-22-18
Черный нейтрализованный рафинированный контакт	КЧНР	ТУ 38-602-22-17
Этилсиликонат натрия	ГКЖ-10	ТУ 6-02-696
Метилсиликонат натрия	ГКЖ-11	ТУ 6-02-696
Понижитель вязкости фенольный лесохимический	ПФЛХ	ТУ 81-05-71

Продолжение табл. 1.68

1	2	3
Подмыленный щелок	ПМЩ	ТУ 18 РСФСР 780
Поверхностно-активная добавка ЛХД	ЛХД	ТУ 13-4000177-128
<b>2. Стабилизирующие, водоудерживающие и улучшающие перекачиваемость добавки</b>		
Полиэтиленоксид, полиоксиэтилен	ПОЭ	ТУ 6-05-231-340
Метилцеллюлоза	МЦ	ТУ 6-05-1857
Гипан	ГП	ТУ 6-01-166
Добавки, замедляющие схватывание бетонных смесей и твердение бетона		
Лигносульфаты технические	ЛСТ	ТУ 13-0281036-05
Нитрилотриметиленфосфоновая кислота: раствор кристаллический порошок	НТФ	ТУ 6-02-1171
Кормовая сахарная патока (меласса)	КП	ТУ 18 РСФСР 409
Кремнийорганическая жидкость 113-63 (ФЭС-66)	ФЭС	ТУ 6-02-995
<b>3. Добавки, ускоряющие схватывание бетонных смесей и твердение бетона</b>		
Лигносульфаты технические	ЛСТ	ТУ 13-0281036-05
Нитрилотриметиленфосфоновая кислота: раствор кристаллический порошок	НТФ	ТУ 6-02-1171
Кормовая сахарная патока (меласса)	КП	ТУ 18 РСФСР 409
<b>4. Добавки, ускорение схватывание бетонных смесей и твердение бетона</b>		
Поташ (калий углекис-лый, карбонат кальция)	П	ГОСТ 10690
Хлорид кальция	ХК	ГОСТ 450-
Нитрат кальция	НК	ГОСТ 4142-
Нитрит-нитрат кальция	ННК	ТУ 6-18-194-
Нитрит-нитрат-хлорид кальция	ННХК	ТУ 6-18-194-
Хлорид натрия	ХН	ГОСТ13830
		ТУ 6-13-5
		ТУ6-13-14
Сульфат натрия (натрий сернокислый)	СН	ГОСТ 6318
		ТУ 38-10742
Карбамид (мочевина)	М	ГОСТ 2081
Тринатрийфосфат	ТНФ	ГОСТ 201
		ТУ 6-08-250
<b>5. Добавки, кольматирующие поры</b>		
Полиаминная смола №89	С-89	ТУ 6-05-1224
Алифатическая эпоксидная смола	ДЭГ-1	ТУ 6-05-1823
	ТЭГ-1	ТУ 6-05-1823
Сульфат алюминия	СА	ГОСТ 11159
Сульфат железа	СЖ	ГОСТ 4148
		ГОСТ 9485
Хлорид железа	ХЖ	ГОСТ 4147
		ГОСТ 11159
<b>6. Газообразующие добавки</b>		
Полигидросилоксаны	136-41 (ГКЖ-94)	ГОСТ 10834
	136-157М (ГКЖ-94М)	ТУ 6-02-694
Пудра алюминиевая	ПАК	ГОСТ 5494
	ПАП-1	

## Окончание табл. 1.68

1	2	3
<b>7. Воздухововлекающие добавки</b>		
Смола воздухововлекающая пековая	СВП	ТУ 13-0281078-216
Клей таловый пековый	КТП	ОСТ 13-145
Клей таловый омыленный	ОТП	ОСТ 13-145
Смола древесная омыленная	СДО	ТУ 13-05-02
Вспомогательный аппарат	ОП	ГОСТ 8433
Щелочной сток производства капролактама	ЩСПК	ТУ 113-03-488
	ЩСПК <sub>м</sub>	ТУ 113-03-616
Нейтрализованный черный контакт	НЧК	ТУ 38-602-22-18
Черный нейтрализованный рафинированный контакт	КЧНР	ТУ38-602-22-17
Этилсиликонат натрия	ГКЖ-10	ТУ 6-02-696
Метилсиликонат натрия	ГКЖ-11	ТУ 6-02-696
Понизитель вязкости лесохимический	ПФХЛ	ТУ 81-05-71
Подмыленный щелок	ПМЩ	ТУ 18 РСФСР 780
Поверхностно-активная добавка ЛХД	ЛХД	ТУ 13-4000177-128
<b>8. Пенообразующие добавки</b>		
Сульфонол	С	ТУ 6-01-1001-77
<b>9. Противоморозные добавки</b>		
Нитрит натрия	НН	ГОСТ 19906
		ТУ 98.10274
Хлорид натрия	ХН	ГОСТ 13830
		ТУ 6-13-14
Поташ	П	ГОСТ 10690
Хлорид кальция	ХК	ГОСТ 450
Нитрит-нитрат кальция	ННК	ТУ 6-18-194
Мочевина	М	ГОСТ 2081
Нитрит-нитрат хлорид натрия	ННХК	ТУ 6-18-194
<b>10. Добавки, повышающие защитные свойства бетона к арматуре</b>		
Нитрит натрия	НН	ГОСТ 19906
		ТУ 38-10274
Тетраборат натрия	ТБН	ГОСТ 8429
Бихромат натрия	БХН	ГОСТ 2651
Бихромат калия	БХК	ГОСТ 2652
Катапин-ингибатор	КИ-1	ТУ 6-01-4089387-34
<b>11. Гидрофобизирующие добавки</b>		
Фенилэтоксисилоксан	113-63 (бывш. ФЭС-50)	ТУ 6-02-995
Алюмометилсиликонат натрия	АМСР-3	ТУ 6-02-700
Полигидросилоксаны	136-41 (ГКЖ-94)	ГОСТ 10834
	136-157М (ГКЖ-94М)	ТУ 6-02-694
Этилсиликонат натрия	ГКЖ-10	ТУ 6-02-696
Метилсиликонат	ГКЖ-11	ТУ 6-02-696

Таблица 1.69

## Показатели основного эффекта действия и критерии эффективности добавок

Классы и подклассы добавок	Основной эффект действия добавок в смесях, бетонах и растворах	Показатель основного эффекта действия добавок	Критерий эффективности добавок	Возможные дополнительные эффекты действия добавок
1	2	3	4	5
<b>1. Добавки, регулирующие свойства бетонных и растворных смесей</b>				
1.1. Пластифицирующие смеси	Пластификация смесей	Увеличение подвижности (при снижении прочности бетона и раствора не более чем на 5 %): – бетонной смеси – растворной смеси	От П1 (ОК = 2÷4 см) до П5 От П <sub>к</sub> 1 (П <sub>к</sub> = 2-4 см) до П <sub>к</sub> 4	Замедление схватывания смесей и твердения бетонов и растворов в ранние сроки; увеличение расслаиваемости смесей; воздухововлечение; повышение деформаций усадки и ползучести бетонов и растворов
1.1.1. Суперпластифицирующие		Увеличение подвижности (при снижении прочности бетона и раствора не более чем на 5 %): – бетонной смеси – растворной смеси	От П1 (ОК = 2÷4 см) до П2-П4 От П <sub>к</sub> 1 (П <sub>к</sub> = 2 – 4 см) до П <sub>к</sub> 2 – П <sub>к</sub> 3	
1.1.2. Пластифицирующие		Уменьшение количества воды затворения	Более 20 %	Снижение расслаиваемости смесей и проницаемости бетонов и растворов; повышение прочности, морозостойкости и коррозионной стойкости, снижение деформаций усадки и ползучести бетонов и растворов
1.2. Водоредуцирующие	Снижение водопотребности смесей			
1.2.1. Суперводоредуцирующие			От 7 до 20 %	
1.2.2. Водоредуцирующие				

Продолжение табл. 1.69

1	2	3	4	5
1.3 Стабилизирующие	Снижение расслаиваемости смесей	Снижение раствооротделения и/или водоотделения смесей	В 2 раза и более	Повышение водоудерживающей способности и однородности, улучшение перекачиваемости, замедление схватывания, изменение удобоукладываемости смесей; повышение однородности, замедление твердения бетонов и растворов
1.4. Регулирующие сохраняемость подвижности	Изменение времени сохранения подвижности смесей	Увеличение или снижение времени сохранения первоначальной подвижности смесей	В 1,5 раза и более	Изменение кинетики нарастания прочности и тепловыделения бетонов и растворов; образование высолов
1.5. Увеличивающие воздухо- (газо) содержание Воздухововлекающие, газообразующие, пенообразующие	Вовлечение воздуха, газовыведение	Увеличение объема воздуха (газа) в смесях тяжелых и мелкозернистых бетонов и растворов Обеспечение требуемого объема вовлеченного воздуха (выделившегося газа) в смесях легких конструктивных бетонов Потери вовлеченного воздуха (выделившегося газа) от его общего количества	На 2-6 %  От 1,5 до 6 %  ≤ 10 %	Изменение подвижности, снижение расслаиваемости смесей; повышение коррозионной стойкости и морозостойкости, изменение водопоглощения и водонепроницаемости, снижение прочности бетонов; снижение плотности и теплопроводности легких и ячеистых бетонов

Продолжение табл. 1.69

1	2	3	4	5
		<p>Обеспечение требуемого объема вовлеченного воздуха в смесях легких конструкционно-теплоизоляционных и теплоизоляционных бетонов</p> <p>Потери вовлеченного воздуха от его общего количества</p> <p>Обеспечение требуемого объема вовлеченного воздуха (выделившегося газа) в ячеистобетонных смесях</p> <p>Обеспечение значения коэффициента использования порообразующей добавки</p>	<p>Свыше 6 до 30 %</p> <p>&lt; 20 %</p> <p>От 15 до 90 %</p> <p><math>\geq 0,7</math></p>	
<b>2. Добавки, регулирующие свойства бетонов и растворов</b>				
<p>2.1 Регулирующие кинетику твердения</p> <p>2.1.1 Ускорители</p> <p>2.1.2 Замедлители</p>	<p>Ускорение процесса твердения бетонов и растворов</p> <p>Замедление процесса твердения бетонов и растворов</p>	<p>Увеличение прочности бетонов и растворов:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– в возрасте 1 сут нормального твердения</li> <li>– после тепловлажностной обработки</li> </ul> <p>Снижение прочности бетонов и растворов в возрасте 1, 2 или 3 сут нормального твердения при снижении прочности в возрасте 28 сут не более чем на 5 %</p>	<p>На 30 % и более</p> <p>На 20 % и более</p> <p>На 30 % и более</p>	<p>Повышение электропроводности смесей, бетонов и растворов; увеличение скорости тепловыделения бетонов и растворов; образование высолов</p> <p>Повышение подвижности смеси и ее сохраняемости; снижение скорости тепловыделения бетонов и растворов</p>

Продолжение табл. 1.69

1	2	3	4	5
2.2 Повышающие прочность	Повышение прочности бетонов и растворов в проектном возрасте	Увеличение прочности бетонов и растворов в проектном возрасте	На 20 % и более	Снижение проницаемости, повышение коррозионной стойкости, снижение усадки и ползучести бетонов и растворов
2.3 Снижающие проницаемость	Снижение проницаемости бетонов и растворов	Увеличение марки бетонов и растворов по водонепроницаемости Снижение коэффициента диффузии	На 2 марки и более  В 10 раз и более	Изменение удобоукладываемости смесей; увеличение прочности, повышение коррозионной стойкости и морозостойкости бетонов и растворов и их защитного действия по отношению к стальной арматуре
2.4 Повышающие защитные свойства по отношению к стальной арматуре (ингибиторы)	Усиление защитного действия бетонов и растворов по отношению к стальной арматуре	Отсутствие коррозии арматуры	Плотность тока пассивации стали не более 10 мА/см <sup>2</sup> при потенциале + 300 мВ	Увеличение подвижности смесей; снижение проницаемости, увеличение электропроводности бетонов и растворов
2.5 Повышающие морозостойкость	Повышение стойкости бетонов и растворов в условиях многократного попеременного замораживания и оттаивания	Повышение морозостойкости бетонов и растворов	На 2 марки и более	Снижение плотности, изменение прочности, проницаемости и водопоглощения бетонов и растворов

Продолжение табл. 1.69

1	2	3	4	5
2.6 Повышающие коррозионную стойкость	Повышение коррозионной стойкости бетонов и растворов в условиях воздействия различных агрессивных сред	Увеличение стойкости бетонов и растворов по отношению: – к коррозионно-активным средам – к внутренней коррозии	В 1,5 раза и более Обеспечение деформаций расширения не более 0,04 %	Изменение технологических свойств смесей и физических свойств бетонов и растворов
2.7 Расширяющие	Получение безусадочных и расширяющихся бетонов и растворов	Компенсация усадки, обеспечение деформаций расширения бетонов и растворов	Обеспечение деформаций расширения 0,2 % и более	Снижение времени сохранения прочности добукладываемости смесей; увеличение скорости тепловыделения, ускорение схватывания, снижение проницаемости, повышение прочности, коррозионной стойкости, морозостойкости и трещиностойкости бетонов и растворов
<b>3. Добавки, придающие бетонам и растворам специальные свойства</b>				
3.1 Противоморозные 3.1.1 Противоморозные для «холодного» бетона и раствора	Обеспечение твердения бетонов и растворов при их отрицательных температурах	Набор прочности бетонами и растворами в возрасте 28 сут	30 % и более контрольного состава нормального твердения	Снижение времени сохранения прочности добукладываемости смесей; повышение электропроводности бетонов и растворов; образование высолов

Окончание табл. 1.69

1	2	3	4	5
3.1.2 Противоморозные для «теплого» бетона и раствора	Обеспечение защиты смесей от замерзания на время от ее изготовления до укладки и подачи внешнего тепла		95 % и более контрольного состава нормального твердения	
3.2 Гидрофобизирующие	Придание бетонам и растворам водоотталкивающих свойств	Снижение водопоглощения бетонов и растворов Гидрофобизирующая способность добавки	В 2 раза и более	Снижение скорости тепловыделения, замедление скорости схватывания и твердения, снижение прочностных показателей, повышение морозостойкости и коррозионной стойкости бетонов и растворов
			По ГОСТ 10834	

Добавки, применяемые для модифицирования свойств смесей, бетонов и растворов, в зависимости от основного эффекта действия подразделяют на классы.

*Добавки, регулирующие свойства бетонных и растворных смесей:*

- пластифицирующие;
- суперпластифицирующие,
- водоредуцирующие;
- суперводоредуцирующие;
- стабилизирующие;
- регулирующие сохраняемость подвижности;
- увеличивающие воздухо- и газосодержание.

*Добавки, регулирующие свойства бетонов и растворов:*

- регулирующие кинетику твердения:
- ускорители,
- замедлители;
- повышающие прочность;
- снижающие проницаемость;
- повышающие защитные свойства по отношению к стальной арматуре;
- повышающие морозостойкость;
- повышающие коррозионную стойкость;
- расширяющие.

*Добавки, придающие бетонам и растворам специальные свойства:*

- противоморозные: для «холодного» бетона, для «теплого» бетона;
- гидрофобизирующие.

*Минеральные добавки* в зависимости от характера взаимодействия с продуктами гидратации цемента подразделяют на типы;

- тип I – активные минеральные;
- тип II – инертные минеральные.

*Активные минеральные добавки* подразделяют на следующие группы:

- обладающие вяжущими свойствами;
- обладающие пуццолановой активностью;
- обладающие одновременно вяжущими свойствами и пуццолановой активностью.

Условное обозначение добавки должно содержать наименования добавки и класса, к которому она относится.

### 1.5.1. Тестирование суперпластификаторов, цементов и каменной муки по растекаемости суспензий

Для определения физико-технических характеристик сырьевых материалов проводится анализ отдельных материалов с целью определения их пригодности для производства порошково-активированных бетонов нового поколения марок М250-М700 со снижением расхода цемента в 1,5-2,0 раза.

Порошково-активированные песчаные и щебеночные бетоны нового поколения отличаются наличием значительного количества дисперсных наполнителей (каменной муки) в виде молотых горных пород (кварцевого песка, гранита, диабазы, базальта, известняка и др.). Содержание дисперсных наполнителей по массе находится в пределах 50-100 % и более от массы цемента в зависимости от расхода цемента:

- в малоцементных бетонах с расходом цемента 150-200 кг/м<sup>3</sup> – от 100 до 110 %;
- в бетонах с расходом цемента 250-350 кг/м<sup>3</sup> – 75-90 %;
- в бетонах с расходом цемента 350-450 кг/м<sup>3</sup> – от 55 до 70 %.

В бетонах старого поколения дисперсные наполнители вводились в бетоны для замещения цемента в количестве 10-20 %, а в бетонах переходного поколения с суперпластификаторами замещалось до 20-30 %.

Цемент и каменная мука, как дисперсная фаза, образуют с дисперсионной средой (водой) суспензию, а густые (концентрированные) дисперсные суспензии под действием поверхностно-активного вещества (ПАВ), которым является суперпластификатор (СП), разжижают (пластифицируют) и превращают их в жидкотекучие. Бетонные смеси, содержащие большой объем такой суспензии, становятся высокопластичными, удобоукладываемыми и саморастекающимися. Бетоны даже с малым количеством цемента, но с большим содержанием каменной муки, образуют большой объем суспензий, зерна мелкого заполнителя и щебня раздвигаются друг от друга и хорошо перемещаются без зацепления в жидкообразной суспензии.

В бетонах старого поколения с расходом цемента 400 кг на 1 м<sup>3</sup> бетонной смеси, с осадкой конуса 10 см прочность бетона составляет 50 МПа, а в бетонах нового поколения с расходом цемента 220 кг на 1 м<sup>3</sup> и расходом каменной муки 180 кг на 1 м<sup>3</sup> бетонной смеси, с той же осадкой конуса получается та же прочность бетона. В связи с этим, чем лучше суперпластификатор, чем лучше цемент реагирует на пластифицирующее действие суперпластификатора, тем подвижнее бетонные смеси, тем плотнее и прочнее становятся бетоны. Поэтому необходимо оценивать (тестировать) суперпластификаторы, цементы и каменную муку по растекаемости суспензий.

Для оценки реологической активности каменной муки дробленый щебень фракции 0-5 мм подвергают помолу в шаровой мельнице до удельной поверхности  $S_{уд}=3000-4000 \text{ см}^2/\text{г}$ , которую определяют на приборе ПСХ-10.

Окончательной оценкой качества каменной муки являются достижение необходимого расплыва водной суспензии муки и цемента с суперпластификатором, а также определение водоредуцирующего эффекта. Для этого вначале определяется расплыв суспензии цемента с водой, затем – количество воды от массы цемента для получения расплыва суспензии из конуса Хагерманна (конус от встряхивающего столика по ГОСТ 310.4-81), равного 280-320 мм. Методика чрезвычайно проста, и эксперимент занимает по времени 8-10 мин. Для этого конус устанавливается на стекло с размерами 40×40 см, под которым находится лист ватмана с концентрическими окружностями, начиная с диаметра 130 мм и далее до 380 мм через каждые 10 мм. Отвешивается 1 кг цемента и постепенно высыпается в цилиндрическую емкость с водой при перемешивании миксером. Общее время перемешивания при скорости 500-600 оборотов в минуту составляет 5 минут. Количество воды принимается от 400 до 500 мл и зависит от вида цемента. Обычно В/Ц-отношение составляет от 0,4 до 0,5. После перемешивания суспензия выливается в конус вровень с краями, и конус медленно поднимается на высоту 4-5 см от стекла. Для обычной непластифицированной суспензии растекание смеси составляет 2-3 секунды. Если диаметр расплыва находится в пределах 280-320 мм, то этот расплыв принимается за эталонный. При значении расплыва, большем или меньшем эталонного, эксперимент повторяется с соответствующей корректировкой воды.

Повторный эксперимент проводится на пластифицированной суспензии. Для этого отвешивается 1000 г цемента. В мерный цилиндр заливается 200 мл воды с растворенным в ней суперпластификатором в количестве 0,8-1,0 % от массы цемента. В качестве суперпластификаторов необходимо использовать эффективные зарубежные гиперпластификаторы на поликарбонатной основе: Melflux2641 или 5581, возможно SikoViskoCreate. Использование высокоэффективных суперпластификаторов – основа получения бетонов нового поколения.

Таким образом, в воду затворения с суперпластификатором при перемешивании постепенно высыпается портландцемент, и по истечении 5 минут смешивания суспензия выливается в конус.

После определения расплыва, который, в отличие от суспензии без СП, продолжается не менее 30 секунд, необходимо определять водоредуцирующий (водопонижающий) эффект:

$$V_{\text{эф}} = \frac{(В/Ц)_{\text{н}}}{(В/Ц)_{\text{п}}},$$

где  $(В/Ц)_{\text{н}}$  и  $(В/Ц)_{\text{п}}$  – водоцементное отношение непластифицированной и пластифицированной суспензий при одинаковом расплыве диаметром 280-320 мм.

Поликарбоксилатные гиперпластификаторы обеспечивают при В/Ц 0,18-0,2 расплывы суспензий диаметром 280-230 мм на цементах различных производителей и водоредуцирующий эффект от 2 до 2,8, т.е. снижают расход воды в 2-2,5 раза.

После тестирования растекаемости цемента вторым этапом является оценка растекаемости суспензии из композиции двух порошков – цемента и каменной муки. Соотношение «цемент:каменная мука» по массе должно быть 1:0,5 и 1:1. Если при этом расплывы таких композитных суспензий и цементной суспензии будут одинаковыми при равном количестве воды, то приходим к выводу, что мука не ухудшает способности цемента разжижаться под действием СП. Если же при одинаковых расплывах цементно-минеральная суспензия потребует меньшего количества воды, то, следовательно, мука усиливает действие суперпластификатора и является наиболее приемлемой в качестве реалогически активной добавки.

Если цементно-минеральная суспензия потребует большого количества воды для обеспечения (достижения) одинакового расплыва с цементной суспензией, то использование такой муки становится возможным лишь в том случае, если возрастание расхода воды не превышает 10-15 % по сравнению с цементной.

В качестве примера, поясняющего методику оценки каменной муки из молотого известняка, приведены результаты эксперимента с тестированием суспензии цемента и суспензии цемента с известняковой мукой с  $S_{уд}=3200 \text{ см}^2/\text{г}$ . Результаты представлены в табл. 1.75.

Т а б л и ц а 1 . 7 5

Тестирование суспензии цемента и суспензии цемента  
с известняковой мукой

Состав суспензии	Расход компонентов, г	$(В/Ц)_н$ $(В/Т)_н$	Расплав с ГП, мм	Расплав без ГП, мм	$V_{эф}$
1. Цемент 2. Вода	600 270	$(В/Ц)_н=0,45$	-	285	
1. Цемент 2. Вода 3. Melflux5581 (1 % Ц.)	1000 215 10	$(В/Ц)_н=0,215$	300	-	2,15
1. Цемент 2. Известняковая мука с $S_{уд}=3200 \text{ см}^2/\text{г}$ 3. Вода	300 300 270	$(В/Т)_н=0,45$		285	
1. Цемент 2. Известняковая мука с $S_{уд}=3200 \text{ см}^2/\text{г}$ 3. Melment 5581 (1,0 % Ц) 4. Вода	500 500 5 190	$(В/Т)_н=0,19$	310	-	2,33

Как следует из табл. 1.75, суспензия из двух порошков – цемента и известняковой муки с гиперпластификатором Melflux5581 – требует меньшего количества воды для получения одинакового расплыва. Водоредуцирующий (водопонижающий) эффект гиперпластификатора на этой суспензии на 11 % выше по сравнению с на цементной суспензией. Таким образом, известняк для изготовления известняковой муки относится к I категории. С использованием этой каменной муки можно будет изготавливать не только малопластичные и жесткие бетонные смеси, но и самоуплотняющиеся и саморастекающиеся.

Соотношение цемент:известняковая мука, равное 1:1, будет использоваться для изготовления бетонов, не превышающих марку М300. Наиболее употребительными в бетонах будут соотношения 1:0,75 и 1:0,5. При таких соотношениях реотехнологический показатель расплыва суспензий практически не меняется.

#### Лабораторная работа №6 ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПЛАСТИФИЦИРУЮЩИХ ДОБАВОК

*Цель работы* – исследовать влияние пластифицирующих добавок на свойства бетонной смеси и бетона, определить эффективность действия и оптимальную дозировку добавок; исследовать изменение прочности бетона во времени в зависимости от вида и количества добавки ускорителя процесса твердения бетона.

*Применяемое оборудование и материалы:*

- цилиндры мерные вместимостью 1, 5 и 10 л;
- лабораторные гирные или циферблатные весы;
- гидравлический пресс с усилием от 100 до 3000 кН;
- мензурки;
- виброплощадка;
- стандартный конус для определения подвижности бетонной смеси (ГОСТ 10181.1–81);
- консистометр для определения жесткости бетонной (ГОСТ 10181.1–81);
- секундомер;
- стандартные формы для кубов с размером ребра 10 см.

*Содержание работы.* Эффективность добавок определяют сравнением показателей качества бетонной смеси и бетонов контрольного и основного составов. (Бетон контрольного состава – бетон без добавок; бетон основного состава – бетон контрольного состава с оптимальной дозировкой добавки).

Исследование эффективности добавок следует начинать с деления основного положительного эффекта, для достижения которого добавка

предназначена. Ориентировочные границы оптимальных дозировок добавок приведены в табл. 1.70.

Т а б л и ц а 1 . 7 0

Ориентировочные границы оптимальных дозировок добавок

Вид добавки по ГОСТ 24211–2008	Ориентировочное значение оптимальной дозировки, % от массы цемента в пересчете на сухое вещество или на 100 % продукт
Пластифицирующие: I группа	0,3-1,5
II-IV группы	0,005-1,0
Стабилизирующая и водоудерживающая водорастворимая полимерная	0,005-0,2
Улучшающая перекачиваемость	0,01-0,2
Замедляющая схватывание и твердение	0,02-0,3
Воздухововлекающая, пенообразующая (для легкобетонных смесей)	0,05-0,4
Ускоряющая схватывание и твердение	0,5-2,5
Водоредуцирующие I группа	0,3-1,5
II-IV группы	0,005-1,0
Кольматирующая поры неорганическая соль	1,0-3,0
смола на основе битума	3,0-10,0
Газообразующая	0,01-0,1
Воздухововлекающая (для повышения стойкости бетона)	0,005-0,35
Повышающая защитные свойства бетона по отношению к стальной арматуре	2,0-2,5
Противоморозная	3,0-15,0*
Гидрофобизирующая I-III групп	0,2-2,0

\*Величина дозировки зависит от температуры окружающей среды и находится в обратной пропорциональной зависимости от нее.

При исследовании эффективности добавок различного назначения осадку конуса бетонных смесей контрольного и основного составов назначают в зависимости от вида добавки в соответствии с требованиями ГОСТ 24211–008 и табл. 1.71.

Таблица 1.71

Вид добавки по ГОСТ 24211–2008	Марка бетонной смеси по удобоукладываемости по ГОСТ 7473–2010 для составов	
	контрольного	основного
Пластифицирующие, группа		
I	П1 (2-4 см)	П5
II	То же	П4
III	–	П3
IV	–	П2
Стабилизирующая	–	П5
Водоудерживающая	–	П5
Улучшающая перекачиваемость	П3	П3
Регулирующая сохраняемость бетонных смесей (замедляющая или ускоряющая схватывание)	П3	П3
Воздухововлекающая, пенообразующая или газообразующая (для легкого бетона)	П1	П1
Замедляющая и ускоряющая твердение	П1	П1
Водоредуцирующая I-IV групп	П1	П1
Кольматирующая поры	П1	П1
Газообразующая или воздухововлекающая	П1	П1
Повышающая защитные свойства по отношению к стальной арматуре	-	П1
Противоморозная	П1	П1
Гидрофобизирующая I-III групп	П1	П1

Эффективность действия пластифицирующих добавок оценивают по увеличению подвижности смеси и по прочности бетона или раствора при одинаковом водоцементном отношении контрольного и основного составов. Контрольный состав бетонной смеси должен иметь подвижность, соответствующую  $ОК=2-4$  см, растворной смеси –  $П_k=2-4$  см, где ОК – осадка конуса, определяемая по ГОСТ 10181;  $П_k$  – погружение конуса, определяемое по ГОСТ 5802.

Из смесей контрольного и основного составов отбирают пробы для определения их подвижности и изготовления образцов для определения прочности контрольного  $R_{контр}$  и основного  $R_{осн}$  составов:

➤ бетона или раствора, твердеющего в нормальных условиях [при температуре  $(20 \pm 5)$  °С и относительной влажности воздуха  $(95 \pm 5)$  %], в возрасте 3 и 28 сут;

➤ пропаренного бетона – через 4 ч после твердения в условиях тепловлажностной обработки и через 27 сут последующего твердения в нормальных условиях.

Тепловлажностную обработку следует проводить по режиму 3 + 3 + 6 + 2 ч при температуре изотермической выдержки 80 °С (где 3 ч – время предварительной выдержки; 3 ч – время подъема температуры; 6 ч – время изотермической выдержки; 2 ч – время снижения температуры). Прочность бетона контрольного и основных составов определяют по ГОСТ 10180, раствора – по ГОСТ 5802.

Изменение прочности бетона или раствора  $\Delta R$ , %, для каждого возраста и условий твердения рассчитывают по формуле

$$\Delta R = \left| \frac{R_t^k - R_t^{\text{очн}}}{R_t^k} \right| \cdot 100,$$

где  $R_t^k$  и  $R_t^{\text{очн}}$  – прочность бетона или раствора контрольного и основного составов, МПа;

$t$  – возраст бетона или раствора нормального твердения (через 3 и 28 сут) и (или) ускоренного твердения (через 4 ч после тепловлажностной обработки и через 28 сут твердения).

### Определение водоредуцирующего действия пластификаторов

Эффективность действия пластифицирующих добавок оценивают по водоредуцирующему действию, т.е. по уменьшению водопотребности смеси основных составов по сравнению с контрольным при условии изготовления смесей с одинаковой подвижностью. Подвижность смесей контрольного и основного составов должна соответствовать осадке конуса ОК = 2-4 см, определяемой по ГОСТ 10181 для бетонных смесей, и погружению конуса  $\Pi_k=2-4$  см (ГОСТ 5802) для растворных смесей.

Критериями эффективности являются следующие показатели:

➤ снижение водопотребности  $\Delta B$  бетонных смесей, в % от контрольной смеси:

$$\Delta B = \frac{(B/C)_н - (B/C)_п}{(B/C)_н} \cdot 100 \% . \quad (1.84)$$

где  $(B/C)_н$  и  $(B/C)_п$  – водоцементное отношение, соответственно, непластифицированной (контрольной) и пластифицированной (основной) бетонных смесей;

➤ водоредуцирующее действие  $V_d$ :

$$V_d = \frac{(V/C)_n}{(V/C)_п}. \quad (1.85)$$

➤ реологическое действие  $P_d$  определяют при одинаковых В/Ц-отношениях

$$P_d = \frac{OK_п}{OK_n}, \quad (1.86)$$

где  $OK_п$  и  $OK_n$  – осадка конуса, соответственно, пластифицированной и непластифицированной бетонных смесей.

Показатель относительной прочности бетона находят по формуле

$$K = \frac{R_п}{R_n}. \quad (1.87)$$

где  $R_п$  и  $R_n$  – прочность бетона, изготовленного на равноподвижных составах, соответственно, пластифицированных и непластифицированных бетонных смесях.

### Лабораторная работа №7 ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ДОБАВОК, РЕГУЛИРУЮЩИХ КИНЕТИКУ ТВЕРДЕНИЯ БЕТОНА

Эффективность действия добавок, регулирующих кинетику твердения бетонов и растворов, оценивают по изменению их прочности  $\Delta R_t$  в основном составе по сравнению с контрольным. При этом удобоукладываемость бетонных смесей контрольного и основного составов должна соответствовать марке П1. Образцы бетонов изготавливают и испытывают по ГОСТ 10180, раствора – по ГОСТ 5802.

При испытании добавок, замедляющих твердение, прочность на сжатие бетонов или растворов определяют в возрасте 1, 2, 3 и 28 сут нормального твердения.

При испытании добавок, ускоряющих твердение, прочность на сжатие бетонов и растворов определяют в возрасте 1 и 28 сут нормального твердения, прочность пропаренных бетонов – через 4 ч твердения после тепловлажностной обработки и через 27 сут последующего твердения в нормальных условиях. Изменение прочности бетонов или растворов основного состава по сравнению с контрольным составом  $\Delta R$  (%), вычисляют по формуле

$$\Delta R = \frac{R_{осн} - R_k}{R_k} \cdot 100 \%, \quad (1.88)$$

где  $R_k$  – прочность бетона контрольного состава, МПа;

$R_{осн}$  – прочность бетона основного состава, МПа.

### Методика расчета расхода добавки на 1 м<sup>3</sup> бетона

Пр и м е р . Определить расход добавки С-3 в литрах на 1 м<sup>3</sup> бетона и откорректировать расход воды затворения, если концентрация раствора добавки  $c=35\%$  и расход материалов на 1 м<sup>3</sup> (1000 л) бетона составляет:

цемента – 400 кг,                      щебня – 1200 кг,

песка – 550 кг,                      воды – 200 л,

добавки С-3 – 0,5 % от массы цемента в пересчете на сухое вещество.

Количество добавки  $D$  на 1 м<sup>3</sup> определяют по формулам:

➤ по массе

$$D = \frac{Ц \cdot g}{c}, \quad (1.89)$$

➤ по объему

$$D = \frac{Ц \cdot g}{c \cdot \rho_g}, \quad (1.90)$$

где  $g$  – содержание добавки, % от массы цемента в пересчете на сухое вещество;

$c$  – концентрация добавки, %;

$\rho_g$  – плотность раствора добавки, 1 г/л.

Зависимость плотности от концентрации для водных растворов суперпластификатора С-3 приведена в табл. 1.72.

Т а б л и ц а 1 . 7 2

Зависимость плотности от концентрации для водных растворов суперпластификатора С-3

Концентрация $c$ , %	Плотность $\rho$ , кг/л
13	1,06
17	1,08
20	1,09
23	1,11
26	1,12
29	1,14
31	1,15
33	1,16
35	1,18
37	1,19
39	1,20

### *Решение*

1. Расход добавки С-3 по массе

$$Д = \frac{400 \cdot 0,5}{0,35} = 5,7 \text{ кг.}$$

Расход добавки С-3 по объему

$$Д = \frac{400 \cdot 0,5}{0,35 \cdot 1,18} = 4,84 \text{ л.}$$

Расход добавки С-3 по массе в пересчете на сухое вещество

$$С-3 = 400 \cdot 0,005 = 2 \text{ кг.}$$

В найденном количестве раствора С-3 воды содержится

$$В = 4,84 - 2 = 2,84 \text{ кг (л).}$$

С учетом воды, содержащейся в растворе добавки С-3, для приготовления 1 м<sup>3</sup> бетонной смеси потребуется воды

$$В = 200 - 2,84 = 197,26 \text{ л.}$$

### *Порядок выполнения работы*

**З а д а н и е 1.** Исследовать влияние пластифицирующих добавок на свойства бетонной смеси и бетона, определить эффективность действия и оптимальную дозировку добавок.

Работа выполняется тремя бригадами студентов, каждая из которых исследует бетонную смесь с разным расходом добавки. Вид используемой добавки с учетом ее стоимости, а также состав бетона указывает преподаватель.

Первая бригада рассчитывает составы бетонов:

- без добавки (контрольный состав);
- с расходом добавки 0,2 % от массы цемента.

Вторая бригада определяет составы бетонов с расходом добавки:

- 0,4 % от массы цемента;
- 0,6 % от массы цемента.

Третья бригада рассчитывает составы бетонов с расходом добавки:

- 0,8 % от массы цемента; ~1,0 % от массы цемента.

Методика расчета расхода добавки приведена ранее.

Каждая бригада приготавливает бетонную смесь с заданным расходом добавки, контролирует подвижность по методике ГОСТ 10181.2–81.

Полученные результаты изменения удобоукладываемости записываются в табличной форме (табл. 1.73).

Из бетонной смеси заданного состава каждая бригада формирует опытные образцы-кубы с ребром 10 см (3 шт.) – и испытывает их на прочность по ГОСТу. Полученные результаты изменения прочности бетона записываются в табличной форме (табл. 1.73).

Таблица 1.73

Влияние добавки на свойства бетонной смеси и бетона

№ опыта	Расход добавки, %	Осадка конуса бетонной смеси, ОК, см	$\Delta B$ , %	$V_d$	$R_d$	Прочность бетона, $R_b$ , МПа	Показатель относительной прочности К
1	-						
2	0,2						
3	0,4						
4	0,6						
5	0,8						
6	1,0						

По полученным данным строятся графики изменения водоредуцирующей эффективности  $\Delta B=f(D)$  добавки пластификатора и прочности бетона  $R_b=f(D)$  в зависимости от расхода добавки (рис.1.22, 1.23).

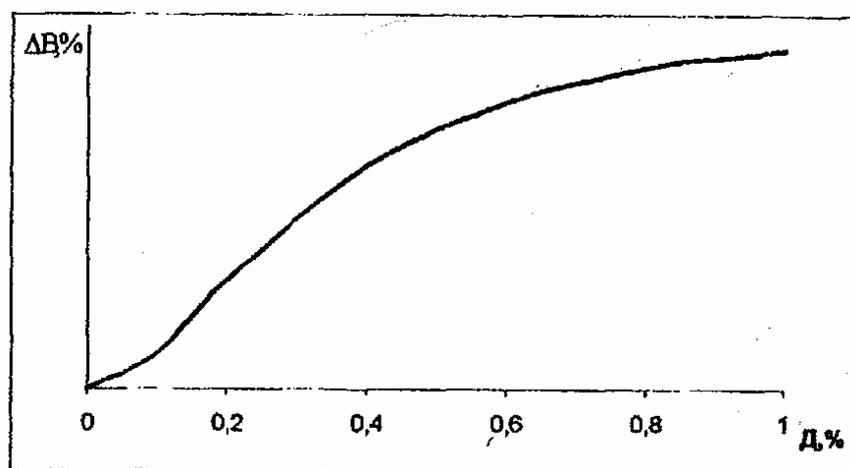


Рис.1.22. График снижения водопотребности бетонной смеси с добавкой пластификатора

Для обобщения результатов делается заключение об эффективности действия пластифицирующей добавки на свойства бетонной смеси и бетона и определяется оптимальная дозировка добавки.

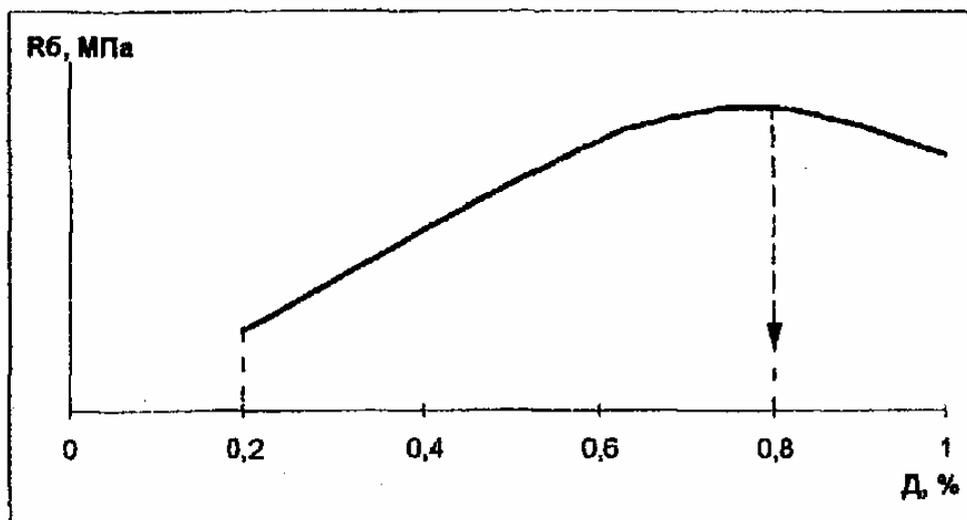


Рис. 1.23. График изменения прочности бетона в зависимости от расхода добавки

После обработки экспериментальных данных строятся графические зависимости водоредуцирующей эффективности суперпластификатора от реологического действия его в бетонных смесях  $V_D = f(P_D)$ .

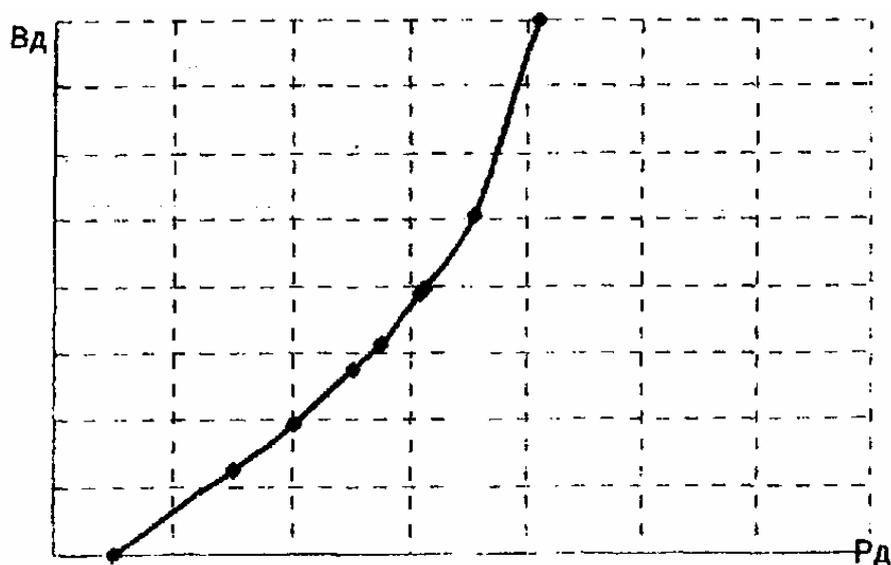


Рис. 1.24. Зависимость водоредуцирующей эффективности суперпластификатора от реологического действия его в бетонных смесях

**З а д а н и е 2.** Исследовать изменение прочности бетона по времени в зависимости от вида и количества добавки ускорителя процесса твердения бетона.

Работа выполняется тремя бригадами студентов, каждая из которых исследует бетон с разным расходом добавки. Вид добавки указывает преподаватель.

Каждая бригада рассчитывает состав бетона с расходом добавки, приведенным в табл. 1.74.

Каждая бригада формует опытные образцы-кубы с ребром 10 см из бетонной смеси марки по удобоукладываемости П1. Образцы испытываются в возрасте 1, 3, 7 и 28 сут. Полученные результаты изменения прочности бетона записываются в табличной форме (табл. 1.74).

Т а б л и ц а 1 . 7 4

Влияние добавки на кинетику набора прочности бетона

Номер бригады	Расход добавки, %	Прочность бетона, МПа, в возрасте			
		1 сут	3 сут	7 сут	28 сут
1	0				
	0,5				
2	1,0				
	1,5				
3	2,0				
	2,5				

П р и м е ч а н и е . Прочность бетона в возрасте 28 сут может рассчитываться по логарифмической формуле.

### 1.6. Определение динамического модуля упругости, коэффициента внутреннего трения цементных композитов и горных пород

Модуль упругости является важнейшей механической характеристикой материала. Согласно современным представлениям, модуль упругости – один из определяющих факторов реальной прочности композиционных строительных материалов конструкционного назначения.

Коэффициент внутреннего трения является мерой внутреннего трения структуры реальных материалов. Внутренним трением твердого тела принято называть свойство этого тела необратимо превращать в теплоту механическую энергию, сообщенную ему в процессе деформирования. Различные механизмы превращения упругой энергии в тепловую обусловлены атомным и молекулярным строением материалов, что позволяет считать метод внутреннего трения весьма эффективным современным физическим методом изучения реальной дисперсно-кристаллитной структуры цементных дисперсных систем и горных пород.

Динамический модуль упругости и коэффициент внутреннего трения строительных материалов определяют с помощью прибора – измерителя коэффициента внутреннего трения типа ИКВТ-2. Испытательная схема измерителя показана на рис. 1.25.

При определении динамического модуля упругости и коэффициента внутреннего трения всех видов бетона при изгибных колебаниях следует использовать следующие образцы: призмы сечением 2×4 см и высотой

16 см, сечением 3,5×7 см и высотой 28 см, сечением 5×10 см и высотой 40 см, а также стандартные призмы размерами, см: 4×4×16, 7×7×28 и 10×10×40.

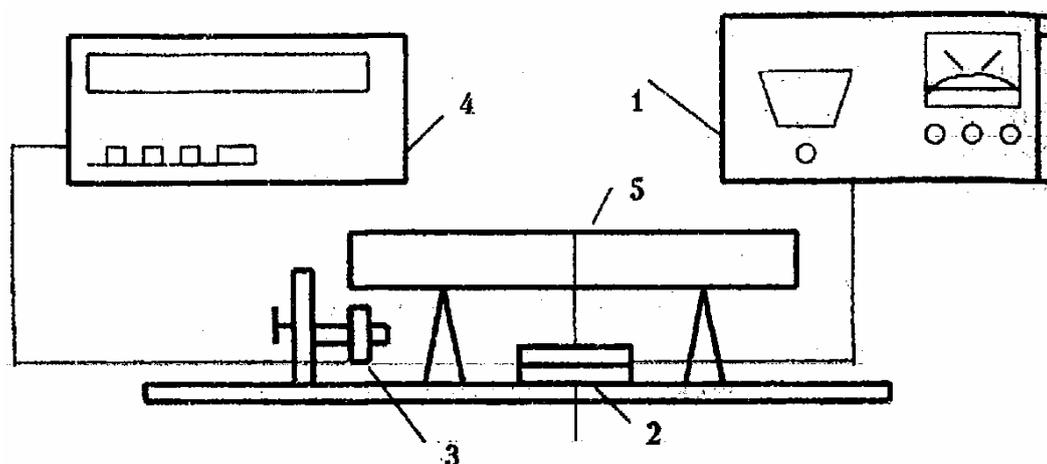


Рис.1.25. Испытательная схема прибора ИКВТ-2:  
 1 – генератор звуковой частоты; 2 – возбудитель колебаний;  
 3 – электромагнитный преобразователь; 4 – частотомер Ф5035; 5 – образец

Принцип работы прибора ИКВТ-2 заключается в том, что в образце испытываемого материала возбуждаются механические колебания изгиба с целью получения численных значений резонансной частоты изгибных колебаний и ширины резонансной характеристики на уровне 0,5 по обе стороны от резонанса.

Образец 5 помещается на двух упругих резиновых опорах, расположенных на расстоянии  $0,22l$  ( $l$  – длина образца) от его торцов. Механические колебания разной частоты в образце создаются возбудителем 2, который питается от генератора звуковой частоты 1. В качестве возбудителя колебаний изгиба используется электродинамический громкоговоритель с обрезанным диффузором.

Возбуждение изгибных колебаний в образце происходит за счет звуковой волны, создаваемой диффузором возбудителя без механического касания образца. Преобразование механических колебаний образца в электрические осуществлялось с помощью электромагнитного преобразователя 3, в магнитном поле которого находилась металлическая пластинка размером 15×15×0,2 мм из магнитной стали, наклеенная на нижнюю грань образца. При колебании образца пластинка изменяла свое положение по отношению к преобразователю, вследствие чего в последнем наводилась ЭДС, пропорциональная скорости механических колебаний образца. При изменении частоты возбуждаемых колебаний наступает момент, когда частота этих колебаний совпадает с частотой собственных колебаний образца и возникает резонанс, которому соответствует максимальная величина амплитуды колебаний  $A_{\max}$ . Регистрируемая частота соответствует

частоте собственных колебаний образца, которая зависит от состава, структуры и свойств материала, условий испытаний.

Пользуясь значением измеренной резонансной частоты колебаний образца прямоугольного сечения, динамический модуль упругости определяли по формуле

$$E_d = 0,965 \cdot 10^{-6} \cdot (l/b)^3 \cdot ((P \cdot f^2)/a) \cdot T, \quad (1.91)$$

где  $l, b, a$  – соответственно длина, высота, ширина образца, см;

$P$  – масса образца, г;

$f$  – резонансная частота колебаний изгиба, Гц;

$T$  – коэффициент, учитывающий размер образца ( $T=1,07-1,2$ );

$0,965 \cdot 10^{-6}$  – коэффициент, учитывающий основной вид колебаний образца и размерность выбранных единиц измерений.

Коэффициент внутреннего трения вычисляли по формуле

$$K_{вт} = \Delta f / \sqrt{3} \cdot f, \quad (1.92)$$

где  $\Delta f$  – ширина резонансной характеристики образца на уровне половины максимальной амплитуды изгибных колебаний по обе стороны от резонанса (рис. 1.26).

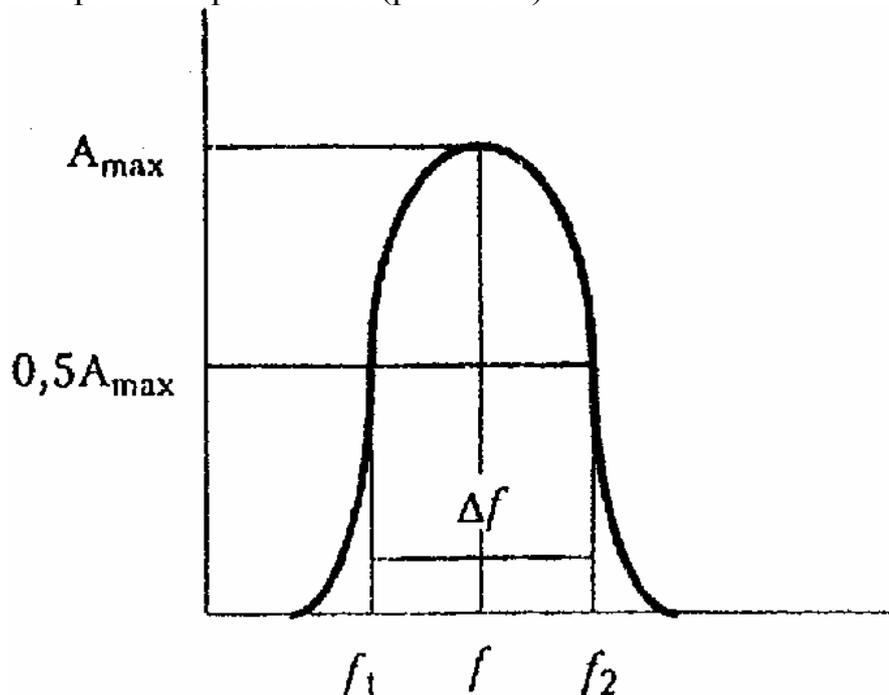


Рис. 1.26. Полоса резонансной характеристики образца

Таким образом, использование прибора ИКВТ-2 позволяет дать количественную численную оценку качества структуры сравниваемых образцов по параметрам  $E_d$  и  $K_{вт}$  или выявить кинетику и характер изменения названных параметров во времени в твердеющих системах или в зависимости от воздействия внешних факторов.

Полученные по формулам (1.91) и (1.92) численные значения динамического модуля упругости и коэффициента внутреннего трения представляют в виде построенных графических зависимостей, как это показано на графиках, показанных на рис. 1.27 и 1.28, или в виде найденных аналитических зависимостей.

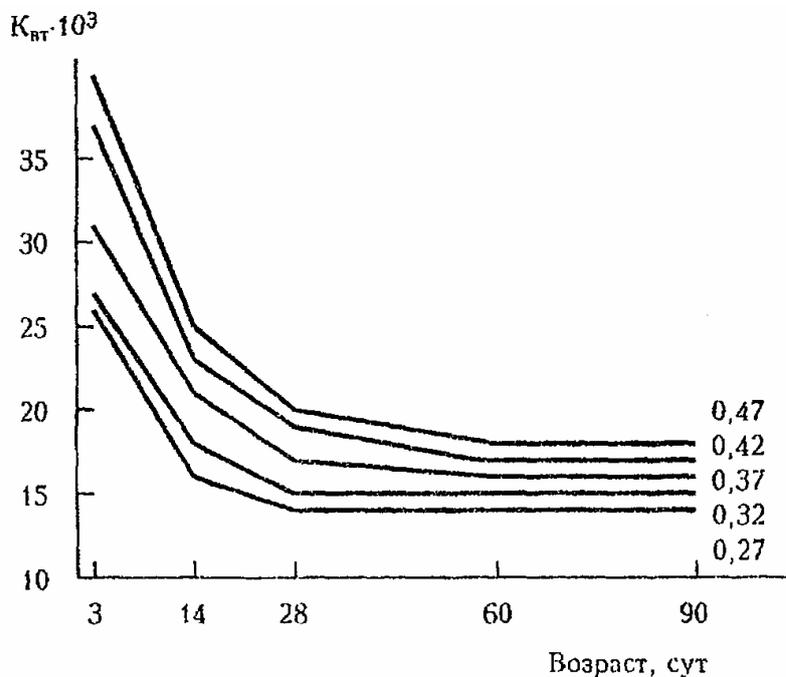


Рис. 1.27. Зависимость коэффициента внутреннего трения  $K_{вт}$  от В/Ц и возраста цементного камня

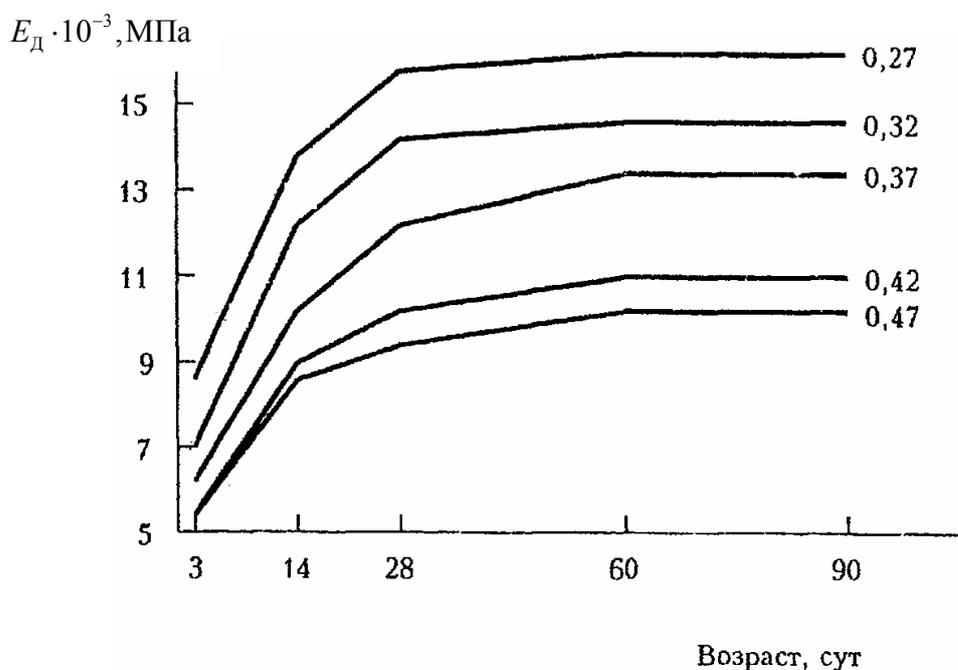


Рис. 1.28. Зависимость динамического модуля упругости  $E_0$  от В/Ц и возраста цементного камня

## 1.7. Диагностика качества конструкционных строительных материалов по результатам акустической эмиссии

В настоящее время оценка качества материалов основана на измерении механических характеристик, которые используются в качестве диагностических параметров состояния материалов. Эффективность технической диагностики можно повысить, если в качестве параметров состояния материала выбрать параметры дефектов его структуры. Это обеспечит более тесную связь параметров состояния с теми физическими процессами, которые сопровождают развитие дефектов и приводят к разрушению. Возникновение и развитие дефектов структуры в физико-механическом аспекте адекватно характеризуется процессами излучения механических волн напряжений. Это явление получило название акустической эмиссии или эмиссии волн напряжений, вызванной внутренней динамической локальной перестройкой структуры твердого тела.

Измерение параметров указанных волн позволяет обнаруживать зарождение, развитие и рост различных дефектов и осуществлять контроль за ходом разрушения в исследуемом образце в реальном масштабе времени, а также выявлять общие закономерности процесса разрушения и критерии перехода от устойчивой стадии разрушения к неустойчивой, приводящей к окончательному разрушению.

Прогнозировать разрушение материала позволяют теоретические и эмпирические зависимости между параметрами сигналов акустической эмиссии (АЭ) и параметрами состояния материала (действующие напряжения, степень деформации, скорость деформации, поврежденность).

Для построения модели изменения активности АЭ в зависимости от времени при линейном законе изменения нагрузки используют следующие основные допущения: каждая ячейка разрушается при достижении в ней некоторого критического напряжения разрыва, разрыв ячейки сопровождается излучением одного импульса АЭ, и активность АЭ равна числу разрушающихся ячеек в единицу времени. Существует также зависимость между амплитудой сигналов АЭ и поврежденностью материала. Эта зависимость исходит из следующих предпосылок: в каждой зоне материала за интервал времени  $\Delta t$  зарождается определенное количество микротрещин за счет разрыва напряженных атомных связей в кристаллической решетке материала. Последующее подрастание каждой трещины приводит к уменьшению бездефектной части сечения зоны и, как следствие, к увеличению концентрации напряжений.

Микротрещины, достигшие критического размера, распространяются со скоростью 0,3-0,7 скорости звука в материале до ближайшего энергетического барьера.

Суммарная концентрация напряжений, превышающая некоторую критическую величину, от множества зарождающихся трещин приводит к слиянию последних и разрыву всех атомных связей в зоне.

Акустико-эмиссионное устройство (АЭУ) на базе стандартного прибора АФ-15, позволяющее регистрировать все важнейшие параметры сигналов акустической эмиссии: амплитуду, длительность сигнала акустической эмиссии, интенсивность, общее количество отдельных импульсов сигнала АЭ, суммарную энергию акустической эмиссии по ГОСТ 25.002, – включает в себя самописец типа Н-338 и осциллограф двухлучевой универсальный С1-74.

На рис. 1.29 представлена структурная схема АЭУ, состоящая из двух идентичных приемно-усилительных каналов, каждый из которых включает в себя: пьезопреобразователь, предусилитель, усилитель, фильтр, детектор, формирователь, а также выполненные на отдельных платах общие функциональные узлы – блок синхронизации, цифровые счетчики, интенсиметр, блок управления, блок логической обработки сигналов, схемы индикации, амплитудный селектор.

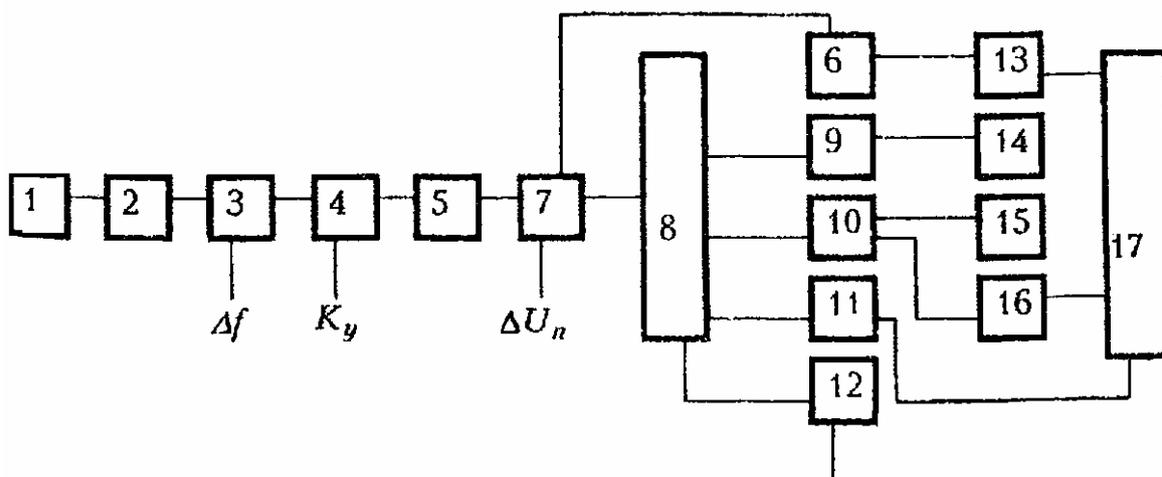


Рис. 1.29. Блок-схема устройства для регистрации параметров АЭ: 1 – пьезопреобразователь; 2 – предусилитель; 3 – блок фильтров; 4 – основной усилитель; 5 – детектор огибающей; 6 – измеритель энергии АЭ; 7 – дискриминатор формирователь; 8 – коммутатор; 9 – счетчик I суммарного счета импульсов АЭ; 10 – счетчик II многофункциональный; 11 – интенсиметр аналоговый; 12 – звуковой индикатор; 13 и 16 – ЦАП; 14 и 15 – схемы цифровой индикации; 17 – самописец Н-338

### Техническая характеристика АЭУ

Количество число приемно-усилительных каналов, шт.	2
Частотный диапазон устройства, кГц	8-10 <sup>3</sup>
Чувствительность по входу предусилителя в полосе $\Delta f = 100$ кГц, мкВ	2-5
Частота среза ФВЧ, кГц	8, 20, 50, 150
Частота среза ФНЧ, кГц	20, 50, 150, 1000
Глубина регулировки усилительного тракта, дБ	40

В качестве чувствительного элемента преобразователя сигналов АЭ применяется пьезокерамика типа цирконат-титонат свинца марки ЦТС-19.

Для определения параметров акустической эмиссии при равновесных и неравновесных механических испытаниях берутся образцы типа I (ГОСТ 29167) для испытаний на изгиб, а также стандартные образцы-призмы разных размеров (ГОСТ 10180), в зависимости от максимальной крупности дисперсной фазы композита.

Образцы для испытаний подготавливаются по ГОСТ 10180 сериями (в каждой не менее четырех образцов-близнецов) либо выпиливаются из изделий или из горных пород по ГОСТ 28570. Начальные надрезы (концентраторы напряжений) наносятся с помощью режущего инструмента или при формовании образцов путем закладывания фольги либо специально изготовленных пластин.

Механическое испытание образцов производят на гидравлических прессах малой шумности (ГОСТ 8505 и ГОСТ 7855), позволяющих с помощью специальных приставок нагружать образцы на изгиб как при равновесных, так и неравновесных испытаниях.

Принцип работы акустико-эмиссионного устройства заключается в том, что сигналы АЭ, возникающие в процессе структурных изменений материала, преобразуются чувствительными элементами (пьезопреобразователями) в электрические сигналы, усиливаются, фильтруются и после соответствующей обработки поступают на встроенные измерительные схемы (цифровые и аналоговые), а также на внешние регистрирующие приборы. С помощью коммутатора сигналы распределяются на регистрирующие схемы в зависимости от требуемой программы измерений параметров АЭ.

Оценка электрических параметров производится по индикаторам цифровых счетчиков, по графикам самопишущих приборов, по звуковым сигналам. Анализ быстротекущих процессов производится с помощью осциллографа.

Перед началом работы необходимо выполнить требования техники безопасности, т.е. заземлить АЭУ и все используемые измерительные приборы, установить ручки переключателей и потенциометров на лицевой панели АЭУ в следующие положения:

1. Фильтры «ВЧ», «НЧ» – в соответствии с предполагаемым частотным диапазоном сигналов АЭ (ВЧ – 20 кГц, НЧ – 150 кГц);

2. Ручку «Ослабление–I» канала I – в крайнее левое положение, «Ослабление–II» канала I – в крайнее правое положение, что соответствует уменьшению усиления приемного канала I примерно в 10 раз.

3. Переключатель «СЧ–I(Σ)» (счетчик суммарного количества импульсов) – в положение «I», что соответствует считыванию импульсов, сформированных в первом канале устройства. Считывание производится с дискриминатора «2», независимо от положения переключателя «В<sub>x-1</sub> – Выбор дискриминатора».

4. Два переключателя « $V_{x-1}$  – Выбор дискриминатора» и « $V_{x-2}$  – Выбор дискриминатора» позволяют подключать входы цифрового регистратора к выходу любого дискриминатора каждого из каналов.

В режиме независимой работы каналов переключатель « $V_{x-1}$  – Выбор дискриминатора» устанавливается в положение «2», «3» или «4» канала I, в зависимости от предполагаемой амплитуды сигналов АЭ. Переключатель « $V_{x-2}$  – Выбор дискриминатора» – в положение «отключено», что соответствует точке без надписи.

5. Ручкой потенциометра «Селектор» устанавливается опорное напряжение дискриминатора 10-12 В. При этом порог срабатывания дискриминатора «1» соответствует примерно 0,1 В; дискриминатора «2» – примерно 0,5 В; дискриминатора «3» – примерно 2,5 В; дискриминатора «4» – примерно 10 В.

Таким образом, на цифровом регистраторе (на табло – «Счетчик-2») может быть зафиксирована последовательность импульсов, превышающих порог дискриминации, который может быть установлен в диапазоне от 0,05 до 10 В.

6. Переключатель «Период-СЧ 2» устанавливает режим работы цифрового регистратора. В положении 0,001-0,01-0,1-1-10-100 секунд на счетчик-2 подается импульс сброса через выбранный интервал времени. Во всех перечисленных положениях переключателя «Период-СЧ 2» занесение информации на цифровой индикатор (счетчик-2 на табло) осуществляется строго через 1 с.

Таким образом, на цифровом регистраторе может быть зафиксирована интенсивность «N» акустических событий за выбранный интервал времени.

В положении « $\infty$ » (бесконечность) переключателя «Период-СЧ 2» осуществляются непрерывный счет импульсов и непрерывное занесение информации на цифровой индикатор.

Переключатель «Период-СЧ 2» перед началом работы необходимо поставить в положение « $\infty$ », а после проверки прохождения сигналов с пьезодатчиков устанавливать в зависимости от регистрируемого параметра «N» или « $\Sigma$ » и предполагаемой интенсивности сигналов.

Если предполагаемая интенсивность сигналов больше 20 импульсов в секунду, то при измерении параметра «N» переключатель «Период-СЧ 2» следует устанавливать в положение «1». Если интенсивность меньше 20 импульсов в секунду – в положение «10» и измерять интенсивность за 10 с.

При очень редких событиях можно измерять интенсивность за 100 с – положение переключателя «Период-СЧ 2» устанавливать на «100».

7. Выход цифрового регистратора через цифроаналоговый преобразователь (ЦАП) подключен к выходной клемме «ЦАП N, $\Sigma$ » для записи информации в аналоговой форме на высокоомный самописец ( $R_{ВХ} > 2$  кОм).

8. Масштаб ЦАП устанавливается переключателем «Пределы измерения».

В положении  $(0,2 - 2 - 20) N \cdot 10^3$  (импульсов) напряжению 4 В на клемме «ЦАП» будет соответствовать в зависимости от положения переключателя 200 – 2000 – 20000 импульсов, записанных на счетчик регистратора.

При этом в положении  $\langle(0,2 - 2 - 20) N \cdot 10^3\rangle$  на микроамперметр поступает сигнал с отдельного аналогового интенсиметра в том же масштабе.

В положении  $\langle 0,1 - 1 \rangle Am$  на микроамперметр поступает сигнал с измерителя амплитудного значения.

9. На выходную клемму «Выход УМ –  $Am/T$ » независимо от положения переключателей всегда поступает сигнал с измерителя амплитудного значения канала I.

АЭУ характеризуется чувствительностью по входу предусилителя менее 2 мкВ в полосе частот 100 кГц. С целью получения хорошего акустического контакта преобразователь АЭ прижимается с постоянным усилием к торцовой поверхности образца-призмы через тонкий слой петролатумной смазки с помощью банджа из специальной резины либо крепится к этой поверхности с помощью быстросохнущего клея, например циокрина.

В испытаниях по определению параметров АЭ и прочности на растяжение при изгибе нагрузка на образец должна возрастать ступенями до конца разрушения. Величина двух первых ступеней составляет примерно 0,05 от ожидаемой разрушающей нагрузки  $R_{разр.нагр}$ , затем величина ступени увеличивается вдвое. Начиная со ступени  $0,8 R_{разр.нагр}$ , все последующие ступени нагружения целесообразно уменьшать до  $0,05 R_{разр.нагр}$ . На каждой ступени производится выдержка нагрузки, которая сохраняется постоянной в продолжение всего испытания до полного прекращения сигналов АЭ. Выдержка нагрузки на каждой ступени не должна превышать 5 минут, а общая продолжительность испытания – не менее 20 минут.

С помощью перераспределительного нагрузочного устройства типа «кольцо» по ГОСТ 29167–97 можно получать полностью равновесные диаграммы деформирования опытного образца и соответствующие этим диаграммам параметры АЭ.

Сравнивая полученные в опытах результаты наблюдений, выявляют наиболее информативные для данного материала параметры АЭ. На основании анализа характеристик сигналов АЭ и величин интенсивности нагрузки устанавливают зависимость параметров акустической эмиссии и прочностных характеристик материала. На рис. 1.30 показан пример представления параметра АЭ в зависимости от интенсивности напряжения.

На рис. 1.31 – пример представления параметра акустической эмиссии в зависимости от прогиба (деформации) образца.

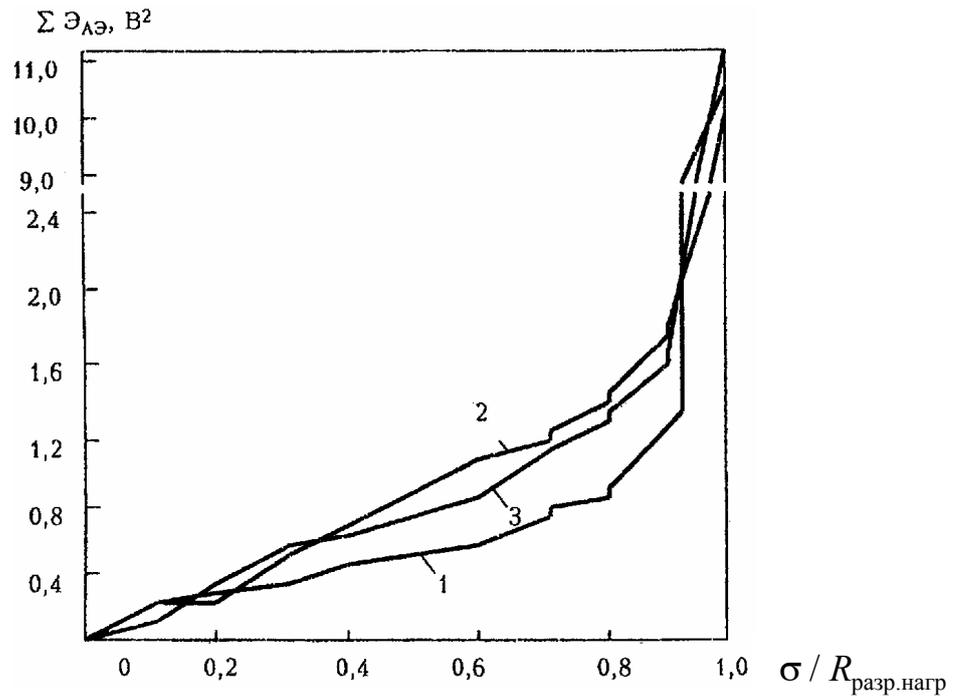


Рис. 1.30. Зависимость энергии акустической эмиссии  $\Sigma \mathcal{E}_{\text{АЭ}}$  от нагрузки при трехточечном изгибе:

- 1 – контрольный состав 1:1:1,52  $V/\Pi=0,306$ ;
- 2 – состав 1:1:1,52 СП С-3 1%  $V/\Pi=0,306$ ;
- 3 – состав 1:1:1,52 СП С-3 1%  $V/\Pi=0,242$

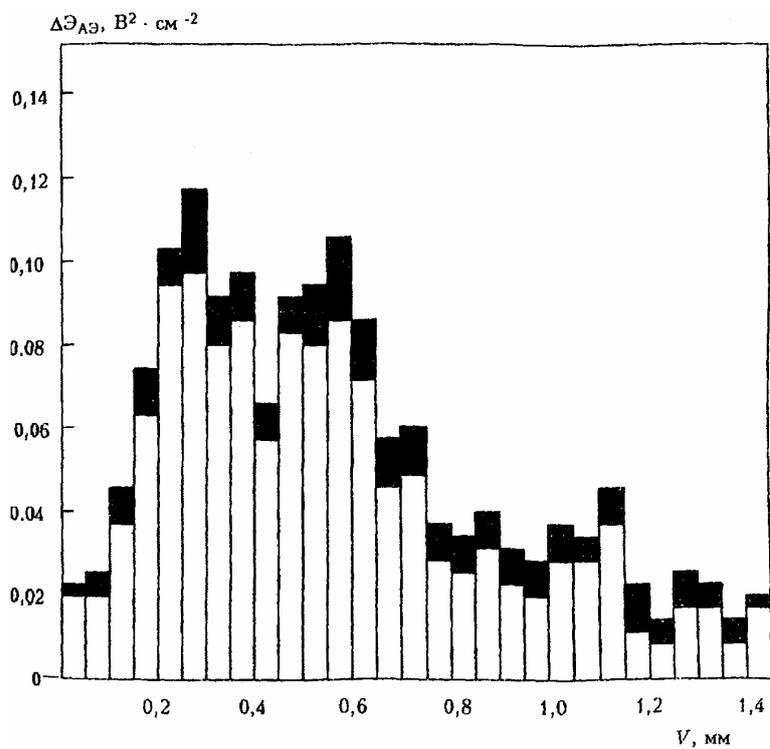


Рис. 1.31. Амплитудно-энергетическое распределение импульсов АЭ

конструкционного термолитобетона:

- АЭ при нагружении образца;
- АЭ при выдержке образца на этапе

## Лабораторная работа №8 ОПРЕДЕЛЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ТРЕЩИНОСТОЙКОСТИ (ВЯЗКОСТИ РАЗРУШЕНИЯ) ЦЕМЕНТНЫХ СИСТЕМ

Возросшие современные требования к расчету конструкций с учетом надежности и долговечности определяют необходимость расширения и качественного совершенствования экспериментальных данных о деформационных свойствах и параметрах разрушения конструкционных бетонов.

Традиционные методы оценки качества цементных композитных систем не дают исследователю количественных обобщенных механических критериев разрушения, связывающих напряженное состояние с характеристиками дефектов их структуры. Такая оценка критериев надежности, характеризующих способность материала тормозить развитие трещины основывается на концепции линейной механики и физики разрушения.

В основу физического подхода положено развитие физических представлений о природе и кинетике процесса разрушения, связанного с преодолением системой потенциальных барьеров. При механическом подходе считают обычно элементарный акт разрушения – зарождение микротрещины или потерю устойчивости макротрещины – детерминированным, происходящим при достижении какой-либо величиной критического значения. На этом основаны механические критерии разрушения (коэффициент интенсивности напряжений, энергия разрушения и др.).

В последние годы оценка качества композитных материалов с позиций физики и механики разрушения занимает ведущее положение при разработке и создании материалов с нужными свойствами.

*Цель работы* – познакомиться с методикой определения силовых и энергетических характеристик трещиностойкости конструкционных строительных материалов.

### *Оборудование и образцы*

Для определения характеристик трещиностойкости как при равновесных, так и при неравновесных испытаниях применяют образцы типа I (ГОСТ 29167–91) для испытаний на изгиб (рис.1.32).

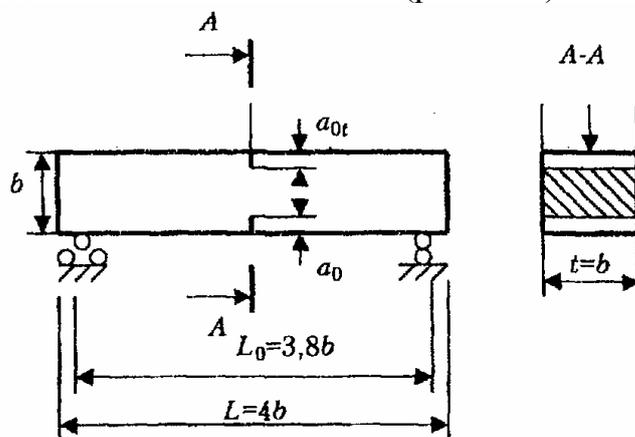


Рис. 1.32. Образец типа I

ГОСТ 29167–91 рекомендует для получения полностью равновесных диаграмм деформирования использовать стандартные испытательные машины, оборудованные дополнительным перераспределяющим устройством типа «кольцо» (рис. 1.33).

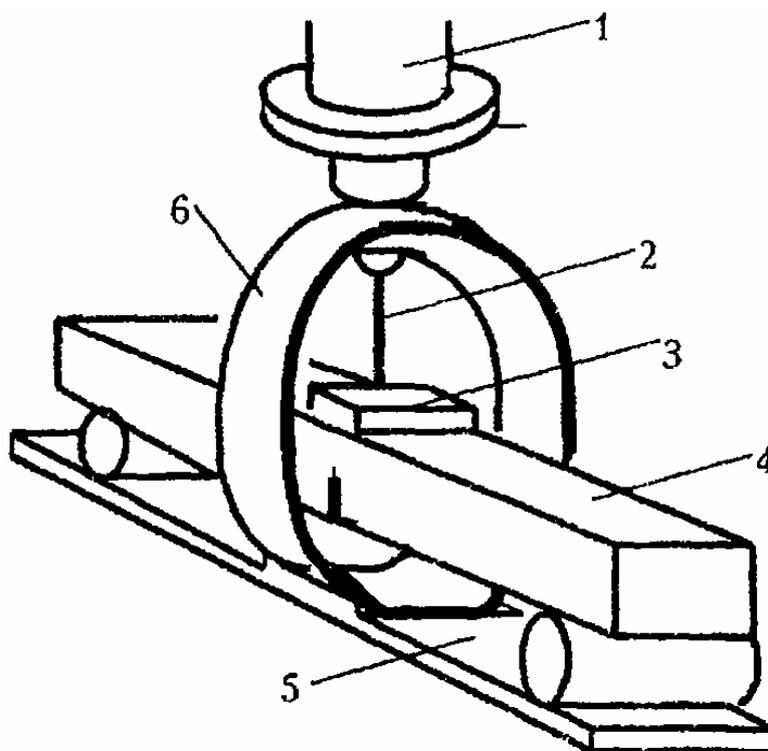


Рис. 1.33. Схема дополнительного перераспределяющего устройства к стандартному прессу:  
1 – нагружающий элемент пресса; 2 – пуансон; 3 – распределительная балочка;  
4 – образец; 5 — основание; 6 – упругое стальное кольцо

Для определения характеристик трещиностойкости испытывают образцы с начальным надрезом по ГОСТ 29167–91.

При равновесных испытаниях образцы типа I (см. рис. 1.32) нагружают непрерывно до их разделения на части с фиксацией полной диаграммы состояния материала  $F - V$  (рис. 1.34, кривая  $OTCDE$ ). При неравновесных испытаниях фиксируют нагрузку  $F_c^*$ , соответствующую динамическому началу движения магистральной трещины. По результатам равновесных испытаний образцов полную диаграмму состояния трансформируют в расчетную и производят дополнительные построения (см.рис. 1.34).

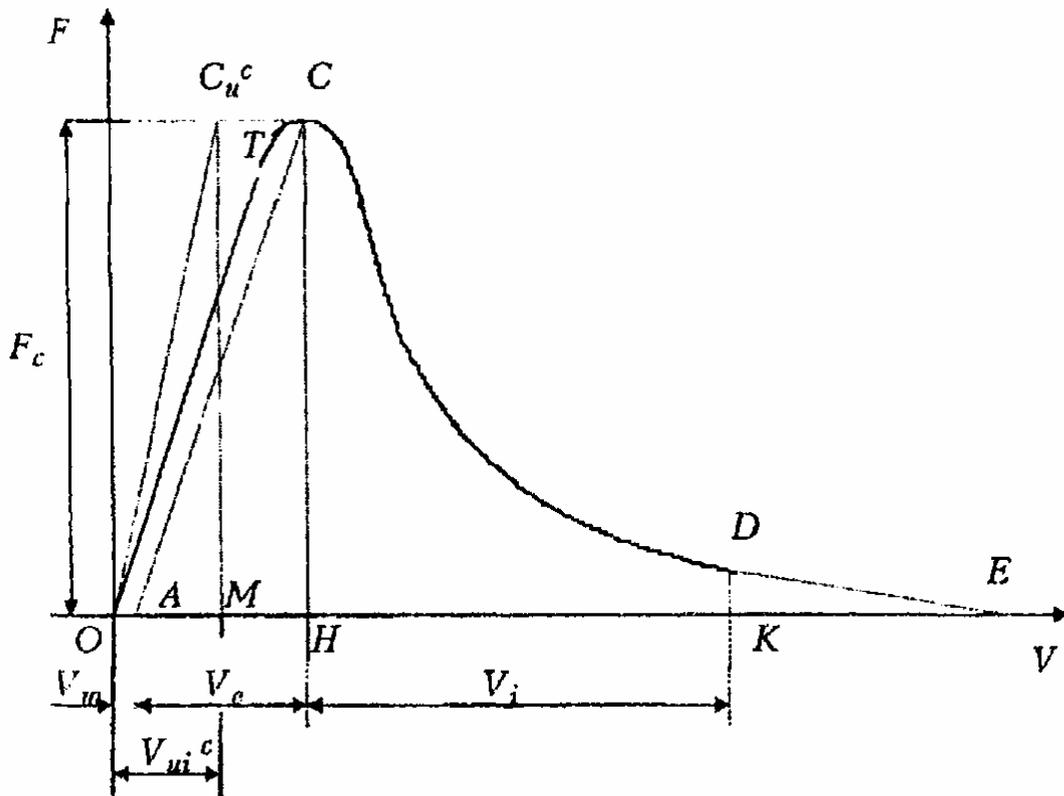


Рис. 1.34. Диаграмма состояния материала  $F-V$

Расчетным путем или планиметрированием определяют энергозатраты на отдельные этапы деформирования и разрушения образца, а именно  $W_m$ ,  $W_e$ ,  $W_l$ ,  $W_{ui^c}$ ,  $W_{ce}$ , численно равные соответственно площадям фигур  $OTCA$ ,  $ACH$ ,  $HCDK$ ,  $OC_u^cM$ , представленных на рис. 1.34, и  $OTC'X'O$  (рис.1.35).

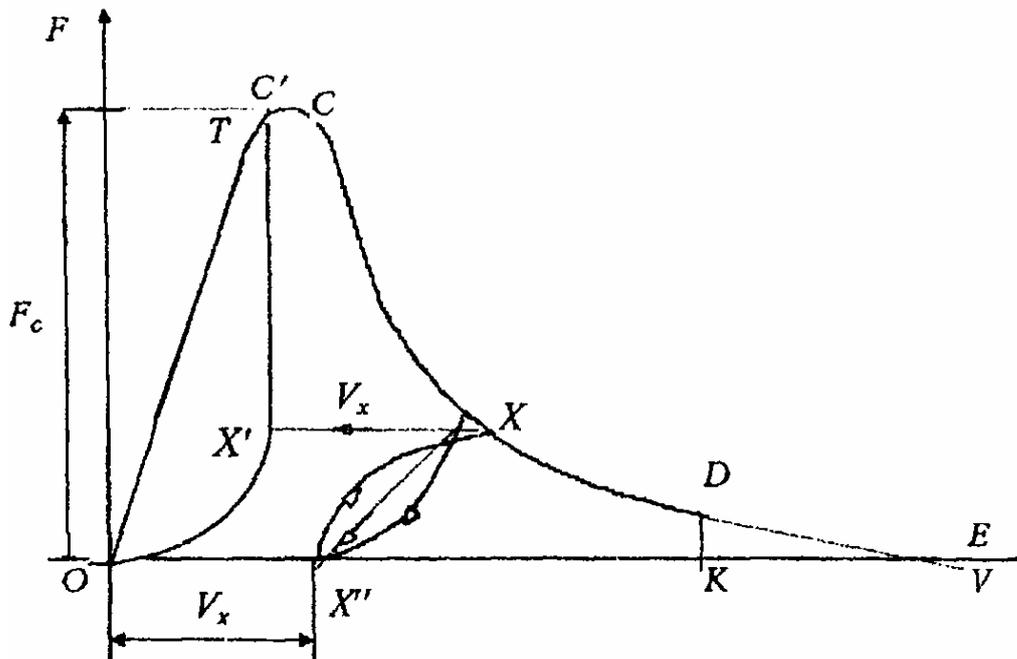


Рис. 1.35. Диаграмма состояния материала  $F-V$

Расчетным путем определяют значения силовых и энергетических характеристик трещиностойкости по зависимостям:

$$G_i = (W_m + W_e) / (t(b - a_0 - a_{0t}));$$

$$G_F = (W_e + W_l) / (t(b - a_0 - a_{0t}));$$

$$G_{ce} = W_{ce} / (t(b - a_0 - a_{0t}));$$

$$J_i = (W_m + W_e - W_{ui}^c) / (t(b - a_0 - a_{0t}));$$

$$K_i = \sqrt{G_i \cdot E_b};$$

$$K_c = \sqrt{G_{ce} \cdot E_b};$$

$$X_F^c = (G_i \cdot E_b) / R_{bt},$$

где  $E_b$  – модуль упругости материала;

$R_{bt}$  – прочность на осевое растяжение;

$G_i$  – удельные энергозатраты на статическое разрушение до момента начала движения магистральной трещины;

$G_F$  – удельные эффективные энергозатраты на статическое разрушение;

$G_{ce}$  – полные удельные упругие энергозатраты на статическое деформирование образцов до деления на части;

$J_i$  – статический джей-интеграл;

$K_i$  – статический критический коэффициент интенсивности напряжений;

$K_c$  – критический коэффициент интенсивности напряжений при максимальной нагрузке;

$X_f^c$  – критерий хрупкости;

$W_m$  – энергозатраты на процессы развития и слияния микротрещин до формирования магистральной трещины статического разрушения;

$W_e$  – энергозатраты на упругое деформирование до начала движения магистральной трещины статического разрушения;

$W_l$  – энергозатраты на локальное статическое деформирование в зоне магистральной трещины;

$W_{ce}$  – полные упругие энергозатраты на статическое деформирование до деления на части;

$W_{ui}^c$  – расчетные энергозатраты на упругое деформирование сплошного образца.

## 2. ВИДЫ АРМАТУРНОЙ СТАЛИ. СПОСОБЫ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОГО НАТЯЖЕНИЯ АРМАТУРЫ И КОНТРОЛЯ НАПРЯЖЕНИЯ

Для армирования железобетонных изделий используют следующие виды арматурной стали: стержневую арматурную сталь, проволочную арматуру и канатную.

Стержневую арматурную сталь выпускают диаметром от 6 до 80 мм и подразделяют на горячекатаную гладкую класса А-I (А240) и горячекатаную периодического профиля классов А-II (А300); А-III (А400); А-IV (А600); А-V (А800); А-VI (А1000) по ГОСТ 5784-82 (табл. 2.1, 2.2). Номинальный диаметр  $d_n$  стержней гладкого профиля равен фактическому  $d_f$ , а стержней периодического профиля – диаметру одинакового с ним по площади поперечного сечения гладкого стержня.

Т а б л и ц а 2 . 1

Характеристика стержневой арматурной стали

Класс арматурной стали	Диаметр, мм	Марка стали
А-I (А240)	6-40 6-18	Ст3кп, Ст3пс, Ст3сп, Ст3кп, Ст3кп, Ст3пс, Ст3сп
А-II (А300)	10-40 40-80	Ст5сп, Ст5с2, 18Г2С
Ас-II (А300)	10-32 (36-40)	10ГТ
А-III (А400)	6-40 6-22	35ГС, 25Г2С, 32Г2Рпс
А-IV (А600)	10-18 (6-8) 10-32 (36-40)	80С  20ХГ2Ц
А-V (А800)	(6-8) 10-32 (36-40)	23Х2Г2Т
А-VI (А1000)	10-22	22Х2Г2АЮ, 22Х2Г2Р, 20Х2Г2СР

Таблица 2.2

## Физико-механические показатели стержневой арматурной стали

Класс арматурной стали	Предел текучести $\sigma_t$		Временное сопротивление разрыву $\sigma_B$		Относительное удлинение, $\delta_b, \%$	Равномерное удлинение, $\delta_p, \%$	Ударная вязкость при температуре $-60^\circ\text{C}$		Испытание на изгиб в холодном состоянии ( $c$ – толщина оправки, $d$ – диаметр стержня)
	Н/мм <sup>2</sup>	кгс/мм <sup>2</sup>	Н/мм <sup>2</sup>	кгс/мм <sup>2</sup>			МДж/м <sup>2</sup>	кгсм/с <sup>2</sup>	
A-I (A240)	235	24	373	38	25	-	-	-	180°; $c=d$
A-II (A300)	295	30	490	50	19	-	-	-	180°; $c=3d$
Aс-II (A300)	295	30	441	45	25	-	0,5	5	180°; $c=3d$
A-III (A400)	390	40	590	60	14	-	-	-	90°; $c=3d$
A-IV (A600)	590	60	883	90	6	2	-	-	45°; $c=5d$
A-V (A800)	785	80	1030	105	7	2	-	-	45°; $c=5d$
A-VI (A1000)	980	100	1230	125	6	2	-	-	45°; $c=5d$

Холоднотянутую проволочную арматуру по форме сечения выпускают:

- круглой, гладкой классов В-I и В-II;
- периодического профиля классов В<sub>р</sub>-I и В<sub>р</sub>-II;
- холодносплюсненную классов В<sub>р</sub>-I и В<sub>р</sub>-II.

Механические свойства проволоки в соответствии с ГОСТ 6727–80 представлены в табл. 2.3.

Т а б л и ц а 2 . 3

Механические свойства проволоки

Номинальный диаметр проволоки, мм	Разрывное усилие $P$ , гН (кгс)	Усилие, соответствующее условному пределу текучести $P_{0,2}$ , гН (кгс)	Число перегибов	Относительное удлинение $\sigma_{100}$ , %
3,0	39 (400)	35 (355)	4	2,0
4,0	71 (720)	62 (630)		2,5
5,0	106 (1085)	97 (985)		3,0

В качестве преднапряженной арматуры используют:

- горячекатаную классов Ат400, Ат500, Ат400С, Ат500С, А-IV (А600), А-V (А800);
- термически упрочненную классов Ат-IV (Ат600), АтIVС (Ат600С), Ат-IVК (Ат600К), Ат-V (Ат800), Ат-VК (Ат800К), Ат-VI (А1000), Ат-VIK (Ат1000К), Ат-VII (Ат1200);
- холоднотянутую проволоку классов В-II, В<sub>р</sub>-II;
- арматурные канаты классов К-7, К-19.

Механические свойства термически упрочненной арматурной стали должны соответствовать ГОСТ 10884–94 (табл. 2.4), механические свойства проволочной и канатной арматуры – ГОСТ 7448–81 (табл. 2.5) и ГОСТ 13840–68 (табл. 2.6).

Таблица 2.4

## Механические свойства арматурной стали

Класс прочности арматурной стали	Номинальные диаметры, мм	Температура электронагрева, °С	Механические свойства				Испытание на изгиб в холодном состоянии, град	Диаметр оправки ( $d$ – номинальный диаметр стержня)
			временное сопротивление разрыву, $\sigma_b$ , Н/мм <sup>2</sup>	условный, или физический, предел текучести $\sigma_{0,2}$ ( $\sigma_r$ ), Н/мм <sup>2</sup>	Относительное удлинение, %			
					$\delta_b$	$\delta_p$		
не менее								
Ат400	6-40	-	550	440	16	-	90	3d
Ат500	6-40	-	600	500	14	-	90	3d
Ат600	10-40	400	800	600	12	4	45	5d
Ат800	10-32*	400	1000	800	8	2	45	5d
Ат1000	10-32	450	1250	1000	7	2	45	5d
Ат1200	10-32	450	1450	1200	6	2	45	5d

\*Для арматурной стали класса Ат800К номинальными диаметрами являются 18-32 мм.

П р и м е ч а н и я :

1. Для арматурной стали класса Ат600С допускается снижение временного сопротивления разрыву на 50 Н/мм<sup>2</sup> ниже установленных норм (см. табл.2.4) при увеличении относительного удлинения  $\delta_b$  на 2 % (абс.) и равномерного удлинения  $\delta_p$  на 1 % (абс).
2. Для арматурной стали классов Ат400С, Ат500С и Ат600С в стержнях временное сопротивление разрыву не должно превышать значений, приведенных в табл.2.4, более чем на 200 Н/мм<sup>2</sup>.
3. Для арматурной стали класса прочности Ат1200 в состоянии поставки допускается снижение условного предела текучести до 1150 Н/мм<sup>2</sup>.
4. При испытании арматурной стали классов прочности Ат800, Ат1000 и Ат1200 непосредственно после прокатки допускается снижение показателей пластичности на 1 % (абс.)

Таблица 2.5

## Механические свойства проволоки

Номинальный диаметр $d$ , мм	Класс прочности, $\text{Н/мм}^2$	Номинальное временное сопротивление, $\text{Н/мм}^2$	Разрывное усилие $H$ (кгс)	Усилие $P_{0,2}$ , $H$ (кгс)	Относительное удлинение после разрыва $\delta_{100}$ , %	Число перегибов проволоки при диаметре валиков 30 мм	
						круглой	периодического профиля
3,0	1500	1780	12600(1285)	10600(1080)	4	9	8
4,0	1400	1700	21400(2180)	18000(1830)	4	7	6
5,0	1400	1670	32800(3340)	27500(2800)	4	5	3
6,0	1400	1670	47300(4820)	39700(4050)	5	-	-
7,0	1300	1570	60400(6160)	50700(5170)	6	-	-
8,0	1200	1470	74000(7540)	62000(6320)	6	-	-

не менее

Примечания:

1. Нормы по номинальному временному сопротивлению являются справочными данными.
2. Модуль упругости  $E_{\text{упр}}$  равен  $(200 \pm 20)$  ГПа.

Таблица 2.6

## Механические свойства канатной арматуры

Диаметр каната D, мм	Допускаемое отклонение от номинального диаметра, мм	Диаметр проволоки каната, мм		Номинальная площадь сечения проволоки каната, мм <sup>2</sup>	Номинальная масса 1 м длины каната, кг	Шаг свивки каната, мм	Разрывное усилие, кН/кгс	Усилие при условном пределе текучести R <sub>0,2</sub> , кН/кгс	Относительное удлинение перед разрывом, %	Временное сопротивление разрыву σ <sub>B</sub> , Н/мм <sup>2</sup> (кгс/мм <sup>2</sup> )	Условный предел текучести σ <sub>0,2</sub> , Н/мм <sup>2</sup> (кгс/мм <sup>2</sup> )	Релаксация при начальной нагрузке 0,7 от фактического разрывного усилия в течение 1000 ч, %, не более, для канатов по виду изготовления	
		наружной	центральной									с отпуском	с напряжением
6,0	+15 -0,3	2,05	2,10	23	0,184	112-16	40,6 (4140)	34,9 (3515)	4,0	1770 (180)	1500 (153)	0,8	2,5
9,0	+15 -0,3	3,10	3,15	53	0,419	112-16	93,5 (9540)	79,5 (8105)	4,0	1770 (180)	1500 (153)	0,8	2,5
12,0	+0,2 -0,4	4,10	4,20	93	0,736	112-16	164,0 (16700)	139,5 (14200)	4,0	1770 (180)	1500 (153)	0,8	2,5
15,0	+0,2 -0,4	5,00	5,20	139	1,099	112-16	232,0 (23600)	197,0 (20050)	4,0	1670 (170)	1410 (144)	0,8	2,5

## 2.1. Определение основных физико-механических свойств арматурных сталей

Сталь обладает свойствами упругопластичных тел, для которых характерно наличие как упругих (обратимых), так и пластических (необратимых) деформаций при испытании на растяжение. Марочные стали проявляют упругие и пластические свойства в различной степени. Малоуглеродистые стали обладают заметной пластичностью и большим удлинением, в то время как высокоуглеродистые и легированные стали малопластичны и имеют небольшие удлинения при разрыве. На диаграмме «деформация – напряжение» при испытании сталей на растяжение зависимость должна быть изображена таким образом, чтобы вначале деформации были пропорциональны напряжению. Максимальное напряжение, при котором сохраняется эта зависимость, представляет собой предел упругости  $\sigma_y$ . После достижения определенного напряжения – предела текучести  $\sigma_t$  – материал начинает интенсивно деформироваться (течь) без заметного увеличения напряжений (такие деформации называют пластическими). При определенном значении деформации процесс течения материала прекращается: материал как бы вновь приобретает прочность. Напряжения в материале растут вплоть до достижения значения  $\sigma_b$ , при котором материал разрушается. Значение напряжений, являющееся пределом прочности, у металлов называют временным сопротивлением разрыву  $\sigma_b$ . Деформации, соответствующие временному сопротивлению разрыву, представляют собой относительные удлинения при разрыве  $\epsilon$ .

Во время испытания стали на растяжение определяют предел текучести  $\sigma_t$ , временное сопротивление разрыву  $\sigma_b$  и относительное удлинение при разрыве  $\epsilon$ .

Для ознакомления с основными физико-механическими свойствами арматурных сталей определяют предел текучести, временное сопротивление разрыву, относительное удлинение после разрыва испытываемого арматурного стержня, а также делают заключение о классе арматуры.

Для испытаний на растяжение применяют образцы арматурной стали с необработанной поверхностью диаметром от 3 до 80 мм. Общую длину образцов арматуры назначают с учетом рабочей длины, которая должна составлять не менее 200 мм для образцов диаметром до 20 мм и не менее  $10d$  (где  $d$  – диаметр образца) для образцов диаметром свыше 20 мм. Начальную площадь поперечного сечения  $F_0$ , мм<sup>2</sup>, обработанных образцов арматуры определяют в зависимости от их массы и длины по формуле

$$F_0 = \frac{m}{\rho \cdot l}, \quad (2.1)$$

где  $\rho$  – плотность стали, равная  $7,85 \times 10^{-3}$  г/мм<sup>3</sup>;

$m$  – масса арматурного образца, г;

$l$  – длина образца, мм.

Если образцы диаметром от 3 до 40 мм обточены или круглы и гладки, то площадь поперечного сечения арматуры определяют по фактическому диаметру образца. Для этого диаметр измеряют в двух взаимно перпендикулярных направлениях в трех местах по длине образца: в середине и по концам рабочей части. Площадь поперечного сечения  $F_0$  находят по среднему значению диаметра с погрешностью не более 0,1 мм.

Образцы арматурной стали, имеющие искривления, трещины, расслоения, вмятины, а также поверхностные дефекты, не испытывают, и поэтому они подлежат замене. Испытания арматурной стали считают недействительными при разрыве образца в захватах испытательной машины или по разметочным кернам (рискам) на рабочей длине образца. В таком случае испытания повторяют на вновь подготовленных образцах той же партии.

1. *Определение предела текучести.* Наименьшее напряжение, при котором образец деформируется без видимого увеличения нагрузки, представляет собой предел текучести (этот показатель определяют для арматуры из низкоуглеродистых сталей).

При испытании приготовленный образец арматурной стали закрепляют в зажимах машины, после включения которой следят за показателями стрелки силоизмерителя. После достижения металлом предела текучести стрелка силоизмерителя останавливается, а затем вновь начинает перемещаться. В момент остановки стрелки нагрузку фиксируют и принимают за нагрузку, соответствующую пределу текучести  $\sigma_T$ , МПа, который вычисляют с погрешностью не более 5 МПа по формуле

$$\sigma_T = \frac{P_T}{F_0}, \quad (2.2)$$

где  $P_T$  – нагрузка, соответствующая началу предела текучести;

$F_0$  – начальная площадь поперечного сечения образца в рабочей части, мм<sup>2</sup>.

2. *Определение временного сопротивления разрыву.* Временное сопротивление характеризует напряжение, соответствующее наибольшей нагрузке  $P_{\max}$ , которая предшествует разрушению образца.

Для определения временного сопротивления разрыву  $\sigma_B$  образец растягивают под действием плавно возрастающей нагрузки до разрушения (при этом по силоизмерителю фиксируют максимальную нагрузку  $P_{\max}$ , предшествующую разрушению). Временное сопротивление определяют с погрешностью не более 5 МПа по формуле

$$\sigma_B = \frac{P_{\max}}{F_0}. \quad (2.3)$$

3. *Определение относительного удлинения после разрыва.* Отношение приращения расчетной длины образца к его первоначальной длине представляет собой удлинение.

Относительное удлинение после разрыва  $\varepsilon$  определяют на начальной расчетной длине образцов, в пределах которой произошел разрыв. Начальную расчетную длину образца  $l_0$  принимают равной:

- для арматурной стали диаметром до 10 мм – 100 мм;
- для стали большего диаметра – пяти диаметрам.

Образцы перед испытанием размечают на длину, несколько большую, чем их рабочая длина. Разметку производят на  $n$  равных частей с помощью рисок, наносимых керном. Расстояния между рисками принимают равными: для стержней диаметром менее 10 мм – не более 5 мм, диаметром 10 мм и более – не больше самого их диаметра. Число интервалов, соответствующее начальной расчетной длине образца  $l_0$ , обозначают  $n$ . Если число интервалов получают дробным, то  $n$  округляют до целого числа в большую сторону.

После разрыва образца полученные половинки тщательно складывают вместе так, чтобы их оси образовали одну прямую линию. Если между сложенными концами половинок имеется зазор, получившийся в результате выкрашивания металла при испытании или по другим причинам, то этот зазор включают в длину расчетной (конечной) части образца после разрыва. От места разрыва в одну сторону откладывают  $n/2$  интервалов и ставят метку  $a$  (рис.2.1, а). Дробную величину  $n/2$  округляют до целого числа в большую сторону. Для расчета относительного удлинения участок от места разрыва до первой риски принимают за полный интервал. От метки  $a$  откладывают в сторону разрыва  $n$  интервалов и ставят вторую метку  $b$ . Длина отрезка  $ab$  будет составлять конечную расчетную длину стержня  $l_k$ .

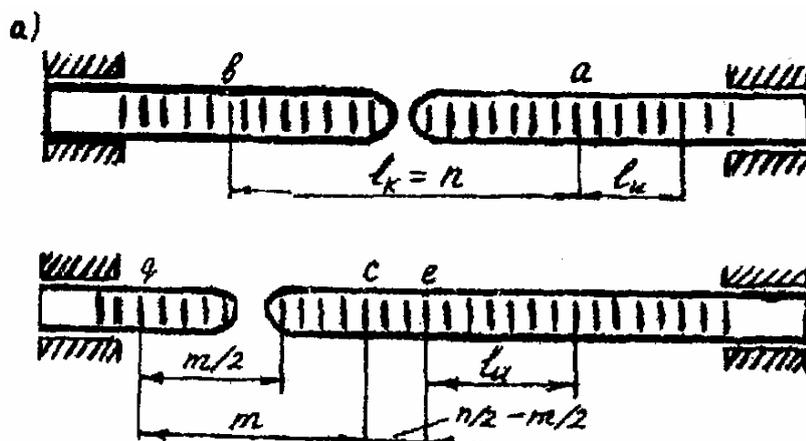


Рис. 2.1. Образцы арматурной стали при определении относительного удлинения после разрыва:

а – в месте разрыва, близком к середине образца (на расстоянии, большем, чем  $n/2$ , от захватов машины); б – в месте разрыва на расстоянии, меньшем, чем  $n/2$ , от захватов машины

В том случае, если место разрыва будет ближе, чем величина  $n/2$  к краю захвата машины, то конечную расчетную длину образца  $l_k$  определяют следующим образом (рис. 2.1, б):

- устанавливают число интервалов от места разрыва до крайней риски  $q$  и обозначают его  $m/2$ ;
- откладывают  $m$  интервалов от точки  $q$  к месту разрыва и ставят метку  $c$ ;
- от метки  $c$  откладывают  $(n/2 - m/2)$  интервалов и ставят метку  $e$ ;
- вычисляют конечную расчетную длину образца по формуле

$$l_k = eq + 2ce, \quad (2.4)$$

где  $eq$  и  $ce$  – длины участков образца соответственно между метками  $c$  и  $q$ ,  $c$  и  $e$ .

Если разрыв происходит на расстоянии от захвата, меньшем, чем длина двух интервалов, то расчетную длину нельзя определить (для этого необходимо провести повторное испытание).

Определив конечную длину  $l_k$ , находят относительное удлинение, %:

$$\varepsilon = \frac{l_k - l_0}{l_0}, \quad (2.5)$$

где  $l_0$  и  $l_k$  – соответственно начальная и конечная расчетная длина образца.

Результаты испытаний записывают в табличной форме (табл.2.7), а затем, сопоставляя их со стандартными значениями, делают заключение о пригодности стали к данному классу арматурной стали.

Т а б л и ц а 2 . 7

Физико-механические свойства арматурных сталей

Класс арматуры	Предел текучести стали, МПа	Временное сопротивление разрыву, МПа	Относительное удлинение, %
1	2	3	4

## 2.2. Механический способ натяжения арматуры.

### Контроль величины предварительного напряжения

Железобетонные конструкции, армированные обычной (ненапряженной) арматурой, обладают существенным недостатком: малой трещиностойкостью и большим расходом арматуры. В таких конструкциях в растянутой зоне бетона появляются трещины при нагрузках, значительно меньших расчетных, что объясняется малой предельной деформативностью бетона при растяжении и его незначительным сопротивлением растяжению. В связи с этим при производстве сборного железобетона большое

распространение получил метод предварительного натяжения несущей арматуры в конструкции, позволяющий повысить трещиностойкость и деформативность железобетонных изделий и конструкций.

Напряжения, передаваемые с арматуры на бетон, могут создавать в конструкциях одноосное (балки, плиты, фермы), двуосное (плиты, опертые по контуру) и объемное (напорные трубы) обжатие.

Предварительное напряжение железобетонных конструкций в результате обжатия бетона в растянутой зоне позволяет:

- уменьшить расход арматуры за счет применения высокопрочных арматурных сталей;
- повысить трещиностойкость, жесткость и выносливость конструкций;
- сократить расход бетона и снизить массу конструкций.

Для натяжения арматуры применяют следующие способы:

- механический;
- электротермический;
- электротермомеханический.

Возможно также применение расширяющегося цемента для изготовления самоуплотняющегося железобетона.

Контроль преднапряжения арматуры осуществляют в процессе натяжения и в натянутом состоянии. В первом случае контроль проводят:

- по показаниям манометра, по массе грузов либо по удлинению арматуры при механическом способе натяжения;
- по температуре при электротермическом способе. Контроль напряжения арматуры в натянутом состоянии основан на определении усилий натяжения по поперечной оттяжке арматуры (приборы ПРД и др.) и по частоте собственных колебаний арматуры – частотный метод (приборы типа ИПН, ИНА и др.).

Для ознакомления со способами натяжения арматуры, изучения механического способа натяжения арматуры и метода контроля величины напряжения в арматуре выполняются работы в следующей последовательности:

- а) производят натяжение арматуры поэтапно с шагом 10 % условного предела текучести  $\sigma_{0,2}$  (в интервале от 30 до 80 %  $\sigma_{0,2}$ );
- б) определяют путем расчета для каждого этапа:
  - теоретическое значение удлинения арматуры  $\Delta l_p$ ;
  - величину усилия  $N_p$  и показания манометра домкрата  $P_m$ ;
- в) измеряют в процессе натяжения на каждом этапе:
  - фактическое удлинение арматуры (на базе  $l = 200$  мм) при расчетном показании манометра домкрата  $P_m$ , соответствующем величине теоретически рассчитанного удлинения  $\Delta l_p$ ;

➤ величину напряжений  $\sigma_a^{\phi}$  в натянутой арматуре по показанию приборов ПРД-6 и ИПН-7.

Натяжение арматурного стержня осуществляют на стенде (рис.2.2) с помощью гидравлического домкрата. Контроль заданной величины напряжения  $\sigma$  ведут по деформации арматурного стержня  $\Delta l$  (либо относительным деформациям  $\varepsilon = \Delta l/l$ ).

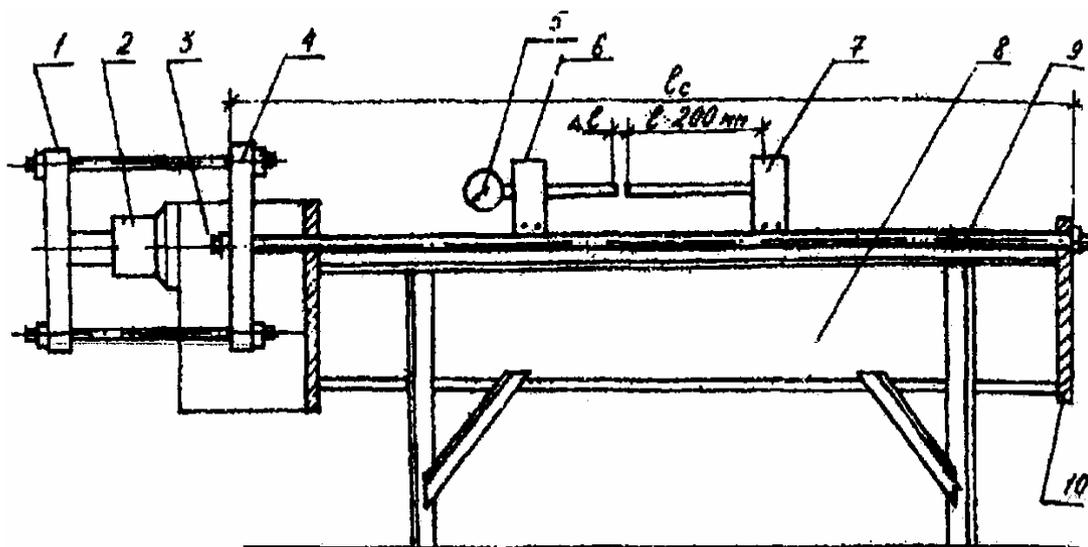


Рис. 2.2. Стенд для натяжения арматуры:  
1, 4 – тяги; 2 – гидравлический домкрат; 3 – головной упор; 5 – индикатор часового типа; 6, 7 – фиксаторы, 8 – швеллер; 9 – арматурный элемент; 10 – хвостовой упор

Арматурный элемент 9 фиксируют в прорезях головного 3 и хвостового 10 упоров стенда. Гидравлический домкрат 2 устанавливают на опорную площадку головного упора 3. Тяги 1, 4 фиксируют на поршне домкрата 2.

В центральной части арматурного элемента закрепляют фиксаторы 6, 7 для крепления индикатора часового типа 5. Напряжение в арматуре создают гидродомкратом плавно. Величину удлинения стержня  $\Delta l$  измеряют на базе  $l = 200$  мм с помощью индикатора часового типа с точностью до 0,01 мм.

Для фиксирования заданного значения  $\sigma$  необходимо добиться заданной величины удлинения  $\Delta l$ .

#### 1. Определение теоретических значений удлинения арматуры.

При напряжении в арматуре, равном или меньшем 70 % условного предела текучести, теоретическое удлинение, см, рассчитывают по формуле

$$\Delta l_p = \frac{\sigma_0}{E} \cdot l, \quad (2.6)$$

где  $\sigma_0$  – заданное напряжение в арматуре, МПа,  $\sigma_0 = \sigma_{0,2} \cdot d$  ( $d$  – заданная величина натяжения, %);

$E$  – начальный модуль упругости арматуры, МПа (табл. 2.8);

$l$  – начальная длина арматуры, см.

При напряжении в арматуре, большем 70 % условного предела текучести, теоретическое удлинение, см, вычисляют по формуле

$$\Delta l_p = \left[ \frac{\sigma_0}{E} + 0,014 \left( \frac{\sigma_0}{\sigma_{0,2}} - 0,7 \right)^3 \right] \cdot l, \quad (2.7)$$

где  $\sigma_{0,2}$  – условный предел текучести арматуры, МПа.

Величину  $\Delta l_p$  пересчитывают для базы  $l = 200$  мм.

Т а б л и ц а 2 . 8

Характеристика упругости арматурной стали

Вид арматурной стали	Класс арматурной стали	Модуль упругости $E$ , МПа/см <sup>2</sup>
Арматурная проволока:		
– гладкая	В-II	$2,0 \cdot 10^5$
– периодического профиля	Вр-II	$2,0 \cdot 10^5$
Стержневая арматура:		
– упрочненная вытяжкой периодического профиля	А-IIIв (А400)	$2,0 \cdot 10^5$
– горячекатаная периодического профиля	А-IV (А600)	$2,0 \cdot 10^5$
	А-V (А800)	$1,9 \cdot 10^5$
– термически упрочненная периодического профиля	Ат400	$1,9 \cdot 10^5$
	Ат500	$1,9 \cdot 10^5$
	Ат600	$1,9 \cdot 10^5$

2. *Определение величины натяжения арматуры и показания манометра домкрата.*

Усилие натяжения  $P$  рассчитывают по формуле

$$P = \sigma_0 \cdot F_a \cdot K, \quad (2.8)$$

где  $P$  – усилие натяжения в стержне, кг;

$F_a$  – площадь поперечного сечения арматуры, см<sup>2</sup>;

$K$  – количество одновременно натягиваемых стержней ( $K=1$ ).

Показания манометра домкрата определяют по формуле

$$P_m = \frac{P}{\eta \cdot F}, \quad (2.9)$$

где  $\eta$  – средний коэффициент полезного действия домкрата, равный 0,95-0,97;

$F$  – площадь поршня домкрата, равная 50 см<sup>2</sup>.

### 3. Контроль величины натяжения арматуры.

*Механический метод* контроля натяжения арматуры основан на упругой оттяжке стержня с помощью тарировочной пружины, которой сообщают постоянное перемещение. При изменении величины предварительного натяжения на приборе ПРД-6 (рис. 2.3, 2.4) прибор ставят упорными лапками 1 на балку под середину арматурного стержня с погрешностью не более 2%. Арматуру захватывают захватным крюком 2 и предварительно подтягивают на заданное число делений индикатора  $x_0$ . Прибор включают в работу при смещении стрелки индикатора на 5 делений. После того, как установлено исходное положение прибора и снято показание по лимбу  $x$ , производят контрольную оттяжку арматуры. Эту операцию выполняют вручную плавным поворотом ручки, жестко соединенной с лимбом 8 тягового винта 7, на заданное целое число оборотов ( $n=3-5$ ) с фиксацией показаний на лимбе. После этого с индикатора 5 снимают показания  $x_1$ . Разница показаний  $I_{пр}$ , выраженная числом делений индикатора, представляет собой косвенную характеристику силы предварительного натяжения арматуры:

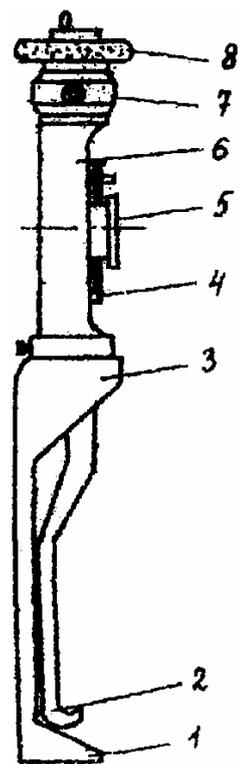


Рис. 2.3. Схема прибора ПРД-6:  
1 – выступ упора;  
2 – крюк; 3 – упор;  
4 – пружина; 5 – индикатор;  
6 – корпус; 7 – ручка;  
8 – лимб

$$I_{пр} = x_1 - x_0, \quad (2.10)$$

где  $I_{пр}$  – показания индикатора при оттяжке пружины (число делений индикатора, деленное на 1000, см);

$x_1 - x_0$  – деформация пружины прибора (см. деления индикатора).

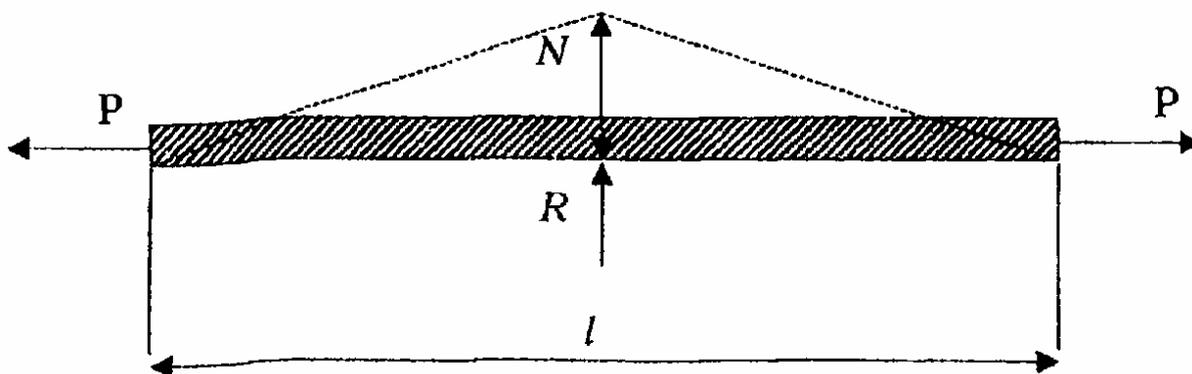


Рис. 2.4. Схема оттяжки арматуры

Усилие натяжения в стержне (см. рис.2.4) определяют по формуле

$$P = \frac{R \cdot l_c}{4N}, \quad (2.11)$$

где  $R$  – изгибающая сила, МПа (рис. 2.5);

$l_c$  – длина стержня, равная 360 см;

$N$  – прогиб стержня, см,

$$N = (n \cdot h) - I_{пр}; \quad (2.12)$$

здесь  $n$  – число оборотов маховичка;

$h$  – шаг резьбы, равный 0,175 см.

Напряжение в арматурном стержне вычисляют по формуле

$$\sigma = \frac{P}{S}, \quad (2.13)$$

где  $S$  – площадь поперечного сечения арматурного стержня, см<sup>2</sup>.

В табл. 2.9 приведены рассчитанные по формулам (2.11), (2.12), (2.13) для прибора ПРД-6 тарировочные характеристики показателей  $R$ ,  $N$  и  $\sigma$  в зависимости от изменения значений  $I_{пр}$ . По полученным результатам строят график в координатах « $\sigma$  –  $\varepsilon$ ».

*Частотный метод* контроля натяжения арматуры основан на собственных колебаниях при возбуждении арматурного стержня с частотой, зависящей от силы его натяжения, расстояния между точками закрепления и диаметра стержня. Частоту колебаний определяют в середине пролета со смещением, не превышающим 2 %.

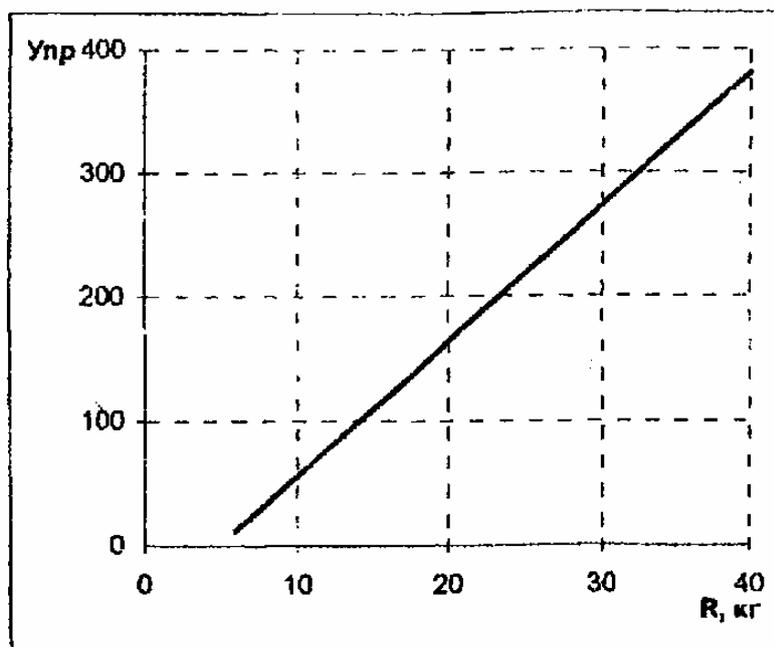


Рис. 2.5. Тарировочный график определения изгибающей силы  $R$  пружины прибора ПРД-6

Таблица 2.9

Взаимосвязь напряжения в арматурном стержне  $\sigma$   
с величиной прогибов  $L_{пр}$  и частотой собственных колебаний  $f$

Число делений индикатора $f$	Показатели			
	по прибору РД-6			по прибору ИПН-7
	Изгибающая сила пружины, $R$ , кг	Прогиб стержня $N$ , см	Напряжение в стержне $\sigma$ , МПа/см <sup>2</sup>	Напряжение в стержне $\sigma$ , МПа/см <sup>2</sup>
1	2	3	4	5
100	15	0,775	113,0	41,5
110	16	0,765	122,0	50,2
120	17	0,755	131,0	59,8
130	18	0,745	141,0	70,2
140	18,5	0,735	147,0	81,4
150	19,5	0,725	157,0	93,5
160	20	0,715	163,0	106,0
170	21	0,705	174,0	120,0
180	22	0,695	185,0	134,5
190	23	0,985	196,0	150,0
200	23,5	0,675	204,0	166,0
210	24,5	0,665	215,0	183,0
220	25,5	0,655	227,0	200,0
230	26	0,645	235,0	220,0
240	27	0,635	248,0	239,0
250	28	0,625	261,0	260,0
260	29	0,615	275,0	280,0
270	29,5	0,605	285,0	302,0
280	30,5	0,595	299,0	325,0
290	31,5	0,585	314,0	350,0
300	32,2	0,575	326,0	374,0
310	33	0,565	340,0	399,0
320	34	0,555	358,0	423,0
330	35	0,545	376,0	453,0
340	35,7	0,535	390,0	480,0
350	36,3	0,525	406,0	523,0
360	37,5	0,515	425,0	538,0
370	38,5	0,505	445,0	570,0
380	39	0,495	460,0	597,0
390	40	0,485	482,0	632,0
400	41	0,475	504,0	664,0

Для прибора ИПН-7 (рис. 2.6) датчик располагают рабочей поверхностью на расстоянии 0,5-3 см от стержня. Ударом молотка стержень приводят в колебание (плоскость колебаний должна быть перпендикулярна плоскости датчика), через две секунды нажимают кнопку «Пуск» прибора и записывают показания счетчика.



Рис. 2.6. Схема прибора ИПН-7

Натяжение в стержне определяют по формуле

$$\sigma = \frac{4\rho \cdot l_c^2 \cdot f^2}{g}, \quad (2.14)$$

где  $\rho$  – плотность арматурной стали ( $\rho = 7,85 \cdot 10^3$  кг/см<sup>3</sup>);

$l_c$  – длина стержня ( $l_c = 360$  см);

$g$  – ускорение свободного падения ( $g = 980$  см/с).

Формула (2.14) может быть записана в другом виде:

$$\sigma = 0,319 \cdot 10^{-6} \cdot l^2 \cdot f^2. \quad (2.15)$$

По экспериментальным значениям  $f$ , представленным в табл.2.9, находят соответствующее значение  $\sigma$  и записывают его в табличной форме (табл. 2.10).

Т а б л и ц а 2 . 1 0

Результаты измерений натяжений в арматурном стержне

Номер испытания	Усилие натяжения арматуры $\sigma$ , МПа	Относительное удлинение арматуры $\epsilon$ , %	Показания измерения предварительного натяжения арматуры $\sigma$ , МПа		Погрешность измерения	Примечание
			по прибору ПРД-6	по частоте собственных колебаний (прибор ИПН-7)		
1	2	3	4	5	6	7

### 3. ПОВЫШЕНИЕ СТЕПЕНИ ЗАВОДСКОЙ ГОТОВНОСТИ И УЛУЧШЕНИЕ КАЧЕСТВА ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ИЗДЕЛИЙ

Одним из важнейших условий повышения качества железобетонных изделий является правильная организация систем контроля и управления качеством на заводах сборного железобетона.

Оценка качества сборного железобетона предусматривает проведение целого ряда операций как в процессе изготовления, так и при выпуске готовой продукции: контроль качества исходных материалов; правильное назначение состава бетона; контроль за однородностью бетона по прочности; контроль геометрических размеров и т.д.

Контроль прочности бетона на сжатие занимает важнейшее место в оценке качества железобетонных изделий. Вместе с тем оценка прочности бетона по результатам испытания контрольных кубов на сжатие не дает достоверных сведений о состоянии конструкций из этого бетона. Это объясняется тем, что при изготовлении образцов не учитывается целый ряд производственных факторов. В связи с этим разработаны различные методы оценки прочности и других свойств бетона непосредственно в изделиях без их разрушения.

При практическом выборе из множества существующих методов целесообразно пользоваться общей классификацией методов испытания строительных материалов (рис. 3.1).

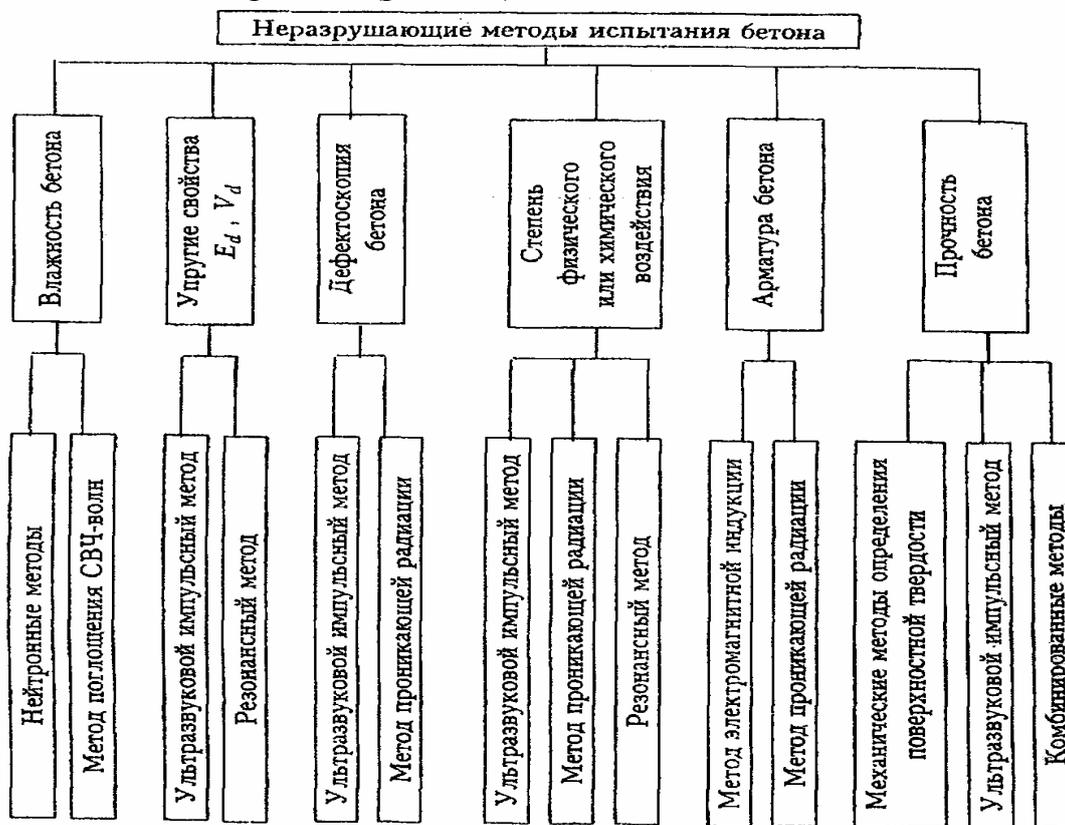


Рис. 3.1. Классификация методов испытания строительных материалов

Согласно этой классификации для оценки прочности бетона можно использовать неразрушающие методы, позволяющие осуществлять контроль прочности как на изделиях, так и на образцах.

### 3.1. Изучение неразрушающих методов оценки прочности бетона

В настоящее время предложено достаточно большое количество методов (механических и физических) и приборов для определения контроля прочности бетона в изделиях без разрушения.

Механические методы испытаний являются наиболее многочисленными из существующих способов оценки прочности бетона в сооружениях и изделиях.

Из механических методов одним из наиболее распространенных является метод пластической деформации. Применение этого метода для определения прочности бетона основано на взаимосвязи между прочностью  $R$  и размерами отпечатков на бетонной поверхности, которые характеризуют пластическую деформацию бетона при вдавливании штампа под действием нагрузки.

Методы пластической деформации подразделяются на два вида: первый – штамп вдавливается под действием статической или динамической нагрузки; второй – местное разрушение бетона наступает в результате стрельбы или взрыва.

В большинстве существующих механических приборов, применяемых при испытании методом пластической деформации первого вида, используется принцип вдавливания бойка ударника в исследуемую поверхность бетона с последующим измерением геометрических параметров образовавшейся вмятины. Наиболее распространенным является эталонный молоток Кашкарова, состоящий из головки, рабочая часть которой снабжена стальным шариком диаметром  $d = 15,88$  мм. В стакане молотка между его корпусом и шариком имеется отверстие, в которое вставляется эталонный стержень. Эталонные стержни представляют собой заостренные с одного конца стальные стержни диаметром  $d = 12$  (или 10 мм), длиной 10-15 см (рис. 3.2).

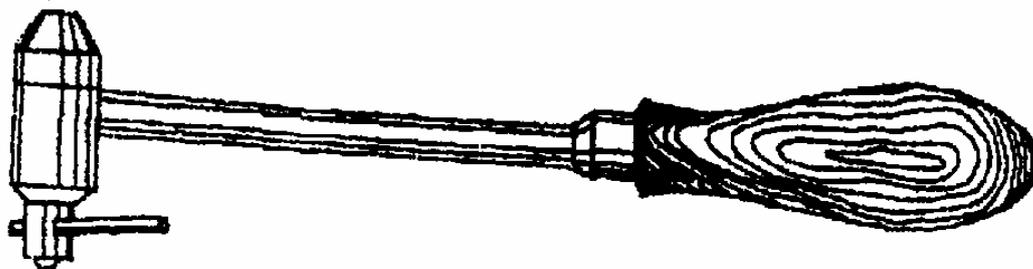


Рис. 3.2. Эталонный молоток Кашкарова

Оценка прочности бетона с помощью молотка Кашкарова сводится к построению градуировочной зависимости  $R - d_0/d_3$ .

Другие приборы для определения прочности бетона основаны на зависимости между  $R$  и высотой отскока бойка от ударника, прижатого к бетону. Например, склерометр Шмидта, прибор КМ, маятниковый прибор В.В. Царицина и т.д.

Применение физических методов испытания позволяет оценить качество бетона не только на поверхности, но и во внутренних слоях конструкции; при этом измерения можно производить многократно без повреждения поверхностей. Широко используется ультразвуковой импульсный метод. Сущность его состоит в измерении времени распространения через бетон продольной ультразвуковой волны или скорости ультразвука  $v$  (рис. 3.3). Для определения скорости  $v$  необходимо знать время прохождения ультразвука на участке установленной длины, называемом базой прозвучивания  $l$ .

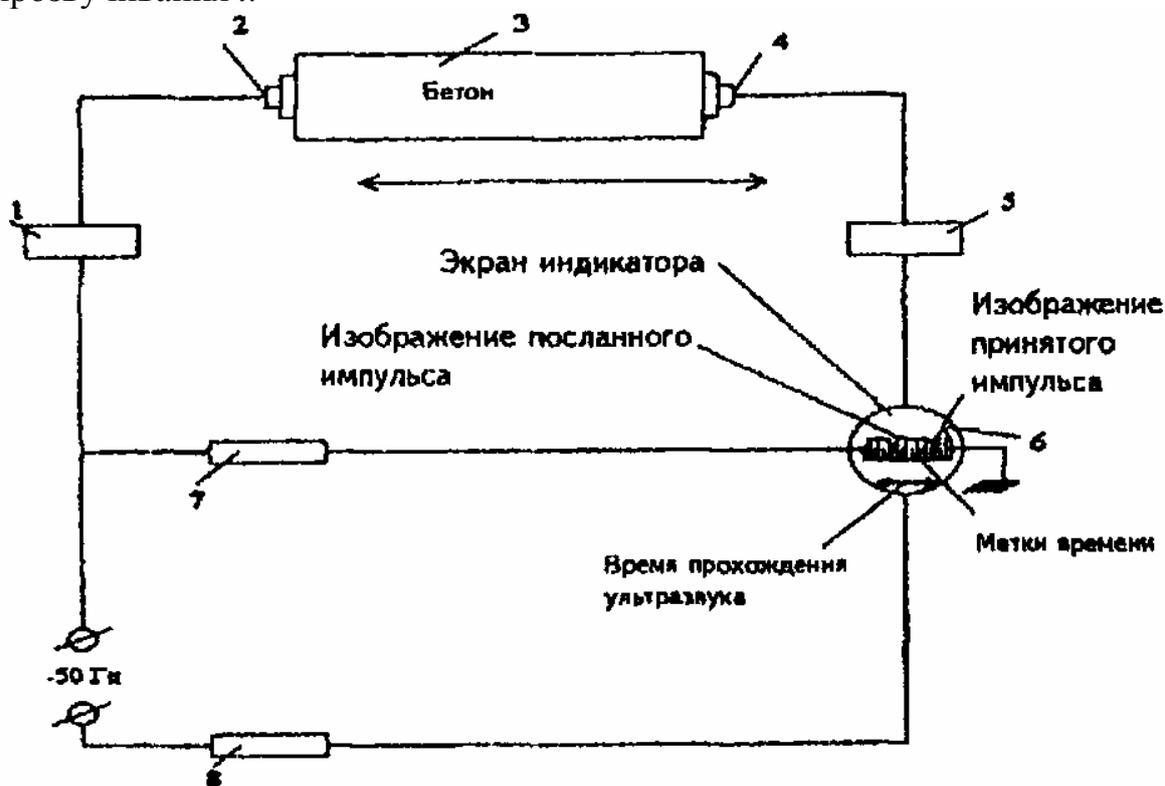


Рис 3. 3. Принципиальная схема ультразвукового прибора УЗП-62:  
1 – генератор; 2 – излучатель; 3 – бетон; 4 – приемник; 5 – усилитель;  
6 – индикатор; 7 – электронное устройство; 8 – генератор меток времени

Для возбуждения ультразвуковых волн и измерения времени их прохождения через бетон применяют специальную аппаратуру, принцип работы которой состоит в следующем. Электронный генератор периодически посылает электрические импульсы на излучатель, в котором они преобразуются в ультразвуковые механические волны и, проходя через исследуемый бетонный элемент, попадают на щуп-приемник. В приемнике

ультразвуковые колебания преобразуются в электрические импульсы, направляемые в усилитель. Усиленный импульс попадает на индикатор, которые фиксирует время прохождения ультразвукового импульса через бетон.

Методика определения прочности бетона, осуществляемого с помощью ультразвукового импульсного и механического методов с использованием молотка Кашкарова, предусматривает работы, выполняемые в два этапа:

I – испытание опытных образцов бетона неразрушающим методом с последующим разрушением их на прессе;

II – построение тарировочных зависимостей  $R = f(v)$ ,  $R = f(d_6/d_3)$ .

Использование ультразвукового импульсного метода определения прочности бетона осуществляется в соответствии с ГОСТ 17624–78.

Скорость ультразвука определяют по результатам измерения времени распространения ультразвука на выбранном участке контролируемого образца. Образцы изготавливаются в соответствии с ГОСТ 10180–78. Для проведения испытаний могут использоваться опытные образцы из бетона.

При измерении скорости распространения ультразвука должен быть обеспечен надежный акустический контакт между бетоном и рабочими поверхностями датчиков, для чего поверхности контакта смазывают техническим вазелином.

При выборе участков испытаний не допускается наличие местных раковин и воздушных пор диаметром и глубиной более 2 мм. Измерение скорости прохождения ультразвука осуществляется методом сквозного прозвучивания. Замер производится в трех точках в направлении, перпендикулярном укладке бетона в формы (рис.3.4).

Скорость ультразвука определяется по формуле

$$v=l/t, \tag{3.1}$$

где  $l$  – база прозвучивания, м;

$t$  – время распространения ультразвука, с.

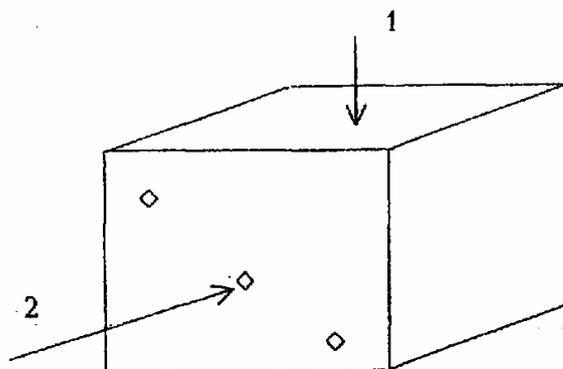


Рис. 3.4. Схема расположения контрольных точек при прозвучивании бетонного изделия:

1 – направление укладки бетона; 2 – направление прозвучивания образца

По трем измерениям находится среднее арифметическое значение скоростей распространения ультразвука в бетоне. Затем прозвученные образцы испытываются на прессе для определения прочности бетона на сжатие.

Т а б л и ц а 3 . 1

Результаты ультразвуковых испытаний

Номер образца	Номера точек прозвучивания	База прозвучивания $l$ , м	Время прозвучивания $t$ , с	Скорость $v$ , м/с	Площадь образца, $см^2$	$R_b$ , МПа
1						
2						
3						

Результаты ультразвуковых испытаний используются для построения тарировочного графика «прочность бетона – скорость ультразвука» (рис.3.5).

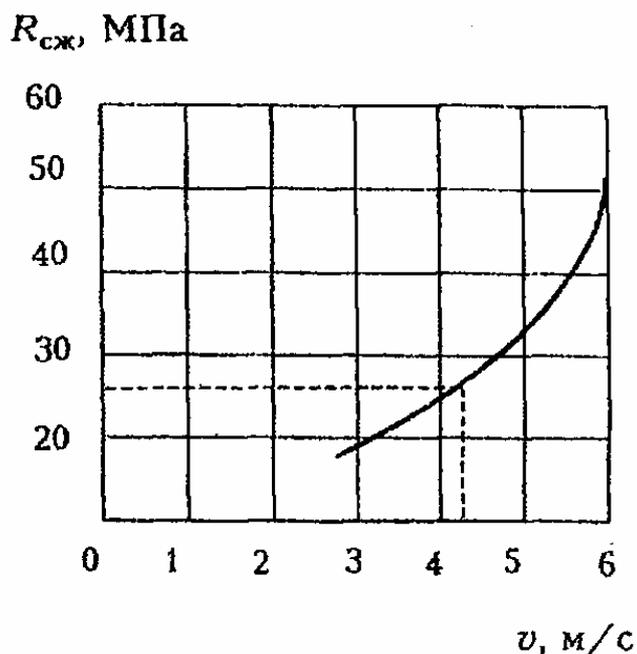


Рис.3.5. Тарировочная кривая «прочность бетона – скорость ультразвука»

Методика оценки прочности бетона механическим методом производится следующим образом. С помощью молотка Кашкарова осуществляются удары по поверхности бетона на расстоянии не менее 30 мм друг от друга. В момент нанесения удара ось головки эталонного молотка должна быть перпендикулярна к поверхности конструкции. При этом стальной шарик образует лунки на эталонном круглом стержне ( $d_3$ ) и поверхности бетона ( $d_6$ ). Диаметр лунок следует измерять с точностью до 0,1 мм. После каждого удара эталонный стержень передвигают на расстояние не менее

10 мм. Затем вычисляют среднее значение  $d_5$  и  $d_6$  всех лунок и их отношения  $d_6/d_5$ . Результаты испытаний заносятся в табл.3.2.

Таблица 3.2

Результаты механических испытаний

Номера образцов	Отпечатки на бетоне, мм		Отпечатки на эталоне, мм		$d_6/d_5$	Прочность бетона, МПа
	$d_1, d_2, d_3$	$d_{cp}$	$d_1, d_2, d_3$	$d_{cp}$		
1						
2						
3						

По полученным данным (см. табл. 3.2) строится тарировочная зависимость  $R - d_6/d_5$  (рис. 3.6). Имея тарировочные кривые (см. рис.3.5 и 3.6), можно определить прочность бетона в изделии.

$R_{сж}$ , МПа

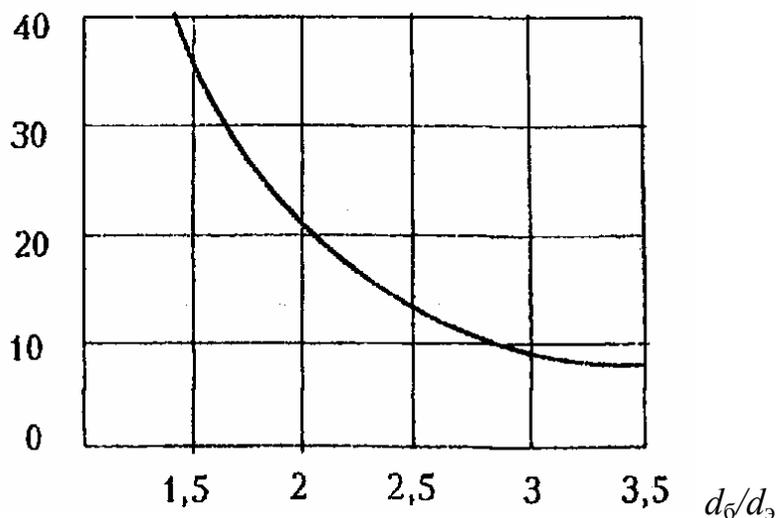


Рис. 3.6. Тарировочная кривая определения прочности бетона

### 3.2. Статистический метод контроля и оценки прочности бетона с учетом его однородности

На предприятии при изготовлении бетонной смеси и производстве сборных конструкций, а также на строительных площадках при бетонировании монолитных конструкций должны осуществляться статистический контроль и приемка бетона по прочности с учетом однородности.

Приемка бетона путем сравнения его фактической прочности с нормируемой без учета характеристик однородности прочности не допускается.

Контролю подлежат:

I. Отпускная прочность бетона – для сборных конструкций без предварительного напряжения сборных конструкций и с предварительным напряжением, если отпускная прочность выше передаточной.

II. Передаточная прочность бетона – для предварительно напряженных конструкций.

III. Прочность бетона в проектном возрасте – для сборных монолитных конструкций.

IV. Прочность бетона в установленном проектной документацией промежуточном возрасте – для монолитных конструкций (при снятии несущей опалубки и т.д.).

В случаях, когда нормируемая отпускная или передаточная прочность бетона составляет 90 % и более от установленного для данного класса (марки), контроль прочности в проектном возрасте не производится.

При контроле прочности бетона одного состава и возраста, изготовленного по одной технологии из одних и тех же сырьевых материалов, наблюдается расхождение результатов испытания. Это расхождение обусловлено влиянием многочисленных факторов случайной природы – различными размерами, формой и поверхностью зерен заполнителей, неоднородностью их распределения в бетоне, ошибками дозировки составляющих, отклонениями от установленных режимов перемешивания, формования, твердения и др., – не поддающихся учету и регулированию без изменения технического уровня производства. В результате образуется ряд значений прочности бетона, среди которых имеются близкие и даже одинаковые.

Средняя прочность бетона для каждого класса, приведенного в СНиП 2.03.01–84, определяется по формуле

$$\bar{R} = \frac{B}{0,0980665(1 - 1,64v_R)}, \quad (3.2)$$

где  $\bar{R}$  – средняя прочность бетона для данного класса;

$B$  – класс бетона по прочности;

$v_R$  – коэффициент вариации.

Нормативный коэффициент вариации, принятый по СНиП 2.03.01–84, составляет 13,5 %.

Соотношение между классами бетона по прочности на сжатие и растяжение и марками при нормативном коэффициенте вариации, равном 13,5 %, представлено в табл.3.3 (ГОСТ 26633–91).

Таблица 3.3

Соотношение между классами бетона по прочности на сжатие и растяжение и марками при нормативном коэффициенте вариации, равном 13,5 % (ГОСТ 26633–91)

Класс бетона по прочности	Средняя прочность бетона $R$ , кгс/см <sup>2</sup>	Ближайшая марка бетона по прочности	Отклонение ближайшей марки бетона от средней прочности класса $\frac{M - \bar{R}}{\bar{R}} \cdot 100\%$
<i>Сжатие</i>			
B3,5	45,8	M50	+9,2
B5	65,5	M75	+14,5
B7,5	98,2	M100	+1,8
B10	131,0	M150	+14,5
B12,5	163,7	M150	-8,4
B15	196,5	M200	+1,8
B20	261,9	M250	-4,5
B22,5	294,5	M300	+1,9
B25	327,4	M350	+6,9
B26,5	359,9	M350	-2,7
B30	392,9	M400	+1,8
B35	458,4	M450	-1,8
B40	523,9	M550	+5,0
B45	589,4	M600	+1,8
B50	654,8	M700	+6,9
B55	720,3	M700	-2,8
B60	785,8	M800	+1,8
B65	851,5	M900	+5,7
B70	917,0	M900	-1,8
B75	932,5	M1000	+1,8
B80	1048,0	M1000	-4,9
<i>Осевое растяжение</i>			
B <sub>t</sub> 0,4	5,2	P <sub>t</sub> 5	-3,8
B <sub>t</sub> 0,8	10,5	P <sub>t</sub> 10	-4,8
B <sub>t</sub> 1,2	15,7	P <sub>t</sub> 15	-4,5
B <sub>t</sub> 1,6	20,9	P <sub>t</sub> 20	-4,3
B <sub>t</sub> 2,0	26,2	P <sub>t</sub> 25	-4,6
B <sub>t</sub> 2,4	31,4	P <sub>t</sub> 30	-4,5
B <sub>t</sub> 2,8	36,7	P <sub>t</sub> 35	-4,6
B <sub>t</sub> 3,2	41,9	P <sub>t</sub> 40	-4,5
B <sub>t</sub> 3,6	47,2	P <sub>t</sub> 45	-4,7
B <sub>t</sub> 4,0	52,4	P <sub>t</sub> 50	-4,6

В зависимости от технического уровня предприятия, качества сырья, технологического регламента изготовления значение коэффициента вариации прочности бетона может отличаться от принятого среднего значения и колебаться от 4-6 до 20-25 %. Следовательно, изделие, имеющее высокую однородность бетона (низкий коэффициент вариации), будет иметь лишний запас прочности, а изделие, имеющее большой коэффициент вариации, – недостаточный ее запас.

Для назначения требований к прочности бетона, при которых соблюдается постоянная обеспеченность нормативных сопротивлений, необходимо иметь данные о показателях вариации прочности бетона. Такие данные могут быть получены при проведении систематического статистического контроля прочности бетона.

Сущность статистического метода контроля прочности бетона (ГОСТ 181050–80, 18105.2–80) заключается в том, что по результатам испытаний небольшого количества проб математически оценивается прочность всего контролируемого объема бетона. Статистическая оценка прочности и однородности бетона по каждому виду нормируемой прочности (отпускной, передаточной, проектной) производится в следующей последовательности.

1. *Определение прочности бетона в партии.* Фактическую прочность в каждой из партий, изготовленных в течение установленного стандартом периода (анализируемого), находят по формуле

$$R_m = \frac{\sum_{i=1}^n R_i}{n}, \quad (3.3)$$

где  $R_m$  – фактическая прочность бетона в партии, МПа;

$R_i$  – единичное значение прочности бетона в партии, МПа;

$n$  – общее число единичных значений прочности бетона в партии.

2. *Определение характеристик однородности бетона по прочности.*

В течение анализируемого периода для каждой партии бетона вычисляют среднее квадратичное отклонение  $S_m$  по формуле

$$S_m = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n (R_i - R_m)^2}}{n - 1}. \quad (3.4)$$

Если число единичных значений прочности бетона в партии от 2 до 6, значение  $S_m$  вычисляют по формуле

$$S_m = \frac{W_m}{\alpha}, \quad (3.5)$$

где  $W_m$  – размах единичных значений прочности бетона в партии, определяемый как разность между максимальным и минимальным единичными значениями прочности, МПа;

$\alpha$  – коэффициент, зависящий от числа единичных значений прочности бетона в партии и принимаемый по табл.3.4.

Т а б л и ц а 3 . 4

Зависимость коэффициента  $\alpha$  от числа единичных значений прочности бетона в партии

Число единичных значений	2	3	4	5	6
Значение коэффициента $\alpha$	1,13	1,69	2,06	2,33	2,5

Коэффициент вариации прочности бетона в партии в процентах вычисляют по формуле

$$V_m = \frac{S_m}{R_m} \cdot 100 \% , \quad (3.6)$$

где  $V_m$  – коэффициент вариации прочности бетона в партии, %.

Среднее значение партионного коэффициента вариации прочности бетона за анализируемый период  $V_n$ , %, определяют по формуле

$$V_n = \frac{\sum_{i=1}^n V_{m,i} \cdot n_i}{\sum_{i=1}^n n_i} , \quad (3.7)$$

где  $V_{m,i}$  – коэффициент вариации прочности бетона в каждой  $i$ -й из  $N$  проконтролированных в течение анализируемого периода партий бетона, вычисленный по формуле (3.6);

$n_i$  – число единичных значений прочности бетона в каждой  $i$ -й из  $N$  партий бетона, проконтролированных в течение анализируемого периода;

$\sum_{i=0}^n n_i$  – общее число единичных значений прочности бетона.

### 3. Определение требуемой прочности бетона.

По характеристикам однородности прочности бетона в анализируемом периоде определяют требуемую прочность бетона для последующего контролируемого периода по формуле

$$R_T = B_{\text{норм}} \cdot K_T , \quad (3.8)$$

где  $R_T$  – требуемая прочность бетона (отпускная, передаточная, проектная) при нормировании прочности по классам, МПа;

$R_{\text{норм}}$  – нормируемое значение прочности бетона (отпускной, передаточной, проектной) для бетона данного класса по прочности на сжатие, осевое растяжение или растяжение при изгибе, МПа;

$K_T$  – коэффициент требуемой прочности для всех видов бетонов, принимаемый по табл. 3.5 в зависимости от среднего партионного коэффициента вариации прочности бетона, вычисленного по формуле (3.7).

Т а б л и ц а 3 . 5  
Значения коэффициента требуемой прочности

$V_n, \%$	$K_T$			
	Для всех видов бетонов (кроме плотных силикатных, ячеистых)	Для плотного силикатного бетона	Для автоклавного ячеистого бетона	Для массивных гидротехнических конструкций
6 и менее	1,07	1,06	1,08	1,09
7				
8	1,08	1,07	1,09	1,10
9	1,09	1,08	1,10	1,11
10	1,11	1,09	1,12	1,13
11	1,14	1,12	1,13	1,14
12	1,18	1,14	1,14	1,16
13	1,23	1,18	1,17	1,18
14	1,28	1,22	1,22	1,20
15	1,33	1,27	1,26	1,22
16	1,38	1,33	1,32	1,23
17	1,43	1,39	1,37	1,25
18	–	1,46	1,43	1,28
19	–	–	1,50	1,32
20	–	–	1,57	1,36 1,39
21 и более	Область недопустимых значений			

При нормировании прочности бетона по маркам требуемую прочность определяют по формуле

$$R_T = R_{\text{норм}} \frac{K_T'}{100}, \quad (3.9)$$

где  $R_{\text{норм}}$  – нормируемое значение прочности бетона (отпускной, передаточной, проектной) для бетона данной марки по прочности, МПа;

$K_T'$  – коэффициент требуемой прочности для всех видов бетона, принимаемый по табл.3.6 с учетом среднего коэффициента вариации прочности бетона, вычисленного по формуле (3.7).

Таблица 3.6

Значения коэффициента требуемой прочности, %, для всех видов бетонов

$V_n, \%$	$K_T$			
	Для всех видов бетонов (кроме плотных силикатных, ячеистых) и конструкций, кроме массивных гидротехнических	Для плотного силикатного бетона	Для автоклавного ячеистого бетона	Для массивных гидротехнических конструкций
1	2	3	4	5
6 и менее	83	82	75	85
7	84	83	76	86
8	85	84	77	87
9	87	85	78	88
10	89	87	79	89
11	92	89	80	91
12	96	92	82	92
13	100	96	85	94
14	104	100	88	95
15	108	105	92	96
16	112	110	96	98
17	–	115	100	100
18	–	–	105	103
19	–	–	110	106
20	–	–	–	109
21 и более	Область недопустимых значений			

#### 4. Определение среднего уровня прочности бетона.

Средний уровень прочности бетона с учетом его межпартионного коэффициента вариации и верхнюю предупредительную границу средней прочности бетона в контролируемой партии определяют по формуле

$$R_y = R_T \cdot K_{м.п}, \quad (3.10)$$

где  $K_{м.п}$  – коэффициент межпартионной вариации прочности бетона, принимаемый по табл.3.7, в зависимости от среднего коэффициента вариации  $V_n$ .

Таблица 3.7

Значения коэффициента  $K_{м.п}$ 

$V_n, \%$	6 и менее	От 6 до 7	От 7 до 8	От 8 до 10	От 10 до 12	От 12 до 14	14 и более
$K_{м.п.}$	1,03	1,04	1,05	1,07	1,09	1,12	1,15

Значение  $K_{м.п}$  для тяжелого и легкого бетона не должно превышать 1,1, а для плотного силикатного – 1,13.

Допускается превышение фактической средней прочности бетона сборных конструкций за контролируемый период  $R_{ф}$  над требуемой прочностью  $R_{т}$ . Это превышение характеризуется коэффициентом  $K_{п}$ , вычисленным по формуле

$$K_{п} = \frac{R_{ф}}{R_{т}} \cdot K_{м.п}. \quad (3.11)$$

Значения коэффициента  $K_{п}$  для бетона сборных конструкций принимаются по табл.3.8.

Т а б л и ц а 3 . 8

Значения коэффициента  $K_{п}$  для бетона сборных конструкций

Класс (марка) бетона	Продолжительность тепловой обработки, ч	Группа цемента по эффективности тепловой обработки (ГОСТ 22236–86)	$K_{п}$				
			Нормируемая отпускная прочность в % от класса (марки) бетона				
			50	60	70	80	
В15 (М200 и ниже)	8-10	1	1,00	1,00	1,15	1,35	
		2	1,00	1,00	1,30	1,45	
	13-15	1	1,00	1,00	1,10	1,25	
		2	1,00	1,00	1,15	1,35	
		3	1,00	1,00	1,25	1,45	
	18-20	1	1,00	1,00	1,05	1,20	
		2	1,00	1,00	1,15	1,20	
		3	1,00	1,00	1,25	1,40	
	В20, В25 (М250, М300)	8-10	1	1,00	1,00	1,10	1,25
2			1,00	1,00	1,20	1,40	
13-15		1	1,00	1,00	1,00	1,15	
		2	1,00	1,00	1,10	1,25	
		3	1,00	1,00	1,20	1,35	
18-20		1	1,00	1,00	1,00	1,15	
		2	1,00	1,00	1,10	1,20	
		3	1,00	1,00	1,15	1,30	
8-10		1	1,00	1,00	1,05	1,20	
		2	1,00	1,00	1,10	1,25	
В30, В35, В40 (М350, М400, М450, М500)		13-15	1	1,00	1,00	1,00	1,10
			2	1,00	1,00	1,10	1,15
	3		1,00	1,00	1,15	1,25	
	18-20	1	1,00	1,00	1,00	1,05	
		2	1,00	1,00	1,00	1,15	
		3	1,00	1,00	1,05	1,20	

При коэффициенте  $K_{\text{п}}$  более 1,00 следует выполнить технологические операции (например, удлинить цикл тепловой обработки, применить добавки, ускоряющие твердение бетона, или использовать более эффективные цементы и т.д.), направленные на повышение прочности бетона после тепловой обработки и сокращение расхода цемента.

Верхняя предупредительная граница средней прочности бетона  $R^{\text{в.п.г}}$  в контролируемой партии, превышение которой свидетельствует о повышении фактической прочности, рассчитывается по формуле

$$R^{\text{в.п.г.}} = R_y \left( 1 + 1,28 \frac{V_{\text{м.п}}}{100} \right), \quad (3.12)$$

где  $V_{\text{м.п}}$  – коэффициент межпартиционной вариации прочности, принимаемый равным  $0,5V_{\text{п}}$ .

Если значения прочности бетона в трех партиях подряд превышают верхнюю предупредительную границу, т.е. фактический средний уровень прочности, рассчитанный по формуле (3.8), или если значения коэффициента  $K_{\text{п}}$  определенного по формуле (3.9), выше значений, указанных в табл.3.8, то необходимо принимать меры по снижению прочности бетона и сокращению расхода цемента.

#### 5. Приемка бетона по прочности.

Приемка партий бетона сборных конструкций проводится по отпускной и передаточной прочности, а в монолитных конструкциях – по прочности бетона в проектном возрасте.

Партия бетона подлежит приемке, если фактическая прочность бетона в партии  $R_m$  будет не ниже требуемой прочности  $R_T$ , то есть

$$R_m \geq R_T. \quad (3.13)$$

### 3.3. Пример статистического контроля прочности бетона с учетом однородности

В качестве примера выполнения задания рассмотрим результаты статистического контроля прочности бетона железобетонных панелей перекрытий.

Исходные данные:

- марка бетона М200 (В 15);
- отпускная прочность бетона – 70 % от проектной. Исходные данные фактической прочности приведены в табл.3.9.

**3.3.1.** Определяются средняя фактическая прочность бетона  $R_m$ , среднее квадратичное отклонение  $S_m$  и коэффициент вариации прочности бетона  $V_m$  по результатам проведенных испытаний образцов бетона в каждой серии из  $N$  партий.

$$R_m = \frac{17,2 + 15,0 + 16,4}{3} = 16,2 \text{ МПа}.$$

Аналогично рассчитывается значение  $R_m$  для всех 30 партий. Результаты расчета заносятся в соответствующую строку табл. 3.9.

Вычисление  $V_m$  осуществляется следующим образом. Первоначально определяется размах прочности в каждой партии  $W_m$ , например:  $W_m = 17,2 - 15,0 = 2,2$  МПа. Значение коэффициента  $\alpha$  принимается по табл. 3.4. Среднее квадратичное отклонение рассчитывается по формуле (3.5):

$$S_m = \frac{2,2}{1,69} = 1,3 \text{ МПа}.$$

Т а б л и ц а 3 . 9

Статистические характеристики оценки прочности бетона

Номер партии	$R_1$ , МПа	$R_2$ , МПа	$R_3$ , МПа	$R_m$ , МПа	$V_m$ , %	$\alpha$	$S_m$ , МПа	$W_m$ , МПа
1	17,2	15,0	16,4	16,2	8,03	1,69	1,3	2,2
2	15,0	15,6	15,5	15,4	23,4	1,69	0,36	0,5
3	14,0	15,5	14,0	14,5	6,12	1,69	0,88	1,5
4	15,8	17,2	16,6	16,5	5,03	1,69	0,83	1,4
5	15,0	13,0	14,2	14,1	8,36	1,69	1,18	2,0
6	16,7	13,5	15,4	15,2	12,43	1,69	1,89	3,2
7	21,7	17,0	19,6	19,4	14,3	1,69	2,78	4,7
8	23,5	19,0	21,4	21,3	12,5	1,69	2,66	4,5
9	18,2	18,3	18,6	18,4	0,32	1,69	0,06	0,1
10	25,1	20,7	22,3	22,7	11,5	1,69	2,60	4,4
11	17,7	19,1	18,6	18,5	4,49	1,69	0,83	1,4
12	25,2	24,0	24,8	24,7	2,88	1,69	0,71	1,2
13	21,8	22,0	21,4	21,7	0,60	1,69	0,12	0,2
14	15,8	15,9	15,4	15,7	0,38	1,69	0,06	0,1
15	19,5	18,7	19,5	19,2	2,44	1,69	0,47	0,8
16	21,3	20,3	20,3	20,6	2,86	1,69	0,59	1,0
17	17,5	18,1	17,9	17,8	1,97	1,69	0,35	0,6
18	21,5	19,9	20,6	20,7	4,59	1,69	0,95	1,6
19	18,4	19,2	18,5	18,7	2,51	1,69	0,47	0,8
20	20,4	17,8	19,6	19,3	7,98	1,69	1,54	2,6
21	16,7	18,5	17,9	17,7	5,99	1,69	1,06	1,8
22	21,2	19,6	20,3	20,5	4,63	1,69	0,95	1,6
23	20,3	21,3	21,0	20,8	2,83	1,69	0,59	1,0
24	18,3	19,2	18,8	18,8	2,83	1,69	0,53	0,9
25	19,7	20,4	20,8	20,3	2,02	1,69	0,41	0,7
26	18,3	19,3	18,1	18,6	3,17	1,69	0,59	1,0
27	20,1	18,8	19,8	19,6	3,93	1,69	0,77	1,3
28	17,8	18,3	18,1	18,1	1,60	1,69	0,29	0,5
29	19,4	18,7	19,4	19,2	2,14	1,69	0,41	0,7
30	17,5	16,8	17,4	17,2	2,33	1,69	0,40	0,7

Коэффициент вариации в каждой партии  $V_m$  определяется по формуле (3.6):

$$V_m = \frac{1,3}{16,2} \cdot 100\% = 8,03\%.$$

Аналогично рассчитываются значения  $V_m$  для всех партий бетона и заносятся в табл. 3.9.

**3.3.2.** По результатам определения коэффициентов вариации в каждой партии по формуле (3.5) вычисляется средний партионный коэффициент вариации:

$$V_n = \frac{143,1}{30} = 5,01\%.$$

**3.3.3.** В зависимости от полученного значения среднего коэффициента вариации  $V_n = 5,01\%$  по формуле (3.6) определяется требуемая прочность бетона  $R_T$ :

$$R_m = 200 \cdot \frac{83}{100} = 16,6 \text{ МПа}.$$

**3.3.4.** Средний уровень прочности бетона и верхнюю предупредительную границу находят по формулам (3.8) и (3.10):

$$R_y = 16,6 \cdot 1,03 = 17,09 \text{ МПа},$$

$$R^{в.п.г} = 15,45 \left( 1 + 0,28 \cdot \frac{0,5 \cdot 5,01}{100} \right) = 16 \text{ МПа}.$$

Эти расчеты необходимы для подбора состава и контроля прочности бетона при последующем изготовлении конструкций.

Фактическая прочность бетона  $R_m$  в партиях 1 и 3 (см. табл.3.9) ниже требуемой  $R_T$ . Для значительного количества партий наблюдается превышение фактической отпускной прочности над ее верхней предупредительной границей, что требует уточнения состава бетона в последующий контролируемый период.

## 4. ПОВЫШЕНИЕ ДОЛГОВЕЧНОСТИ БЕТОННЫХ И ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ИЗДЕЛИЙ

Бетонные и железобетонные конструкции в процессе эксплуатации подвергаются различным механическим и физико-химическим воздействиям.

Механические воздействия, или нагрузки, а также возникающие в материале напряжения с достаточной точностью определяются расчетами по прочности материала.

К физико-механическим воздействиям относятся климатические воздействия, характеризующиеся изменениями температуры и влажности наружного воздуха, а также температурно-влажностный режим внутри зданий. Наиболее активными являются различные агрессивные воздействия окружающей среды, вызывающие изменение структуры и свойств бетона и приводящие к снижению его прочности и разрушению конструкций.

Разрушение бетона под воздействием внешней агрессивной среды называется коррозией. Способность материала сопротивляться разрушительному действию внешней агрессивной среды называется коррозионной стойкостью.

Стойкость бетона к различного рода воздействиям в значительной мере влияет на долговечность выполненных из него конструкций. Степень долговечности конструкций определяется календарным сроком их службы без потери эксплуатационных качеств в конкретных климатических условиях и режиме эксплуатации.

Для железобетонных конструкций нормами предусмотрены три степени долговечности: 1 – соответствует сроку службы не менее 100 лет; 2 и 3 – не менее 50 и 20 лет, соответственно.

Для того чтобы обеспечить заданную в проекте долговечность изделий, следует применять бетоны с необходимыми свойствами по плотности, водопоглощению, морозостойкости, водонепроницаемости, стойкости против коррозии, жаростойкости и т.п. Общие требования, регламентирующие воздействие окружающей среды, устанавливаются в соответствии с нормами при проектировании зданий и сооружений и указываются в рабочих чертежах изделий, ГОСТах. Защита конструкций из бетона и железобетона осуществляется в соответствии с рекомендациями СНиП 2.03.11–85.

Долговечность железобетонных конструкций в большой степени зависит также от способности бетона защищать стальную арматуру от коррозии. Обеспечить сохранность стальной арматуры в бетонах можно повышением плотности самих бетонов, уменьшением их проницаемости, а также нанесением на арматуру специальных покрытий (цементно-битумных, цементно-полистирольных, цементно-латексных и др.) и введением соответствующих ингибирующих добавок.

Для оценки стойкости бетона по отношению к внешним воздействиям существует многообразие методов, главные из которых основаны на измерении массы образцов, исследовании прочностных и упругих характеристик, определении скорости коррозии и визуальных наблюдениях. Кроме того, этим целям служат исследования фильтрационной способности материала, а также рентгенографический, петрографический и термический анализы.

Определение стойкости бетона к различного рода воздействиям состоит в моделировании последних в ускоренном режиме с тем, чтобы в минимальный срок оценить долговечность бетона. Ускорение процесса воздействия различных факторов на свойства бетона – чрезвычайно сложная задача, для решения которой используют физико-химические приемы, в частности увеличение реагирующей поверхности исследуемого материала и скорости обмена агрессивного раствора у поверхности материала. Это достигается фильтрацией агрессивного раствора через образец под давлением или под вакуумом, повышением концентрации агрессивного раствора, попеременным смачиванием материала в агрессивной среде и высушиванием его, испытанием образцов в напряженном состоянии и др.

При определении стойкости бетона руководствуются общими правилами: протекание исследуемых физико-химических или физических процессов должно происходить в условиях, аналогичных натурным, причем в минимальные сроки; исследование должно базироваться на объективных, прямых, количественных и воспроизводимых критериях, определяемых с достаточной точностью и надежностью; полученные результаты должны позволять моделировать процесс и прогнозировать выраженную в количественной оценке долговечность бетона.

Учитывая, что на долговечность бетонных и железобетонных конструкций наибольшее влияние оказывают агрессивные среды, вызывающие физико-химическую коррозию, рассмотрим вопросы, связанные с изучением относительной стойкости бетонов при солевой, физической и химической коррозиях, а также поведения стальной арматуры в условиях агрессивного воздействия.

#### **4.1. Агрессивные среды, снижающие долговечность бетонных и железобетонных изделий**

Железобетонные изделия могут эксплуатироваться в различных средах. В одних случаях это атмосфера, вода, щелочи, кислоты, соли и их растворы, порошкообразные и зернистые материалы, минеральные и органические вещества в твердом и жидком состояниях. В других – различные комбинации указанных сред, а также их сочетание с электрическим током,

световыми и радиоактивными излучениями. При этом в каждом отдельном случае среда может содержать один или несколько агентов.

Агрессивные среды согласно СНиП 2.03.11–85 «Защита строительных конструкций от коррозии» по степени воздействия на строительные конструкции делятся на неагрессивные (Н), слабоагрессивные (Сл), среднеагрессивные (Ср) и сильноагрессивные (Си). В основу классификации положены относительное снижение прочности материала в зоне коррозии и внешние проявления признаков коррозии в результате эксплуатации изделий в течение одного года (табл.4.1).

Т а б л и ц а 4 . 1

Степень воздействия агрессивной среды на строительные конструкции

Показатели коррозии	Степень агрессивности среды			
	Н	Слабая	Средняя	Сильная
Снижение прочности, %	нет	менее 5	5-20	более 20
Внешние признаки	нет	слабое поверхностное разрушение(шелушение)	повреждение углов, появление волосяных трещин	Ярко выраженное разрушение материала (растрескивание)

Все среды по агрессивному состоянию подразделяются на три группы: газообразные, жидкие, твердые.

**Газообразные среды.** Степень агрессивности газовоздушных сред определяется растворимостью газов в воде, температурой и влажностью среды (СНиП 2.03.11–85).

Наиболее распространенной рабочей средой, в которой хранится и эксплуатируется большинство изделий из цементного камня и бетона, является воздух. Сухой чистый воздух не вызывает заметных изменений свойств бетона, но при изменении температурно-влажностных условий он может представлять опасность. По величине относительной влажности все разновидности газовоздушных сред в соответствии со СНиП II-3–79 делятся на три зоны: сухую – с относительной влажностью менее 60 %, нормальную – от 61 до 75 % и влажную – более 75 %. Главная опасность повышенного содержания влаги в воздухе заключается в том, что она обуславливает коррозионную активность других примесей.

Наиболее распространены следующие агрессивные газообразные примеси в воздухе: углекислый газ, аммиак, сернистый ангидрид, сероводород, оксиды азота, хлор, хлористый водород, фтористый водород. В зависимости от вида и концентрации газов газовоздушные среды условно делятся на четыре группы: А, Б, С и Д.

*Газовая коррозия* представляет собой коррозию в газовой среде при полном отсутствии конденсации влаги на поверхности материала. Этому виду коррозии подвержены бетоны, работающие в условиях высоких температур в среде осушенного газа (жаростойкие бетоны). Газовая коррозия относится к химическим процессам разрушения. Скорость ее зависит от состава бетона, его структуры и свойств компонентов.

Коррозия материалов в газообразных средах не отличается от коррозии в жидкостях, так как химические реакции коррозии протекают чаще всего в пленках влаги. Газ должен раствориться прежде, чем сможет вступить в реакцию с материалом.

Указанные агрессивные газы являются кислыми и при растворении в воде образуют растворы кислот.

**Жидкие среды.** Для жидких сред степень агрессивного воздействия определяется наличием и концентрацией агрессивных веществ, температурой, напором (или скоростью) движения жидкости у поверхности конструкции и зависит от плотности бетона.

По показателю плотности бетоны условно делятся на три вида, характеризующиеся водосодержанием бетонной смеси при затворении, маркой бетона по водонепроницаемости и водопоглощением бетона по массе (табл.4.2).

Т а б л и ц а 4 . 2

Характеристика бетона в зависимости от плотности

Вид бетона	Характеристика бетона		
	марка по водонепроницаемости	водопоглощение по массе, %	максимально-допустимое В/Ц
Нормальной плотности (Н)	4	4,7-5,7	0,6
Повышенной плотности (П)	6	4,2-4,7	0,55
Особо плотный (О)	8	до 4,2	0,45

При эксплуатации строительных конструкций на них воздействуют различные жидкие среды: природные и промышленные сточные воды; водные растворы минеральных и органических кислот, щелочей и солей; органические растворители, нефтепродукты.

Чистая, без примесей вода активно взаимодействует с бетоном как растворитель, вызывая коррозию первого вида (выщелачивание).

*Коррозия первого вида* происходит в результате растворения составляющих цементного камня водами с малой временной жидкостью. Эта вода горных рек, дождевая, болотная, конденсат. Уменьшает агрессивность воды содержание в ней  $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$  и  $\text{Mg}(\text{HCO}_3)_2$ . И только вода с бикарбонатной щелочью менее 1,4-0,7 мг·экв/л является агрессивной. Разрушение цементного камня начинается вымыванием  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , раство-

римость которой составляет 1,2 г/л в расчете на CaO, а затем идет разрушение клинкерных минералов. Выщелачивание 15-30 % CaO из цементного камня приводит к уменьшению прочности на 40-50 %.

*Жидкостная коррозия* бетона, происходящая под действием растворов электролитов и неэлектролитов, а также различных расплавов, носит в основном химический характер, хотя в зависимости от вида и свойства жидкости отличается рядом особенностей. Важнейшей особенностью жидкостей является наличие в них сил межмолекулярного взаимодействия. Этим обусловлены два свойства жидкого состояния: молекулярное давление и связанное с ним поверхностное натяжение. Поверхностное натяжение жидкости оказывает большое влияние на интенсивность разрушения материала, которое определяется также смачивающими свойствами жидкости. Как правило, любая вода содержит примеси – соли, газы, органические вещества.

Степень агрессивного воздействия жидких сред зависит от концентрации в них водородных ионов pH, содержания свободной углекислоты, магниезальных солей, едких щелочей, сульфатов.

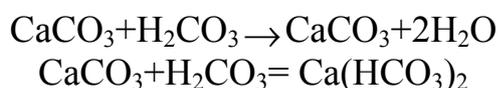
Бетон на портландцементе нестойк к воздействию растворов кислот (кислотная коррозия). Скорость возрастает с понижением значения pH (с повышением концентрации растворов), скорости потока агрессивной среды, с уменьшением площади её контакта с бетоном, пористости и проницаемости камня и бетона. Наиболее агрессивными по отношению к цементному камню являются минеральные кислоты – соляная, серная и азотная. При воздействии однопроцентных растворов кислот бетон разрушается в течение нескольких месяцев (коррозия II вида).

*Коррозия второго вида* происходит в результате взаимодействия составляющих цементного камня с кислотами и некоторыми солями. При обменных реакциях образуются не имеющие прочности легкорастворимые соединения. К этому виду коррозии относят углекислотную и магниезальную коррозию.

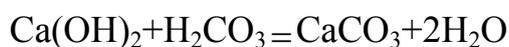
Менее агрессивна фосфорная кислота. Цементный камень быстро разрушается под воздействием 5 %-го раствора фосфорной кислоты.

Интенсивность разрушения бетона угольной кислотой несколько ниже (углекислотная коррозия) и зависит от концентрации углекислоты и жесткости воды.

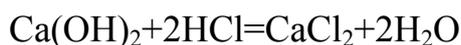
*Углекислотная коррозия.* Углекислый газ CO<sub>2</sub>, находящийся в воздухе, растворяется в воде, образуя угольную кислоту H<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>. При наличии в воде достаточного количества карбоната кальция CaCO<sub>3</sub>, чтобы нейтрализовать угольную кислоту, H<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> и CaCO<sub>3</sub> должны находиться в равновесном состоянии:



Эта угольная кислота не является агрессивной по отношению к цементному камню. Если количество углекислоты больше, чем равновесное, она становится агрессивной и способна разрушить цементный камень по реакциям

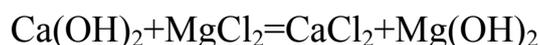


Гидрокарбонат кальция легко растворяется и вымывается водой



Органические кислоты весьма агрессивны к бетону. Агрессивность кислот возрастает с увеличением молекулярной массы. Винная, щавелевая, уксусная, яблочная, масляная и молочная кислоты относятся к кислотам с низкой молекулярной массой, а олеиновая, пальмитиновая и стеариновая – с высокой. Из природных вод в наибольшей степени агрессивность кислотного характера присуща болотным водам. Объясняется это тем, что в таких водах органические продукты окисляются, что способствует накоплению гумусовых кислот. Соли магния, присутствующие в морской воде и часто в грунтовых и производственных водах, вызывают магниезильную коррозию цементного камня.

*Магнезиальная коррозия.* Чисто магниезильная коррозия происходит при действии магниезильных солей, кроме  $\text{MgSO}_4$ . Например, в морской воде содержится хлорид магния  $\text{MgCl}_2$ , который взаимодействует с цементным камнем по реакции



Образуются растворимый хлорид кальция и бесвязный гидроксид магния. Коррозия становится заметной при содержании в воде  $\text{MgCl}_2$  более 1,5-2 %.

Магний находится в воде, как правило, в связанном виде (в сульфатах и хлоридах). Процесс коррозии почти неощутим, если содержание свободных ионов не превышает 200-300 мг/л. Такую среду можно считать неагрессивной.

Скорость протекания коррозии бетона под воздействием щелочей зависит от вида щелочи, концентрации раствора, температуры среды, продолжительности агрессивного воздействия, пористости бетона.

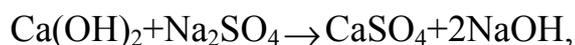
При концентрации растворов щелочей до 5 % значительных разрушений цементного камня не наблюдается.

Бетоны на портландцементе показывают большую стойкость в растворах щелочей, чем бетоны на пуццолановых и шлакопортландцементе.

В природных и некоторых промышленных водах содержатся сульфаты, вызывающие коррозию цементного камня III вида; коррозия бетона,

вызванная действием сульфатов, зависит как от минералогического состава использованного цемента, так и от плотности и структуры бетона. Однако вода – среда, содержащая более 5000 мг/л сульфатов, – агрессивна даже по отношению к особо плотному бетону, приготовленному на сульфатостойком портландцементе.

Коррозия третьего вида возникает при действии на цементный камень веществ, способных образовывать кристаллические соединения увеличенного объема. Они оказывают давление на стенки пор и разрушают цементный камень. Коррозия происходит при действии вод, содержащих сульфат кальция  $\text{CaSO}_4$ , сульфат натрия  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  и др.;  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  вначале реагирует с  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  по схеме

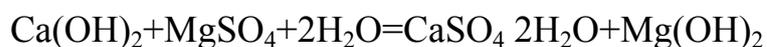


а затем  $\text{CaSO}_4$  – с минералом  $\text{C}_3\text{A}$ . Сульфат кальция  $\text{CaSO}_4$  сразу реагирует с минералом  $\text{C}_3\text{A}$ .



В результате взаимодействия образуется кристаллический трехсульфатный гидроалюминат (эттрингит), объем которого в 2,8 раза больше, чем объем исходных веществ.

К коррозии третьего вида относится сульфатно-магнезиальная коррозия, которая возникает при действии на цементный камень сульфата магния  $\text{MgSO}_4$ . Реакция идет по схеме



Образуются рыхлая масса  $\text{Mg}(\text{OH})_2$  и кристаллы  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ , которые растворяются в воде. Влияние на цемент начинается при концентрации  $\text{MgSO}_4$  более 0,5-0,75 %. Происходит совмещение двух видов коррозии – магнезиальной и сульфатной.

Кроме водных растворов солей, кислот и щелочей, жидкими агрессивными средами являются также масла, нефтепродукты и растворители. Степень агрессивного воздействия на бетон масел зависит от их происхождения. Растительные и животные масла представляют бóльшую опасность для бетона, чем минеральные. При окислении растительных и животных масел степень их агрессивности к бетону повышается.

Большинство нефтепродуктов отличается малой агрессивностью за исключением сырой нефти, которая, будучи многокомпонентным веществом, имеет в своем составе агрессивные составляющие. Некоторые вещества можно считать неагрессивными к бетону, например бензин.

Растворители также практически не агрессивны к бетону, в том числе наиболее распространенные – ацетон и бензол.

**Твердые среды.** Степень агрессивного воздействия твердых сред (соли, аэрозоли, пыль, грунты) определяется их дисперсностью, раствори-

мостью в воде, гигроскопичностью, влажностью окружающей среды в соответствии со СНиП 2.03.11–85 (табл.4.3).

Т а б л и ц а 4 . 3

Показатели агрессивного воздействия твердых сред по отношению к бетону и железобетону

Влажностный режим помещений Зона влажности	Растворимость твердых сред в воде и их и гигроскопичность	Степень агрессивного воздействия твердых сред на конструкцию	
		бетон	железобетон
<u>Сухой</u> Сухая	Хорошо растворимые малогигроскопичные	Неагрессивная	Слабоагрессивная
	Хорошо растворимые гигроскопичные	Слабоагрессивная	Среднеагрессивная
<u>Нормальный</u> Нормальная	Хорошо растворимые малогигроскопичные	Слабоагрессивная	Слабоагрессивная
	Хорошо растворимые гигроскопичные	Слабоагрессивная	Среднеагрессивная
Влажный или <u>мокрый</u> Влажная	Хорошо растворимые малогигроскопичные	Слабоагрессивная	Среднеагрессивная
	Хорошо растворимые гигроскопичные	Среднеагрессивная	Сильноагрессивная

Перечень наиболее распространенных растворимых солей и их характеристики приведены в справочном приложении 2, СНиП 2.03.11–85. В качестве агрессивных солей по отношению к бетону и железобетону следует рассматривать хлориды, сульфаты и нитраты.

По растворимости твердые среды делятся на малорастворимые (менее 2 г/л) и хорошо растворимые (более 2 г/л); по гигроскопичности – на малогигроскопичные, поглощающие влагу при относительной влажности окружающей среды 60 % и более, и гигроскопичные – то же, но менее 60 %.

Воздействие сухих грунтов на бетон незначительно, и их можно считать неагрессивными. Жидкая фаза способствует развитию коррозии.

*Избирательная коррозия* характерна для бетонов, в которых один из компонентов при формировании структуры образует легко растворимые соединения. В период эксплуатации эти соединения могут переходить в раствор, образуя на поверхности материала так называемые «высолы».

## 4.2. Методы оценки степени агрессивности сред

*Водородный показатель.* Наиболее интенсивно происходит коррозия при наличии жидких сред. Степень агрессивного воздействия жидких сред зависит от концентрации водородных ионов рН.

Концентрация ионов водорода характеризует химическую активность жидких агрессивных сред. В кислой среде концентрация ионов водорода большая, а в щелочной – малая. Поскольку концентрация ионов водорода в растворах слабых кислот очень мала (диссоциация кислоты происходит с образованием ионов водорода  $H^+$ ) и такими величинами оперировать неудобно, было введено понятие водородного показателя рН – отрицательного десятичного логарифма концентрации водородных ионов:

$$pH = -\lg[H^+]. \quad (4.1)$$

При диссоциации воды выделяются ионы водорода  $H^+$  и гидроксила  $OH^-$ :



В одном литре воды при  $20^\circ C$  содержится  $10^7$  грамм-ионов водорода и столько же ионов гидроксила. Поэтому для чистой воды

$$pH = -\lg[H^+] = -\lg \cdot 10^{-7} = 7 \quad (4.3)$$

Это значение рН соответствует нейтральной среде, причем произведение  $[H^+][OH^-]$  остается постоянным при определенной температуре не только для воды, но и для любого раствора. Поэтому для любого раствора

$$H^+ = \frac{10^{-14}}{[OH^-]} \quad \text{и} \quad [OH^-] = \frac{10^{-14}}{[H^+]}, \quad (4.4)$$

т.е. показатель рН изменяется от 1 до 14. Для кислых растворов рН меньше 7, а для щелочных – больше 7.

В зависимости от значения рН все жидкие среды делятся на пять групп:

- кислые – рН = 1-3;
- слабокислые – рН = 4-6;
- нейтральные – рН = 7;
- слабощелочные – рН = 8-10;
- щелочные – рН = 11-14.

*Индикаторы* – это вещества, окраска которых зависит от концентрации водородных ионов в растворе.

Сведения об изменении окраски индикаторов представлены в табл.4.4.

## Изменение окраски индикаторов

Индикатор	Интервал значений рН	Окраска в среде	
		кислой	щелочной
Метиловый оранжев	3,1-4,4	Красная	Оранжево-желтая
Конго-красный	3,0-5,2	Сине-фиолетовая	Красная
Метиловый красный	4,2-6,3	Красная	Желтая
Лакмус	5,0-8,0	Красная	Синяя
Фенолфталеин	8,2-10,0	Бесцветная	Красная

Краситель лакмус (азолитмин) имеет в кислом растворе красный цвет, в основном – синий.

В простейших испытаниях применяется бумага, пропитанная этим веществом, – лакмусовая бумага.

Для определения кислот и оснований лакмус используется редко. Для этой цели обычно применяют индикатор фенолфталеин и метилоранж, или метиловый красный. Фенолфталеин в кислой среде бесцветен, в основном же имеет красный цвет.

Метилоранж в кислой среде обладает красным (малиновым) цветом.

*Жесткость воды* определяется в основном наличием растворенных в ней солей кальция и магния и обозначается градусами. Один градус жесткости соответствует содержанию 0,01 г окиси кальция или 0,00718 г окиси магния в одном литре воды.

Различают жесткость карбонатную, некарбонатную и общую. Карбонатная жесткость (наличие бикарбонатов и карбонатов кальция и магния) снижается при кипячении воды, поэтому её иногда называют временной.

Некарбонатная жесткость, обусловленная присутствием в воде солей кальция и магния сильных кислот, сохраняется при кипячении (так называемая постоянная жесткость).

Общая жесткость характеризуется общим содержанием в воде солей кальция и магния (состоит из карбонатной и некарбонатной).

При определении агрессивности  $\text{CO}_2$  к бетонам следует учитывать временную жесткость воды. Различают воду мягкую – временная жесткость менее  $6^\circ$  (менее 1,1 ммоль/л); средней жесткости –  $6-15^\circ$  (1,1-2,7 ммоль/л); жесткую –  $15-24^\circ$  (2,7-4,3 ммоль/л); весьма жесткую –  $24^\circ$  (свыше 4,3 ммоль/л).

### 4.3. Методы оценки коррозионной стойкости бетона

**Качественные методы оценки коррозионной стойкости материалов** не могут характеризовать полностью процесс старения: они позволяют лишь прогнозировать характер или интенсивность старения материалов. К ним относятся следующие методы:

а) Оценка изменения внешнего вида образца бетона или изделия после воздействия на него эксплуатационного фактора. Осмотр образца дает возможность во многих случаях установить характер коррозии – равномерный или неравномерный; места расположения продуктов, образующихся при коррозии на поверхности материала; наличие и ширину раскрытия трещин и их направление; степень сцепления продуктов коррозии; изменение цвета и др.

б) Микроскопические исследования внешнего вида образцов после воздействия агрессивной среды осуществляются с помощью луп или микроскопов и позволяют установить наличие и характер очагов коррозии и их строение.

Эти исследования дают возможность подвергать материал качественному контролю не только после, но и в процессе разрушения.

Производя микроскопические исследования, можно получить данные о начале и характере развития процессов коррозии.

в) Метод микрофотосъемок. Применяя этот метод, можно исследовать кинетику процесса коррозии, возникновение и развитие трещин.

г) Индикаторный метод позволяет также изучить кинетику процессов коррозии. Он основывается на способности некоторых реактивов образовывать с продуктами коррозии окрашенные составы, позволяющие наблюдать глубину проникновения их в корродируемый материал. Используется при исследовании коррозии цементного камня и бетона, металлов, полимерных и других материалов.

Качественные методы помогают делать лишь предварительные выводы о пригодности или непригодности данного материала в определенных условиях, однако эти выводы рекомендуется проверять количественными методами.

**Количественные методы оценки коррозионной стойкости материалов** делятся на две группы. Одна группа связана с определением изменений в процессе коррозии: массы материала, глубины коррозии; массы продуктов коррозии; доли поверхности, занятой коррозией; времени до появления первой трещины или до полного разрушения; количества язв на единицу площади поверхности; электрического сопротивления материала.

Другая группа связана с определением изменения свойств, характеризующих состояние материалов: прочности, деформации, ползучести, герметичности и т.п.

а) Определение изменения массы. Этот метод основан на определении изменения массы бетонного образца после воздействия на него эксплуатационных факторов. Показателем коррозии материала является величина  $K_t^F$ , представляющая собой отношение разницы масс образца до и после коррозионного воздействия на него в течение времени  $t$  к общей поверхности  $F$

$$K_t^F = \frac{P_0 - P_t}{F \cdot t}, \quad (4.5)$$

где  $K_t^F$  – средняя скорость старения материала в течение времени  $t$ , г/(м<sup>2</sup>·ч);  
 $P_0$  и  $P_t$  – масса образца соответственно до и после воздействия на него эксплуатационного фактора, г;  
или к его объему  $V$

$$K_t^V = \frac{P_0 - P_t}{V \cdot t}, \quad (4.6)$$

где  $K_t^V$  – средняя скорость старения материала в течение времени  $t$ , г/(м<sup>3</sup>·ч). По этому показателю стойкость бетона подразделяется на следующие группы (табл.4.5).

Т а б л и ц а 4.5

Классификация стойкости материалов  
в зависимости от изменения их массы

Группа стойкости	Потеря массы, г/м <sup>2</sup>	Балл
Весьма стойкий	0,10	1
Стойкий	0,10-1,0	2
Сравнительно стойкий	1,0-3,0	3
Малостойкий	3,0-10,0	4
Нестойкий	10,0	5

б) Определение глубины коррозии, или оценка скорости коррозии, материалов по изменению массы не учитывает плотность материалов. По этой причине данные об изменении массы переводят на так называемый глубинный показатель старения, который характеризует уменьшение толщины сохраняющего свои первоначальные свойства материала.

Для природных и искусственных каменных материалов изменение массы и глубины прореагировавшего с агрессивной средой слоя в зависимости от времени  $t$  определяется по формуле

$$L = K \cdot t^n, \quad (4.7)$$

где  $K$  и  $n$  – константы материала, зависящие от его структуры и свойств, температуры и вида агрессивной среды (для большинства природных, каменных и искусственных материалов  $n = 0,5$ ).

в) Определение массы продуктов коррозии, или определение скорости и общего количества выделения продуктов коррозии в рабочую среду, является одним из основных методов расчета долговечности некоторых материалов, с его помощью характеризуется коррозионная стойкость цементного камня и бетона в зависимости от выделения продуктов коррозии с содержанием СаО. Установлено, что снижение прочности этих материалов прямо пропорционально содержанию СаО в гидроксиде и гидратированных материалах цементного камня.

г) Определение потери прочности бетона (степени коррозионного разрушения) после воздействия на него эксплуатационных агрессивных факторов характеризуется показателем  $K_t$ , %:

$$K_t = \frac{R_0 - R_t}{R_0} \cdot 100, \quad (4.8)$$

где  $R_0$  и  $R_t$  – прочность бетонных образцов соответственно до и после воздействия на них эксплуатационных факторов в течение времени, МПа.

#### 4.4. Исследование коррозионной стойкости бетона и стальной арматуры в различных агрессивных средах

##### 4.4.1. Влияние вида агрессивной среды на коррозию бетона

Свойства агрессивных сред и условия их воздействия на конструкции из бетона и железобетона весьма разнообразны. Не менее разнообразны и свойства бетона и железобетона. По сумме ведущих признаков можно выделить три основных вида процессов коррозии бетона:

- коррозия I вида обусловлена воздействием на бетон жидких сред, способных растворять цементный камень и выносить его из структуры бетона;

- коррозия II вида происходит в результате химических взаимодействий – обменных реакций между цементным камнем и раствором. Образующиеся продукты реакции либо легкорастворимы и выносятся из структуры, либо образуют отложения в виде аморфной массы, не обладающей вяжущими свойствами. Этот вид коррозии возникает при действии на бетон растворов кислот и некоторых солей;

- коррозия III вида вызывает накопление и кристаллизацию малорастворимых продуктов реакции с увеличением объема твердой фазы, к этому виду относится коррозия при действии сульфатов.

Исследования процессов коррозии бетона в кислой, щелочной и сульфатной средах осуществляются в течение четырех месяцев и включают следующие этапы:

- изготовление бетонных образцов;
- подготовка образцов к испытаниям;
- подготовка агрессивных сред;
- обследование образцов, продуктов коррозии и изменения агрессивных сред;
- испытание бетона на щелоче-, кислото- и сульфатостойкость;
- определение кинетики процесса коррозии;
- обработка результатов, заключение.

1. Изготавливается 16 бетонных образцов размером 10×10×10 см, определяются состав бетонной смеси, время уплотнения на виброплощадке и режим тепловлажностной обработки.

2. После тепловлажностной обработки образцы готовят к испытаниям в агрессивных средах. Для этого проводят осмотр и описание внешнего состояния всех образцов. Фиксируют наличие трещин, раковин, искривлений. Отмечают искажение линейных размеров, цвет, состояние поверхности каждого образца. Определяют геометрические размеры (длина  $l$ , ширина  $b$ , высота  $h$ ), массу  $G$  исходных образцов. Геометрические размеры вычисляют как среднее трех измерений с точностью до 0,5 мм. Массу каждого образца определяют взвешиванием на технических весах с точностью до 0,1 г. Результаты осмотра заносят в табл.4.6.

Т а б л и ц а 4 . 6

Номер образца	Дата обследования	Результаты внешнего осмотра	Геометрические размеры, мм			Масса образца, г	Примечание
			длина	ширина	высота		

3. Для испытаний готовят три раствора по 7 литров каждый:

- кислый (10 %-й раствор HCl);
- щелочной (10 %-й раствор KOH);
- сульфатный (5 %-й раствор Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>).

Вид и концентрация агрессивных сред выбраны для создания наиболее агрессивных условий и ускоренного моделирования процессов коррозии. Растворы в течение всего эксперимента не меняют.

4. Замаркированные образцы помещают в агрессивную среду, контрольные – в воду. При этом исследуются процессы коррозии бетона в щелочной, в кислой, в сульфатной средах.

5. В последующие каждые две недели проводят качественную и количественную оценку стойкости образцов и изменений в агрессивных средах.

Результаты обследований записывают в табл. 4.7 и 4.8. Для прогнозирования процессов коррозии заполняют табл. 4.7, где указывает химические формулы всех компонентов цементного камня, крупный и мелкий заполнитель, а также продукты взаимодействия с агрессивной средой. В ходе исследований отмечают характерные признаки, свойственные продуктам коррозии.

Т а б л и ц а 4 . 7

Изменения, происходящие в рабочей среде

Дата обследования	Исходный раствор					
	10 %-й р-р HCl		10 %-й р-р NaOH		5 %-й р-р Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	
	Состояние агрессивной среды					
	рН	Изменения	рН	Изменения	рН	Изменения

Таблица 4.8

Прогнозирование процесса коррозии бетона

Составляющие бетона	Агрессивная среда	Возможные продукты коррозии	Характерные признаки
Составляющие цементного камня			
Крупный заполнитель			
Мелкий заполнитель			

При образовании налета на образцах проводят качественные реакции следующими реагентами: на хлориды – AgNO<sub>3</sub>, на сульфаты – BaCl<sub>2</sub>, на карбонаты – HCl.

С периодичностью в один месяц проводятся испытания одного образца (определяется изменение массы и прочности образцов). Результаты заносятся в табл. 4.9.

Т а б л и ц а 4 . 9

Оценка степени агрессивности среды

Рабочая среда	Дата обсле- дова- ния	Глубина разру- шения бетона, мм	Внешние признаки разру- шения	Изменения массы образцов, г/(м <sup>3</sup> ·ч)	Изменения прочности образцов, %	Стой- кость бетона
Кислотная						
Щелочная						
Сульфатная						

На основании полученных данных определяют коэффициент стойкости по формуле

$$K = R_1/R_2, \quad (4.9)$$

где  $R_1$  и  $R_2$  – прочность бетона при хранении в воде и в агрессивной среде, соответственно.

6. На основании полученных данных строят графики изменения рН сред, прочности и массы образцов в зависимости от времени нахождения их в агрессивных средах. По внешним признакам коррозии и потере прочности дают оценку степени воздействия среды и определяют стойкость бетона в ней. Кроме того, в случае необходимости обосновывают надежные и экономичные мероприятия по защите конструкций, обеспечивающие нормальный срок службы их с учетом долговечности по СНиП 2.03.11–85.

#### 4.4.2. Определение относительной стойкости бетона на различных вяжущих под воздействием агрессивных сред

Для исследования относительной стойкости бетона на различных вяжущих под воздействием агрессивных сред используется три вида жидких агрессивных сред, характеризующих процессы коррозии II и III вида:

1. Агрессивная среда (соляная или серная кислота), характеризующая процессы коррозии II вида, с водородным показателем рН 4.

2. Агрессивная среда, характеризующая процессы коррозии II вида. Содержание магниевых солей в пересчете на ион  $Mg^{2+} > 3000$  мг/л.

3. Агрессивная среда, характеризующая процессы солевой физической коррозии (процессы коррозии III вида). Содержание сульфатов в пересчете на ион  $SO_4^{2-} > 5000$  мг/л.

В качестве вяжущего используются обычный портландцемент, пуццолановый портландцемент, сульфатостойкий портландцемент. Относительная стойкость бетона определяется по снижению прочности бетона, уменьшению массы образцов, изменению их размеров, а также путем визуальных наблюдений при хранении образцов в агрессивных средах и в воде (взятой в качестве эталона) в течение четырех месяцев.

После тепловой обработки промаркированные образцы помещают в заранее приготовленную среду и в воду.

Прошедшие испытания образцы осматривают, взвешивают и испытывают в соответствии с методикой, изложенной в подразд. 4.3. Результаты заносят в табл. 4.10.

На основании анализа результатов исследований делают вывод об относительной стойкости бетона на различных вяжущих в исследуемых агрессивных средах, указывают причины его разрушения в этих средах. Кроме того, в случае необходимости обосновывают надежные и экономичные мероприятия по защите конструкций, обеспечивающие нормальный срок службы их с учетом долговечности по СНиП 2.03.11–85.



#### 4.4.3. Исследование поведения стальной арматуры в бетонах

Защитное действие бетона по отношению к стальной арматуре определяется способностью цементного камня пассивировать сталь.

Для сохранения пассивности стали в бетоне необходим ее постоянный контакт с поровой жидкостью, щелочность которой должна иметь величину водородного показателя  $pH \geq 11,8$ . Это условие обычно соблюдается в плотных бетонах на портландцементе (в затвердевшем бетоне  $pH$  поровой жидкости составляет 12-12,5). Однако бетон находится в постоянном взаимодействии со средой, которая может либо способствовать его упрочнению и уплотнению, либо разрушать его структуру, понижать прочность и уменьшать его способность защищать арматуру. Последнее может быть вызвано несколькими процессами, результатом которых является потеря бетоном способности поддерживать пассивное состояние стали вследствие понижения  $pH$  поровой жидкости или проникания в нее стимуляторов коррозии. Первое обычно является результатом действия на бетон агрессивных газов и жидкостей (например, углекислого или сернистого газов), второе – сред, содержащих хлориды и т.п.

Не обеспечивается пассивное состояние арматуры и в бетонах, изготовленных на цементах, содержащих активные минеральные добавки, или на заполнителях, обладающих гидравлической активностью, и на некоторых видах вяжущих (гипсовых, известково-кремнеземистых и др.). Особенно резко падает значение  $pH$  среды в бетонах автоклавного твердения. Значительное влияние на коррозию стальной арматуры оказывает воздушно-влажная среда. Чтобы предотвратить коррозию арматуры, необходимо обеспечить плотный защитный слой бетона при его щелочности не ниже  $pH$  11,8. Сохранность арматуры в бетонах, имеющих пониженное  $pH$  поровой жидкости, обеспечивается нанесением на арматуру специальных покрытий (цементно-битумных, цементно-полистирольных и др.) или специальных защитных покрытий по бетону согласно СНиП 2.03.11–85.

Для исследования поведения стальной арматуры в бетонах и влияния на это поведение различных факторов изучают поведение арматуры в образцах путем определения потери массы металла на  $1 \text{ м}^2$  площади и замера глубины коррозионных язв. При этом изучается поведение арматуры в бетонах в зависимости от вида вяжущего, плотности бетона и толщины защитного слоя у арматуры.

1. Для исследований готовятся образцы-балочки размером  $40 \times 40 \times 160$  мм из раствора состава 1:3 по массе (вяжущее:песок). Водоцементное отношение 0,4 и 0,7. Во время изготовления в образцы помещают по центру заранее подготовленные и взвешенные арматурные стержни диаметром 5 мм.

При изготовлении образцов в воду затворения вводится замедлитель схватывания. Каждая серия состоит из 6 опытных образцов.

Исследуется поведение арматуры в растворе, изготовленном на портландцементе марки ПЦ400, в растворе на шлакопортландцементе марки ШПЦ-400, в растворе на гипсовом вяжущем, в растворе на обычном портландцементе с толщиной защитного слоя у арматуры 10, 15 и 20 мм.

2. После пропаривания образцы испытывают в режиме периодического увлажнения (1 сутки в воде) и высушивания (3 суток при температуре  $(25 \pm 5)^\circ\text{C}$ ). Характеристики исследуемых образцов, прошедших 50 циклов испытаний, заносят в табл.4.11.

Т а б л и ц а 4 . 1 1

Характеристика исследуемых образцов

№ п/п	Номер серии	Исследуемые факторы			Фактическая средняя плотность бетона, кг/м <sup>3</sup>
		вид вяжущего	В/Ц	толщина защитного слоя, мм	
1	1	Портландцемент ПЦ400	0,4		
	2	То же	0,7		
2	1	Шлакопортландцемент ШПЦ-400	0,4		
	2	То же	0,7		
3	1	Гипсовое вяжущее	0,4		
	2	То же	0,7		
4	1	Портландцемент ПЦ400	0,7	10	
	2	То же	0,7	15	
	3	То же	0,7	20	

3. Прошедшие испытания образцы разрушают, арматуру очищают от остатков бетона и продуктов коррозии с помощью ингибированной кислоты (например 10 % HCl + 0,1 % ПБ-5), промывают, высушивают фильтровальной бумагой и после полуторачасового пребывания в эксикаторе под безводным хлоридом кальция или над концентрированной серной кислотой взвешивают на аналитических весах. Затем рассчитывают потерю массы на поверхности по формуле

$$K_m = (m_0 - m)/S, \quad (4.10)$$

где  $m_0$  и  $m$  – масса арматурного стержня соответственно до помещения его в бетон и после извлечения его из бетона, г;

$S$  – площадь поверхности стержня, м<sup>2</sup>.

Все данные испытаний заносят в табл.4.12.

Таблица 4.12

Результаты весовых испытаний стальной арматуры

№ п/п	Номер серии/Номер образца	В/Ц	Масса арматурного стержня		Потеря массы, г/м <sup>2</sup>
			$m_0$	$m$	
1	1/1	0,4			
	1/2				
	1/3				
2	2/1	0,7			
	2/2				
	2/3				

По данным табл.4.12 строят кинетическую кривую «коррозия – время» (рис. 4.1).

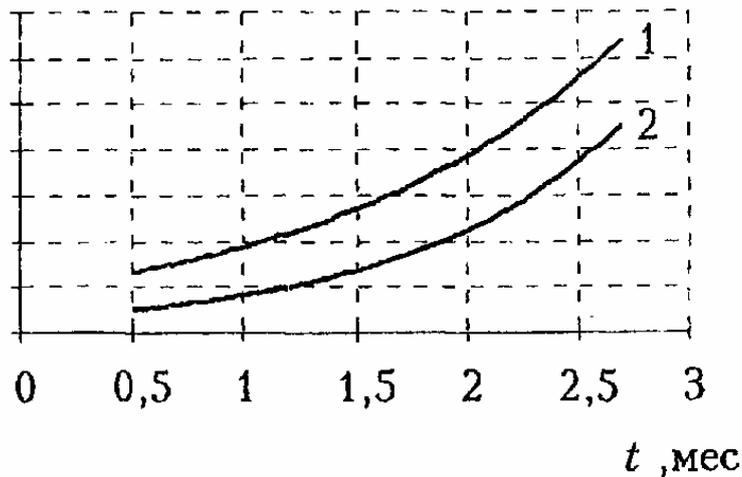
$$\Delta m^2 / m^2$$


Рис.4.1. Коррозия арматуры в бетоне:  
1 – при В/Ц = 0,7; 2 – при В/Ц = 0,4

4. Далее с помощью индикатора часового типа с иглой по всей поверхности арматуры замеряют глубину коррозионных язв и по этим данным строят кривую их распределения по глубине. Затем рассчитывают среднюю статистическую глубину коррозии  $x_{cp}$  и дисперсию значений глубины коррозии  $S^2(x)$  относительно средней статистической глубины коррозионных поражений по формулам:

$$x_{cp} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^s x_i \cdot m_i, \quad (4.11)$$

$$S^2(x) = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^S (\bar{x}_i - \bar{x}_{cp})^2 m_i, \quad (4.12)$$

где  $n$  – общее число измерений по всей площади металла;

$\bar{x}_i$  – глубина коррозии, соответствующая середине интервала  $i$ , мк;

$m_i$  – число значений глубины коррозии, попадающих в данный интервал.

5. На основании полученных данных делают выводы о поведении стальной арматуры в бетоне в зависимости от исследуемых факторов, а на основании результатов опытов – выводы о влиянии вида вяжущего, плотности бетона и толщины защитного слоя на поведение стальной арматуры в нем.

Результаты расчетов заносят в табл.4.13.

Т а б л и ц а 4 . 1 3

Расчетные данные по глубине коррозии

№ п/п	Номер серии/Номер образца	В/Ц	Показатели коррозии		
			$x_{cp}$	$x_{max}$	$S(x)$
1	1/4	0,4			
	1/5				
	1/6				
2	2/4	0,7			
	2/5				
	2/6				

#### 4.4.4. Исследование поведения арматуры в бетоне под воздействием агрессивных сред

Долговечность железобетонных конструкций, эксплуатируемых в промышленных и сельскохозяйственных зданиях и сооружениях, во многом зависит от степени сохранности арматуры в них.

Известно, что хлористые и сернокислые соли щелочных металлов нарушают пассивное состояние стали. Действие ионов-активаторов объясняется их способностью, адсорбируясь на поверхностной стали, вытеснять кислород, участвующий в образовании защитных слоев и пленок. Наиболее активно разрушают защитные пленки хлорид-ионы. Так, в цехах с выделением хлористого водорода наиболее серьезные повреждения железобетонных конструкций связаны, как правило, с коррозией стальной арматуры под действием образовавшегося в бетоне хлористого кальция.

Особое внимание следует уделять влиянию добавок хлористых солей, используемых в качестве ускорителей твердения или противоморозных добавок, так как, несмотря на высокое значение рН поровой жидкости в цементных бетонах нормального твердения, присутствие в ней ионов

хлора нарушает пассивное состояние поверхности стали. Следует отметить, что при небольшом содержании хлоридов развитие коррозии арматуры в бетоне с добавками хлористых солей не наблюдается. Хлориды способны образовывать слаборастворимые комплексные соли – гидрохлоралюминаты, вследствие чего небольшое количество хлористого кальция, введенного при затворении бетона, может быть практически полностью связано и не вызовет нарушения пассивности стали. В то же время необходимо учитывать, что это допустимое количество тем меньше, чем ниже в нем присутствие гипса, так как последний связывается с алюминатами в первую очередь.

Железобетонные конструкции следует изготавливать таким образом, чтобы эксплуатация их была возможна в течение проектного срока без использования дополнительных мер защиты. В некоторых случаях этого можно достичь применением бетонов с повышенным защитным действием по отношению к стальной арматуре. Значительно увеличить защитную способность бетона можно с помощью добавок-ингибиторов.

Для исследования поведения стальной арматуры в бетоне под воздействием агрессивных сред следует изучать поведение стальной арматуры в образцах (табл.4.14) путем определения потери массы металла на 1 м<sup>2</sup> площади и замера глубины коррозионных язв.

Т а б л и ц а 4 . 1 4

Характеристика исследуемых образцов

№ п/п	Номер серии	Количество образцов	Расход добавок, % от массы цемента		Вид агрессивной среды
			CaCl <sub>2</sub>	NaNO <sub>2</sub>	
1	1	3	0,5	1	-
	2	3	1,0	1	-
	3	3	2,0	1	-
	4	3	3,0	1	-
2	5	3	-	1	3 % раствор NaCl
3	10	3	-	1	5 % раствор NaCl

При этом изучается защитное действие ингибитора в образце, изготовленном с применением добавки ускорителя твердения CaCl<sub>2</sub>, агрессивной по отношению к арматуре, а также защитное действие ингибитора NaNO<sub>2</sub> в образцах, находящихся в контакте с агрессивной средой (3 %-й и 5 %-й раствор NaCl).

После пропаривания образцы подвергаются испытанию в режиме периодического увлажнения и высушивания (1 сутки – в воде и 3 суток – на воздухе) в течение 2,5-3,0 мес.

Прошедшие испытания образцы подвергают визуальному осмотру, устанавливают наличие коррозии, определяют потерю массы металла и глубину коррозионных язв.

На основании полученных данных исследований и анализа делают выводы о поведении арматуры в образцах, изготовленных с применением добавки ускорителя твердения, агрессивной по отношению к стальной арматуре. Определяется критическая дозировка  $\text{CaCl}_2$  в присутствии ингибитора коррозии  $\text{NaNO}_2$ , при которой сталь находится в пассивном состоянии. Оцениваются поведение стальной арматуры и защитное действие ингибитора коррозии в агрессивных средах.

## КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ ПО ДИСЦИПЛИНЕ «ТЕХНОЛОГИЯ БЕТОНА, СТРОИТЕЛЬНЫХ ИЗДЕЛИЙ И КОНСТРУКЦИЙ»

1. Назовите классификацию бетонов.
2. Последовательность основных переделов в промышленности строительных материалов.
3. Назовите требования, предъявляемые к крупному заполнителю для бетона.
4. Назовите нормируемые показатели качества песка для строительных работ.
5. Радиационные требования к заполнителям для бетона различного назначения.
6. Сформулируйте требования к воде, предназначенной для приготовления бетонных смесей.
7. Методы определения удобоукладываемости бетонной смеси.
8. Назовите марки бетонных смесей по удобоукладываемости.
9. Перечислите основные факторы, влияющие на технологические и реологические свойства бетонных смесей.
10. С какой целью осуществляется повторное вибрирование?
11. Назовите особенности уплотнения бетона методом центрифугирования.
12. Назовите классификацию добавок для бетона в зависимости от основного эффекта действия.
13. Дайте характеристику критерия эффективности пластифицирующих добавок.
14. Назовите исходные данные для проектирования состава обычного тяжелого бетона.
15. Приведите схему последовательности расчета состава тяжелого бетона.
16. Какие физико-химические процессы происходят в бетоне при тепловлажностной обработке (ТВО)?
17. Укажите основные периоды ТВО.
18. Твердение бетона при повышенных температурах.
19. Дайте определение марки и класса бетона.
20. Дайте определение проектной, распалубочной, отпускной и передаточной прочности бетона.
21. В чем сущность технологии непрерывного формования бетонных и железобетонных изделий?
22. Каковы особенности изготовления изделий на основе полимерцементных и полимерных вяжущих?
23. Основные положения механики разрушения цементных композитов.

24. Назовите статистические показатели для оценки однородности прочности бетона.
25. Неразрушающие методы оценки прочности бетона.
26. Перечислите деформативные свойства бетона.
27. Приведите характеристики ползучести бетона.
28. Назовите факторы, влияющие на эксплуатационные свойства бетонов.
29. Свойства легкобетонных смесей.
30. Дайте классификацию ячеистых бетонов.
31. Виды порообразователей для ячеистых бетонов.
32. Виды коррозии бетона по В.М. Москвину и меры борьбы с ней.
33. Методы оценки коррозионной стойкости бетона.
34. Виды арматурной стали для производства железобетонных изделий и их физико-механические свойства. Механический способ натяжения арматуры.
35. Какая арматурная сталь применяется в качестве напрягаемой арматуры?
36. Какие технологические операции существуют для изготовления арматурных элементов?
37. Какие методы существуют для защиты арматуры от коррозии?
38. Как осуществляется натяжение арматуры на стендах?
39. Укажите виды контроля качества готовой продукции.
40. Высокопрочные бетоны нового поколения.
41. Проектирование составов высокопрочных песчаных (мелкозернистых) самоуплотняющихся бетонов нового поколения.
42. Основные особенности структуры самоуплотняющихся бетонных смесей.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Калашников, В.И. Высокопрочные и особовысокопрочные бетоны и основные принципы их создания [Текст] / В.И. Калашников // Композиционные строительные материалы: материалы конференции. – Пенза: ПДЗ, 2008. – С. 61-71.
2. Калашников, В.И. Через рациональную реологию в будущее бетонов [Текст] / В.И. Калашников // Технология бетонов. – 2007. – №5. – С. 8-11; Технология бетонов. – 2008. – №1. – С. 22-26.
3. Баженов, Ю.М. Модифицированные высококачественные бетоны [Текст] / Ю.М. Баженов, В.С. Демьянова, В.И. Калашников. – М.: Изд-во Ассоциации строительных вузов, 2006. – 368 с.
4. Калашников, В.И. Расчет составов высокопрочных самоуплотняющихся бетонов [Текст] / В.И. Калашников // Строительные материалы. – 2008. – №10. – С. 4-6.
5. Иванов, И.А. Технология легких бетонов на искусственных пористых заполнителях [Текст] / И.А. Иванов. – М.: Стройиздат, 1974. – 287 с.
6. Технология бетона, строительных изделий и конструкций [Текст] / Ю.М. Баженов, Л.А. Алимов, В.В. Воронин, У.Х. Магдеев. – М.: АСВ, 2006. – 235 с.
7. Чумаков, Л. Технология заполнителей бетона [Текст] / Л. Чумаков. – М.: Высшая школа, 1991.
8. Анпилов, С.М. Технология возведения зданий и сооружений из монолитного железобетона [Текст] / С.М. Анпилов. – М.: АСВ, 2010. – 592 с.
9. Невилль А.М. Свойства бетона [Текст] / А.М. Невилль. – М.: Стройиздат, 1972.
10. Баженов, Ю.М. Технология бетона [Текст]: учебник / Ю.М. Баженов. – М.: АСВ, 2007. – 524 с.
11. Бремнер, Т.У. Легкий бетон – состояние и перспективы [Текст] / Т.У. Бремнер, В.Н. Ярмаковский // Научные труды 2-й Всероссийской (Международной) конференции по бетону и железобетону (5-9 сентября 2005, г. Москва): в 5 т. Т. 1. Пленарные доклады. – М.: Дипак, 2005. – С. 65-82.
12. Бужевич, Г.А. Легкие бетоны на пористых заполнителях [Текст]: монография / Г.А. Бужевич. – М.: Стройиздат, 1970. – 271 с.
13. Иванов, И.А. Технология легких бетонов на пористых заполнителях [Текст]: учебник / ИА. Иванов. – М.: Стройиздат, 1974. – 287 с.
14. Макридин, Н.И. Структура, деформативность, прочность и критерии разрушения цементных композитов [Текст]: монография / Н.И. Мак-

ридин, И.Н. Максимова, А.П. Прошин и др.; под ред. В.И. Соломатова. – Саратов: Изд-во Саратов. ун-та, 2001. – 278 с.

15. Петров, В.П. Пористые заполнители из отходов промышленности [Текст]: монография / В.П. Петров. – Самара: СГАСУ, 2005. – 152 с.

16. Ярмаковский, В.Н. Легкие бетоны нового поколения для строительства зданий высокой энергетической эффективности [Текст] / В.Н. Ярмаковский // СТРОИТЕЛ. – 2004. – №11. – С. 20-22.

17. Петров, В.П. Технология и материаловедение пористых заполнителей и легких бетонов [Текст]: монография / В.П. Петров, Н.И. Макридин, Ю.А. Соколова, В.Н. Ярмаковский. – М.: Изд-во «Палеотип»: Российская академия архитектуры и строительных наук, 2013. – 332 с.

18. Симонов, М.З. Основы технологии легких бетонов [Текст]: монография / М.З. Симонов. – М.: Стройиздат. 1973. – 584 с.

19. Петров, В.П. Пористые заполнители и легкие бетоны. Материаловедение. Технология [Текст]: учебное пособие / В.П. Петров, Н.И. Макридин, В.Н. Ярмаковский; под ред. В.П. Петрова. – Самара: СГАСУ, 2009. – 436 с.

20. Макридин, Н.И. Механическое поведение конструкционного керамзитобетона при осевом сжатии [Текст] / Н.И. Макридин, И.Н. Максимова // Строительные материалы. – 2009. – №1. – С.51-54.

21. Макридин, Н.И. Изменение структурных и прочностных характеристик керамзитобетона при циклическом воздействии положительных температур [Текст] / Н.И. Макридин, И.Н. Максимова, В.Н. Гриньков // Известия ТулГУ. Серия. Строительные материалы, конструкции, сооружения. – 2006. – Вып. 10. – С. 55-59.

22. Баженов, Ю.М. Технология бетонных и железобетонных изделий [Текст] / Ю.М. Баженов, А.Г. Комар. – М.: Стройиздат, 1984. – 672 с.

23. Дерябин, П.П. Технология строительных изделий из ячеистых бетонов [Текст]: учеб. пособие / П.П. Дерябин, В.Ф.Завадский, А.Ф.Косач, В.А.Попов. – Омск: Изд-во СибАДИ, 2004. – 108 с.

24. Баженов, Ю.М. Технология бетона, строительных изделий и конструкций [Текст] / Ю.М. Баженов, Л.А. Алимов, В.В. Воронин, У.Х. Магдеев. – М.: АСВ, 2004. – 256 с.

25. Судаков, В.В. Контроль качества и надежность железобетонных конструкций [Текст] / В.В. Судаков. – М.: Стройиздат, 1980. – 168 с.

26. Баженов, Ю.М. Бетонополимеры [Текст] / Ю.М. Баженов. – М.: Стройиздат, 1983. – 472 с.

27. Попов, Л.Н. Лабораторный контроль строительных материалов и изделий [Текст]: справочник / Л.Н. Попов. – М.: Стройиздат, 1986. – 349 с.

28. Попов, Л.Н. Основы технологического проектирования заводов железобетонных изделий [Текст] / Л.Н. Попов, Е.Н. Ипполитов, В.Ф. Афанасьева. – М.: Стройиздат, 1988. – 312 с.
29. Шестоперов, С.П. Технология бетона [Текст]: учебное пособие для вузов / С.П. Шестоперов. – М.: Стройиздат, 1983. – 472 с.
30. Хаютин, Ю.Г. Монолитный бетон [Текст] / Ю.Г. Хаютин. – 2-е изд. перераб. и доп. – М.: Высш. шк., 1977. – 431 с.
31. Ицкович, С.М. Технология заполнителей бетона [Текст] / С.М. Ицкович, Л.Д. Чумаков, Ю.М. Баженов. – М.: Высшая школа, 1991.
32. Калашников В.И. Основные принципы создания высокопрочных и особовысокопрочных бетонов [Текст] / В.И. Калашников // Популярное бетоноведение. – СПб., 2008. – №3. – С. 102-107.
33. Калашников, В.И. Через рациональную реологию в будущее бетонов [Текст] / В.И. Калашников // Технологии бетонов. – 2007. – №5. – С.8-10; №6. – С. 8-11; 2008. – №1. – С. 22-26.
34. ГОСТ 24211–2008. Добавки для бетонов и строительных растворов. Общие технические условия [Текст]. – М., 2008.
35. ГОСТ 30459–2008. Добавки для бетонов и строительных растворов. Определение и оценка эффективности [Текст]. – М., 2008.
36. ГОСТ 7473–2010. Смеси бетонные. Технические условия [Текст]. – М., 2010.
37. ГОСТ 310.4–81. Цементы. Методы определения предела прочности при изгибе и сжатии [Текст]. – М., 1981.
38. ГОСТ 5802–86. Растворы строительные. Методы испытаний [Текст]. – М., 1986.
39. ГОСТ 8267–93. Щебень и гравий из плотных горных пород для строительных работ. Технические условия [Текст]. – М., 1993.
40. ГОСТ 8269.0–97. Щебень и гравий из плотных горных пород и отходов промышленного производства для строительных работ. Методы физико-механических испытаний [Текст]. – М., 1997.
41. ГОСТ 8736–93. Песок для строительных работ. Технические условия [Текст]. – М., 1993.
42. ГОСТ 9179–77. Известь строительная. Технические условия [Текст]. – М., 1977.
43. ГОСТ 9757–90. Гравий, щебень и песок искусственные пористые. Технические условия [Текст]. – М., 1990.
44. ГОСТ 10060.0–95. Бетоны. Методы определения морозостойкости. Общие требования [Текст]. – М., 1995.

45. ГОСТ 10060.2–95. Бетоны. Ускоренные методы определения морозостойкости при многократном замораживании и оттаивании [Текст]. – М., 1995.
46. ГОСТ 10178–85. Портландцемент и шлакопортландцемент. Технические условия [Текст]. – М., 1985.
47. ГОСТ 10180–90. Бетоны. Методы определения прочности по контрольным образцам [Текст]. – М., 1990.
48. ГОСТ 10181–2000. Смеси бетонные. Методы испытаний [Текст]. – М., 2000.
49. ГОСТ 10181.1–81. Смеси бетонные. Методы определения удобоукладываемости [Текст]. – М., 1981.
50. ГОСТ 10181.2–81. Смеси бетонные. Методы определения плотности бетонных смесей [Текст]. – М., 1981.
51. ГОСТ 10181.3–81. Смеси бетонные. Методы определения пористости бетонных смесей [Текст]. – М., 1981.
52. ГОСТ 10181.4–81. Смеси бетонные. Методы определения раслаиваемости бетонных смесей [Текст]. – М., 1981.
53. ГОСТ 12730.1–78. Бетоны. Метод определения плотности [Текст]. – М., 1978.
54. ГОСТ 12730.3–78. Бетоны. Метод определения водопоглощения [Текст]. – М., 1978.
55. ГОСТ 12730.5–84. Бетоны. Методы определения водонепроницаемости [Текст]. – М., 1984.
56. ГОСТ 12852.0–77. Бетон ячеистый. Общие требования к методам испытаний [Текст]. – М., 1977.
57. ГОСТ 23732–79. Вода для бетонов и растворов. Технические условия [Текст]. – М., 1979.
58. ГОСТ 23789–79. Вяжущие гипсовые. Методы испытаний [Текст]. – М., 1979.
59. ГОСТ 25485–89. Бетоны ячеистые. Технические условия [Текст]. – М., 1989.
60. ГОСТ 25820–2000. Бетоны легкие. Технические условия [Текст]. – М., 2000.
61. ГОСТ 26633–91. Бетоны тяжелые и мелкозернистые. Технические условия [Текст]. – М., 1991.
62. ГОСТ 27006–86. Бетоны. Правила подбора состава [Текст]. – М., 1986.
63. ГОСТ 28013–98. Растворы строительные. Общие технические условия [Текст]. – М., 1998.

64. ГОСТ Растворы строительные. Номенклатура показателей [Текст].
65. ГОСТ 31108–2003. Цементы общестроительные. Технические условия [Текст]. – М., 2003.
66. ГОСТ 31359–2007. Бетоны ячеистые автоклавного твердения. Технические условия [Текст]. – М., 2007.
67. ГОСТ 31383–2008. Защита бетонных и железобетонных конструкций от коррозии. Методы испытаний [Текст]. – М., 2008.
68. ГОСТ 310.3–76. Цементы. Методы определения нормальной плотности, сроков схватывания и равномерности изменения объема [Текст]. – М., 1976.
69. ГОСТ 8735–88. Песок для строительных работ. Методы испытаний [Текст]. – М., 1988.
70. ГОСТ 10060.1–95. Бетоны. Базовый метод определения морозостойкости [Текст]. – М., 1995.
71. ГОСТ 10060.3–95. Бетоны. Дилатометрический метод ускоренного определения морозостойкости [Текст]. – М., 1995.
72. ГОСТ 13087–81. Бетоны. Методы определения истираемости [Текст]. – М., 1981.
73. ГОСТ 25192–82. Бетоны. Классификация и общие технические требования [Текст]. – М., 1982.
74. ГОСТ 31384–2008. Защита бетонных и железобетонных конструкций от коррозии. Общие технические требования [Текст]. – М., 2008.
75. ГОСТ 25246–82\*\*. Бетоны химически стойкие. Технические условия [Текст]. – М., 1982.
76. ГОСТы и СНиПы ГОСТ 27215–87. Плиты перекрытий железобетонные ребристые для производственных зданий промышленных предприятий [Текст]. – 1988. – 15 с.
77. СНиП 3.09.01–85. Производство сборных железобетонных конструкций и изделий [Текст]/ Госстрой СССР. – М.: ЦИТП Госстроя СССР, 1985. – 40 с.
78. СНиП 3.03.01–87. Несущие и ограждающие конструкции / Госстрой СССР. – М.: ЦИТП Госстроя СССР, 1988. – 192 с.
79. ГОСТ 13015.0–83\*. Конструкции и изделия бетонные и железобетонные сборные. Общие технические условия [Текст]. – М., 1983.
80. ГОСТ Р 51263–99. Полистиролбетон. Технические условия [Текст]. – М., 1999.
81. ГОСТ 24316–80. Бетон. Метод определения тепловыделения при твердении [Текст]. – М., 1980.

82. ГОСТ 24452–80. Бетон. Методы определения призмочной прочности, модуля упругости и коэффициента Пуассона [Текст]. – М., 1980.

83. ГОСТ 24544–81. Методы определения деформаций усадки и ползучести [Текст]. – М., 1981.

84. ГОСТ 24545–81. Методы испытаний на выносливость [Текст]. – М., 1981.

85. ГОСТ 29167–91. Бетон. Методы определения характеристик трещиностойкости (вязкости разрушения) при статическом нагружении [Текст]. – М., 1991.

## О Г Л А В Л Е Н И Е

ВВЕДЕНИЕ .....	3
1. БЕТОНОВЕДЕНИЕ И ТЕХНОЛОГИЯ БЕТОНА .....	5
1.1. Классификация тяжелых бетонов по компонентному составу и прочности на сжатие .....	8
Лабораторная работа №1 ОПРЕДЕЛЕНИЕ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЗАПОЛНИТЕЛЕЙ ДЛЯ БЕТОНА .....	10
Лабораторная работа №2 ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВОДОПОТРЕБНОСТИ ЗАПОЛНИТЕЛЯ.....	18
Лабораторная работа №3 ОПРЕДЕЛЕНИЕ УДЕЛЬНОЙ ПОВЕРХНОСТИ ЗАПОЛНИТЕЛЕЙ И НАПОЛНИТЕЛЕЙ .....	20
Лабораторная работа №4 ПРОЕКТИРОВАНИЕ СОСТАВА ТЯЖЕЛОГО БЕТОНА РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫМ МЕТОДОМ.....	22
1.2. Выбор и назначение состава тяжелого бетона с применением методов математического планирования эксперимента.....	36
1.3. Проектирование составов высокопрочных песчаных (мелкозернистых) самоуплотняющихся бетонов нового поколения расчетно-экспериментальным способом .....	49
1.4. Основные положения технологии легких бетонов .....	56
Лабораторная работа №5 ПОДБОР СОСТАВА ЛЕГКОГО БЕТОНА. ОСНОВНЫЕ ПРИНЦИПЫ ПОДБОРА .....	62
1.4.1. Особенности изготовления изделий из легких бетонов.....	78
1.4.2. Оптимизация состава легкого конструкционного бетона и исследование факторов, влияющих на его свойства .....	81
1.5. Выбор химических добавок для производства бетонных и железобетонных изделий. Оценка эффективности добавок .....	90
1.5.1. Тестирование суперпластификаторов, цементов и каменной муки по растекаемости суспензий.....	100
Лабораторная работа №6 ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПЛАСТИФИЦИРУЮЩИХ ДОБАВОК .....	103
Лабораторная работа №7 ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ДОБАВОК, РЕГУЛИРУЮЩИХ КИНЕТИКУ ТВЕРДЕНИЯ БЕТОНА.....	107
1.6. Определение динамического модуля упругости, коэффициента внутреннего трения цементных композитов и горных пород .....	112

1.7. Диагностика качества конструкционных строительных материалов по результатам акустической эмиссии .....	116
Лабораторная работа №8	
ОПРЕДЕЛЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ТРЕЩИНОСТОЙКОСТИ (ВЯЗКОСТИ РАЗРУШЕНИЯ) ЦЕМЕНТНЫХ СИСТЕМ.....	122
2. ВИДЫ АРМАТУРНОЙ СТАЛИ. СПОСОБЫ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОГО НАТЯЖЕНИЯ АРМАТУРЫ И КОНТРОЛЯ НАПРЯЖЕНИЯ.....	126
2.1. Определение основных физико-механических свойств арматурных сталей .....	132
2.2. Механический способ натяжения арматуры. Контроль величины предварительного напряжения.....	135
3. ПОВЫШЕНИЕ СТЕПЕНИ ЗАВОДСКОЙ ГОТОВНОСТИ И УЛУЧШЕНИЕ КАЧЕСТВА ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ИЗДЕЛИЙ.....	143
3.1 Изучение неразрушающих методов оценки прочности бетона.....	144
3.2. Статистический метод контроля и оценки прочности бетона с учетом его однородности.....	148
3.3. Пример статистического контроля прочности бетона с учетом однородности .....	156
4. ПОВЫШЕНИЕ ДОЛГОВЕЧНОСТИ БЕТОННЫХ И ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ИЗДЕЛИЙ .....	159
4.1. Агрессивные среды, снижающие долговечность бетонных и железобетонных изделий .....	160
4.2. Методы оценки степени агрессивности сред.....	167
4.3. Методы оценки коррозионной стойкости бетона .....	169
4.4. Исследование коррозионной стойкости бетона и стальной арматуры в различных агрессивных средах .....	171
4.4.1. Влияние вида агрессивной среды на коррозию бетона.....	171
4.4.2. Определение относительной стойкости бетона на различных вяжущих под воздействием агрессивных сред .....	174
4.4.3. Исследование поведения стальной арматуры в бетонах.....	176
4.4.4. Исследование поведения арматуры в бетоне под воздействием агрессивных сред .....	179
КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ ПО ДИСЦИПЛИНЕ «ТЕХНОЛОГИЯ БЕТОНА, СТРОИТЕЛЬНЫХ ИЗДЕЛИЙ И КОНСТРУКЦИЙ» .....	182
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК .....	184

Учебное издание

Макридин Николай Иванович  
Калашников Владимир Иванович  
Махамбетова Камажай Нурабуллаевна

ТЕХНОЛОГИЯ БЕТОНА, СТРОИТЕЛЬНЫХ ИЗДЕЛИЙ  
И КОНСТРУКЦИЙ  
Лабораторный практикум

Учебное пособие

Под общ. ред. д-ра техн. наук, проф. Ю.П. Скачкова

Редактор        М.А. Сухова  
Верстка        Н.А. Сазонова

Подписано в печать 25.06.2014. Формат 60×84/16.  
Бумага офисная «Снегурочка». Печать на ризографе.  
Усл. печ. л. 11,16. Уч.-изд. л. 12,0. Тираж 80 экз.  
Заказ №206.



---

Издательство ПГУАС.  
440028, г.Пенза, ул. Германа Титова, 28.