

А. В. Ферронская  
В. И. Стамбулко

# ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ

по курсу  
"Технология  
бетонных  
и железобетонных  
изделий"

*учебное пособие  
для вузов*



**А. В. Ферронская  
В. И. Стамбулко**

**ЛАБОРАТОРНЫЙ  
ПРАКТИКУМ  
по курсу  
“Технология  
бетонных  
и железобетонных  
изделий”**

Допущено  
Министерством высшего и среднего  
специального образования СССР  
в качестве учебного пособия для студентов  
вузов, обучающихся по специальности  
«Производство строительных изделий  
и конструкций»



МОСКВА  
«ВЫСШАЯ ШКОЛА» 1988

эффективное решение социальных вопросов — создание комфортабельных условий труда, улучшение охраны труда и окружающей среды.

В соответствии с перестройкой высшего и среднего специального образования, осуществляемой в нашей стране, необходимо повышение эффективности системы подготовки специалистов для различных областей народного хозяйства, в частности инженеров технологов-строителей, расширения самостоятельного изучения материалов студентами, формирования у них профессиональных навыков, качеств умелого организатора производства, способного самостоятельно принимать решения и проводить их в жизнь. Решению этих основных задач и закреплению знаний теории и практики производства бетонных и железобетонных изделий и конструкций, необходимых инженеру технологу-строителю, будут способствовать лабораторные работы, изложенные в данном учебном пособии.

## ГЛАВА I

### ОБЩИЕ УКАЗАНИЯ ПО ПРОВЕДЕНИЮ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ СВОЙСТВ БЕТОННЫХ СМЕСЕЙ И БЕТОНА

Одной из важнейших хозяйственно-политических задач, направленных на ускорение темпов социально-экономического развития страны, внедрение достижений научно-технического прогресса, перевод народного хозяйства на интенсивный путь развития, реализацию основных программных целей КПСС — укрепление экономического потенциала страны, как указывается в Постановлении ЦК КПСС и Совета Министров СССР от 13 марта 1986 г., является повышение качества капитального строительства. Для решения сложных задач, поставленных перед капитальным строительством, требуется коренное улучшение профессиональной подготовки студентов. Постановление ЦК КПСС и Совета Министров СССР от 21 марта 1987 г. «Об основных направлениях перестройки высшего и среднего специального образования в стране» способствует решению этого вопроса.

Одной из главных задач при подготовке специалистов высокой квалификации является уменьшение загрузки студентов лекционными занятиями, увеличение практических и лабораторных работ по индивидуальным заданиям с расширением в них научных исследований и применением вычислительной техники.

Проведение лабораторных работ с научной направленностью и имеющих большое практическое значение позволит не только закрепить теоретические знания по дисциплине «Технология бетонных и железобетонных изделий», но и повысить профессиональную подготовку инженеров строителей-технологов в соответствии с требованиями, поставленными в указанном Постановлении.

#### *1.1. Организация и проведение лабораторных работ*

Лабораторные работы рекомендуется проводить с подгруппами в 10...12 студентов, которые разбиваются на звенья по 2...3 человека. Каждому звену дается индивидуальное задание, решаемое расчетным и экспериментальным путем. На основании полученных результатов исследований каждое звено делает выводы по работе. Чтобы обеспечить достоверность данных во многих случаях обработку результатов исследований целесообразно проводить методами математической статистики.

Перед выполнением лабораторной работы студент должен изучить необходимую литературу, а также соответствующий раздел лекционного курса, написать теоретическую часть и получить допуск к проведению лабораторной работы, ответив на вопросы по данной лабораторной работе с помощью контролирующих машин или других средств обучения. К выполнению лабораторной

работы студент допускается после прохождения им вводного (общего) инструктажа по технике безопасности.

После выполнения лабораторной работы студент составляет индивидуальный отчет по форме, принятой при составлении отчетов о научных исследованиях.

Отчет по работе должен включать: цель работы, краткое введение (обзор литературы о состоянии вопроса и задачах исследования); методику исследования; краткое описание хода работы; анализ полученных результатов исследований (таблицы, графики, частные выводы по результатам работы каждого звена); общие выводы; экономические расчеты и рекомендации по результатам работы всех звеньев; список использованной литературы. Студент, не написавший отчет по текущей лабораторной работе и краткое введение к новой, а также не ответивший на контрольные вопросы, не допускается к выполнению очередной лабораторной работы.

Защита лабораторных работ студентом проводится на коллоквиуме после прохождения цикла работ по каждому разделу курса.

## *1.2. Подготовка и хранение материалов, оборудование и аппаратура*

Материалы должны храниться в сухом помещении: вяжущие (портландцемент) — в мешках или плотно закрывающихся ларях, известь — в герметической таре, заполнители — в ларях. Все виды заполнителей должны быть высушены при температуре 105...110 °С. Перед употреблением портландцемент просеивают через сито 64 отв/см<sup>2</sup> (с размером отверстий 0,9 мм) для удаления случайных примесей. Для опытов используют только фракционированный щебень или гравий фракций 5...10; 10...20; 20...40 мм. Желательно иметь несколько видов щебня (известняковый, гранитный и т. д.). Керамзитовый заполнитель также должен быть фракционированным. В качестве мелкого заполнителя следует использовать кварцевый (рядовой и молотый) и керамзитовый пески.

Сыпучие материалы хранят в специальных емкостях (лари, металлические банки и бачки); образцы хранятся на стеллажах, в ваннах с гидравлическими затворами, эксикаторах и т. п. Сушку материалов и образцов осуществляют в сушильных шкафах, нагревательных приборах, а также противнях. Для рассева и определения зернового состава заполнителей, цемента и

других вяжущих веществ, для отсева из цемента и вяжущих материалов посторонних примесей и комков применяют стандартные наборы сит.

Удельную поверхность вяжущих веществ определяют на специальных приборах. Для подготовки материалов и образцов к испытанию используют лабораторные бегуны, шаровые мельницы, вибромельницу, растворо- и бетоносмесители. Взвешивание материалов и образцов осуществляют на технических, гирных или циферблатных, лабораторных и платформных весах с набором гирь. Для непрерывного взвешивания образцов применяют специальные установки, например, автоматическая установка ВНИИЖелезобетона и др.

Определение удобоукладываемости (подвижности и жесткости) бетонной смеси, подвижности растворной смеси и консистенции цементного раствора производят на специальных приборах (ГОСТ 10181.1—81; 5802—78 и 310.4—81). Бетонную смесь уплотняют на виброплощадке типа 435 А (амплитуда  $(0,5 \pm 0,05)$  мм и частота  $(2900 \pm 100)$  кол/мин).

Линейные размеры образцов измеряют металлическими линейками, штангенциркулями, неплоскостность — поверочными плитами и щупами. Нецилиндричность образцов измеряют с помощью поверочной плиты и щупов или поверочных линеек, а перпендикулярность — с помощью щупов и поверочных угольников  $90^\circ$ .

Для испытания образцов необходимо иметь гидравлические прессы и универсальные разрывные машины (ГОСТ 8905—73), а также приспособления для испытания образцов на изгиб и растяжение. Для определения твердости служит твердомер (например, твердомер Бринелля) и отсчетный микроскоп к нему.

Механическую прочность бетона без разрушения проверяют эталонными молотками (ГОСТ 22690.1—77).

Для измерения прочности бетона используют ультразвуковые приборы (табл. 1.1).

Для определения линейных изменений образцов используют горизонтальные и вертикальные длиномеры и индикаторы часового типа. Лаборатория должна иметь набор контрольно-измерительных приборов: образцовые манометры, динамометры, секундомеры, микроскоп, лупы, микрометры, рулетки, психрометры, тензометры, тахометры, вибрографы, термометры; приборы для определения плотности (прибор Ле-Шателье, объемер, пикнометр и др.). В лаборатории должна иметься тонкостенная и лабораторная химическая посуда, в частности

ББК 38.626.1  
Ф43  
УДК 691.328

Рецензенты:

кафедра строительных материалов и специальных технологий Новосибирского инженерно-строительного института (зав. кафедрой проф. Г. И. Книгина); д-р техн. наук, проф. А. Г. Комар (ВЗИСИ)

Ф43 Ферронская А. В., Стамбулко В. И.  
Лабораторный практикум по курсу «Технология бетонных и железобетонных изделий»: Учеб. пособие для вузов по спец. «Пр-во строит. изделий и конструкций». — М.: Высш. шк., 1988. — 223 с.: ил.  
ISBN 5—06—001343—X

Излагаются общие и методические указания по организации и проведению лабораторных работ, перечень необходимого оборудования, приборов и приспособлений, методы исследования основных свойств бетонной смеси и бетона, основные мероприятия по технике безопасности. При проведении лабораторных работ применяются современные методы исследования, в том числе и математической статистики.

Может быть использован инженерно-техническими работниками предприятий строительной индустрии, промышленности строительных материалов и др.

3203000000(4309000000)—376 191—88  
001(01)—88

ББК 38.626.1  
6С3

ISBN 5—06—001343—X

© Издательство «Высшая школа», 1988

ПРЕДИСЛОВИЕ

Лабораторный практикум предназначен для проведения учебных лабораторных работ по курсу «Технология бетонных и железобетонных изделий», а также для факультативного изучения отдельных разделов курса в студенческих научных обществах.

Учебное пособие состоит из пяти глав. В первой главе излагаются общие указания по организации и проведению лабораторных работ, приводятся перечень необходимого оборудования, приборов и приспособлений, основные мероприятия по технике безопасности; методы исследования основных свойств бетонной смеси и бетона. В последующих главах излагается материал для проведения лабораторных работ, отражающий четыре раздела дисциплины «Технология бетонных и железобетонных изделий»: 1) «Бетонведение и технология бетона»; 2) «Технологические процессы и способы изготовления бетонных и железобетонных изделий»; 3) «Повышение степени заводской готовности и улучшение качества железобетонных изделий. Контроль и управление качеством на заводах сборного железобетона»; 4) «Повышение долговечности бетонных и железобетонных конструкций».

Проведение лабораторных работ окажет практическую помощь студентам: в закреплении теоретических разделов курса; изучении некоторых вопросов технологии путем самостоятельной работы с научно-технической и нормативной литературой; освоении современных методов исследований бетонных смесей и бетонов; обучении проведения экспериментальных исследований способствующих приобретению самостоятельных навыков в методах и формах изучения отдельных технологических приемов с целью совершенствования технологии железобетонных изделий и улучшения их качества и эффективности; обосновании анализа результатов проводимой работы; обобщении и систематизации частных и общих результатов опытов.

По содержанию и методике выполнения лабораторные работы носят, как правило, исследовательский характер с использованием современных методов исследо-

ваний. Большое место отводится методам математического планирования эксперимента. Примеры соответствующих расчетов, приведенные во многих лабораторных работах, позволяют составить программы для ЭВМ и применить их в технологических расчетах лабораторных работ с использованием результатов в курсовом и дипломном проектировании.

При написании лабораторного практикума были использованы государственные стандарты, технические условия, руководства и рекомендации, а также опыт работы лабораторий кафедры технологии вяжущих веществ и бетонов МИСИ им. В. В. Куйбышева и других вузов, готовящих инженеров технологов-строителей по указанной выше специальности.

Авторы благодарны рецензентам: д-ру техн. наук, проф. А. Г. Комару; кафедре строительных материалов и специальных технологий Новосибирского инженерно-строительного института (зав. кафедрой, д-р техн. наук, проф. Г. И. Книгина) за ценные замечания и советы, направленные на улучшение книги, и будут признательны специалистам за критические отзывы, которые следует присылать в адрес издательства «Высшая школа», что поможет в будущем улучшить данное пособие.

*Авторы*

Задачи, поставленные XXVII съездом КПСС в области капитального строительства, требуют дальнейшего совершенствования проектирования, производства и применения сборных и монолитных железобетонных конструкций, повышения их качества и эффективности, быстрее внедрения в строительство достижений научно-технического прогресса. Для реализации этих планов необходимо прежде всего развивать производство строительных материалов и изделий, которые обеспечат снижение материалоемкости, энергоемкости, стоимости и трудоемкости строительства. К числу таких материалов в первую очередь следует отнести бетон и железобетон, которые по своим физико-механическим свойствам, технико-экономическим показателям производства и применения изделий и конструкций из них будут, как и ранее, занимать ведущее место в строительстве.

Широкое применение сборного железобетона значительно сокращает расход металла, древесины и других традиционных материалов, а также повышает долговечность конструкций. Намечаемое на перспективу увеличение выпуска сборного железобетона требует дальнейшего роста производства с одновременным повышением эффективности и качества бетона и железобетона. Это возможно лишь при совершенствовании технологии и свойств бетона и железобетона. Поэтому для дальнейшего совершенствования свойств и технологии бетона и железобетона необходимы: разработка эффективных видов вяжущих веществ, высококачественных заполнителей, комплексных химических добавок, арматурных сталей, а также новых видов бетона;

внедрение в строительство новых эффективных и долговечных конструкций из бетона и железобетона;

совершенствование технологии бетонных и железобетонных конструкций путем внедрения новых более современных технологических процессов, автоматизированного оборудования, совершенных систем контроля и управления качеством готовых изделий; более широкое использование вторичного сырья и отходов промышленности, создание безотходных производств;

эффективное решение социальных вопросов — создание комфортабельных условий труда, улучшение охраны труда и окружающей среды.

В соответствии с перестройкой высшего и среднего специального образования, осуществляемой в нашей стране, необходимо повышение эффективности системы подготовки специалистов для различных областей народного хозяйства, в частности инженеров технологов-строителей, расширения самостоятельного изучения материалов студентами, формирования у них профессиональных навыков, качеств умелого организатора производства, способного самостоятельно принимать решения и проводить их в жизнь. Решению этих основных задач и закреплению знаний теории и практики производства бетонных и железобетонных изделий и конструкций, необходимых инженеру технологу-строителю, будут способствовать лабораторные работы, изложенные в данном учебном пособии.

**ОБЩИЕ УКАЗАНИЯ ПО ПРОВЕДЕНИЮ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ СВОЙСТВ БЕТОННЫХ СМЕСЕЙ И БЕТОНА**

Одной из важнейших хозяйственно-политических задач, направленных на ускорение темпов социально-экономического развития страны, внедрение достижений научно-технического прогресса, перевод народного хозяйства на интенсивный путь развития, реализацию основных программных целей КПСС — укрепление экономического потенциала страны, как указывается в Постановлении ЦК КПСС и Совета Министров СССР от 13 марта 1986 г., является повышение качества капитального строительства. Для решения сложных задач, поставленных перед капитальным строительством, требуется коренное улучшение профессиональной подготовки студентов. Постановление ЦК КПСС и Совета Министров СССР от 21 марта 1987 г. «Об основных направлениях перестройки высшего и среднего специального образования в стране» способствует решению этого вопроса.

Одной из главных задач при подготовке специалистов высокой квалификации является уменьшение загрузки студентов лекционными занятиями, увеличение практических и лабораторных работ по индивидуальным заданиям с расширением в них научных исследований и применением вычислительной техники.

Проведение лабораторных работ с научной направленностью и имеющих большое практическое значение позволит не только закрепить теоретические знания по дисциплине «Технология бетонных и железобетонных изделий», но и повысить профессиональную подготовку инженеров строителей-технологов в соответствии с требованиями, поставленными в указанном Постановлении.

**1.1. Организация и проведение лабораторных работ**

Лабораторные работы рекомендуется проводить с подгруппами в 10...12 студентов, которые разбиваются на звенья по 2...3 человека. Каждому звену дается индивидуальное задание, решаемое расчетным и экспериментальным путем. На основании полученных результатов исследований каждое звено делает выводы по работе. Чтобы обеспечить достоверность данных во многих случаях обработку результатов исследований целесообразно проводить методами математической статистики.

Перед выполнением лабораторной работы студент должен изучить необходимую литературу, а также соответствующий раздел лекционного курса, написать теоретическую часть и получить допуск к проведению лабораторной работы, ответив на вопросы по данной лабораторной работе с помощью контролирующих машин или других средств обучения. К выполнению лабораторной

работы студент допускается после прохождения им вводного (общего) инструктажа по технике безопасности.

После выполнения лабораторной работы студент составляет индивидуальный отчет по форме, принятой при составлении отчетов о научных исследованиях.

Отчет по работе должен включать: цель работы, краткое введение (обзор литературы о состоянии вопроса и задачах исследования); методику исследования; краткое описание хода работы; анализ полученных результатов исследований (таблицы, графики, частные выводы по результатам работы каждого звена); общие выводы; экономические расчеты и рекомендации по результатам работы всех звеньев; список использованной литературы. Студент, не написавший отчет по текущей лабораторной работе и краткое введение к новой, а также не ответивший на контрольные вопросы, не допускается к выполнению очередной лабораторной работы.

Защита лабораторных работ студентом проводится на коллоквиуме после прохождения цикла работ по каждому разделу курса.

## ***1.2. Подготовка и хранение материалов, оборудование и аппаратура***

Материалы должны храниться в сухом помещении: вяжущие (портландцемент) — в мешках или плотно закрывающихся ларях, известь — в герметической таре, заполнители — в ларях. Все виды заполнителей должны быть высушены при температуре 105...110 °С. Перед употреблением портландцемент просеивают через сито 64 отв/см<sup>2</sup> (с размером отверстий 0,9 мм) для удаления случайных примесей. Для опытов используют только фракционированный щебень или гравий фракций 5...10; 10...20; 20...40 мм. Желательно иметь несколько видов щебня (известняковый, гранитный и т. д.). Керамзитовый заполнитель также должен быть фракционированным. В качестве мелкого заполнителя следует использовать кварцевый (рядовой и молотый) и керамзитовый пески.

Сыпучие материалы хранят в специальных емкостях (лари, металлические банки и бачки); образцы хранятся на стеллажах, в ваннах с гидравлическими затворами, эксикаторах и т. п. Сушку материалов и образцов осуществляют в сушильных шкафах, нагревательных приборах, а также противнях. Для отсева и определения зернового состава заполнителей, цемента и

других вяжущих веществ, для отсева из цемента и вяжущих материалов посторонних примесей и комков применяют стандартные наборы сит.

Удельную поверхность вяжущих веществ определяют на специальных приборах. Для подготовки материалов и образцов к испытанию используют лабораторные бегуны, шаровые мельницы, вибромельницу, растворо- и бетоносмесители. Взвешивание материалов и образцов осуществляют на технических, гирных или циферблатных, лабораторных и платформных весах с набором гирь. Для непрерывного взвешивания образцов применяют специальные установки, например, автоматическая установка ВНИИЖелезобетона и др.

Определение удобоукладываемости (подвижности и жесткости) бетонной смеси, подвижности растворной смеси и консистенции цементного раствора производят на специальных приборах (ГОСТ 10181.1—81; 5802—78 и 310.4—81). Бетонную смесь уплотняют на виброплощадке типа 435 А (амплитуда  $(0,5 \pm 0,05)$  мм и частота  $(2900 \pm 100)$  кол/мин).

Линейные размеры образцов измеряют металлическими линейками, штангенциркулями, неплоскостность — поверочными плитами и шупами. Нецилиндричность образцов измеряют с помощью поверочной плиты и шупов или поверочных линейек, а перпендикулярность — с помощью шупов и поверочных угольников  $90^\circ$ .

Для испытания образцов необходимо иметь гидравлические прессы и универсальные разрывные машины (ГОСТ 8905—73), а также приспособления для испытания образцов на изгиб и растяжение. Для определения твердости служит твердомер (например, твердомер Бринелля) и отсчетный микроскоп к нему.

Механическую прочность бетона без разрушения проверяют эталонными молотками (ГОСТ 22690.1—77).

Для измерения прочности бетона используют ультразвуковые приборы (табл. 1.1).

Для определения линейных изменений образцов используют горизонтальные и вертикальные длиномеры и индикаторы часового типа. Лаборатория должна иметь набор контрольно-измерительных приборов: образцовые манометры, динамометры, секундомеры, микроскоп, лупы, микрометры, рулетки, психрометры, тензомеры, тахометры, вибрографы, термометры; приборы для определения плотности (прибор Ле-Шателье, объеммер, пикнометр и др.). В лаборатории должна иметься тонкостенная и лабораторная химическая посуда, в частности

ляющихся общими для всех лабораторных работ. Частные методы исследований излагаются дополнительно в каждой лабораторной работе.

**Определение зернового состава и модуля крупности песка.** Модуль крупности песка является характеристикой его зернового состава. Для определения зернового состава пробу песка в 1 кг просеивают через набор стандартных сит с сетками № 0,14; 0,315; 0,63; 1,25; и с круглыми отверстиями 2,5 мм. Остатки на каждом сите взвешивают и определяют частные остатки (г) на всех ситах  $m_{0,14}$ ,  $m_{0,315}$ , ...,  $m_{2,5}$ . Затем определяют суммарную массу просеянной пробы  $\Sigma m$  (г) как сумму частных остатков на всех ситах. По данным испытаний вычисляют от суммарной массы пробы  $\Sigma m$  частные остатки (%) —  $m_i = (m_i / \Sigma m) 100$ , а также полный остаток  $M_i$  (%) на каждом сите как сумму частных остатков на всех ситах с большим размером отверстий плюс остаток на данном сите:

$$M_i = m_{2,5} + \dots + m_i, \quad (1.1)$$

где  $m_{2,5} + \dots + m_i$  — частные остатки на ситах с большим размером отверстий, начиная с сита, имеющего размер отверстий 2,5 мм.

По результатам полных остатков вычисляют модуль крупности песка:

$$M_{кр} = (M_{2,5} + M_{1,25} + M_{0,63} + M_{0,315} + M_{0,14}) / 100. \quad (1.2)$$

**Определение зернового состава щебня (гравия).** Берут пробу испытываемого щебня (гравия) и одновременно или частями просеивают через стандартный набор сит (0,14, 3,5, 10, 20, 40 и 70 мм). Масса пробы зависит от наибольшей крупности зерен заполнителя. При наибольшей крупности зерен щебня (гравия) до 10, 20, 40 и 70 мм масса пробы должна быть не менее 5, 10, 20 и 30 кг соответственно.

Частицы, прошедшие через сито с отверстиями размером 0,14 мм, отбрасывают. Остатки щебня (гравия) на каждом из сит взвешивают и определяют частные остатки (г) на всех ситах:  $m_{0,14}$ ;  $m_3$ ;  $m_5$ ; ...,  $m_{70}$ . Затем определяют суммарную массу просеянной пробы как сумму частных остатков на всех ситах (г):

$$\Sigma m = m_{0,14} + m_3 + m_5 + \dots + m_{70}.$$

По данным испытания вычисляют в процентах от суммарной массы пробы  $\Sigma m$  частные остатки  $a_i =$

$= (m_i / \sum m) 100$ , а также полные остатки, равные сумме частных остатков на данном и на всех вышележащих ситах с отверстиями большего размера. По результатам этих определений строят кривую просеивания, характеризующую зерновой состав испытываемого щебня (гравия) (рис. 1.1).

Наибольшую и наименьшую крупность щебня (гравия) испытываемой пробы характеризуют размерами отверстий сит, полные остатки на которых, определенные на кривой просеивания, составляют 5% ( $D_{\text{наиб}}$ ) и 95% ( $D_{\text{наим}}$ ). Значения этих размеров округляют в большую сторону до ближайших размеров отверстий стандартных сит.

**Приготовление бетонной смеси.** Приготовление бетонной смеси производят вручную или механическим путем.

При ручном способе перемешивание материалов, входящих в состав бетонной смеси, осуществляют на противне. На смоченный водой противень сначала высыпают песок, затем вяжущее и перемешивают. Далее добавляют крупный заполнитель. Материалы перемешивают в сухом состоянии до получения однородной массы. Сухую смесь собирают в кучу, в которой делают углубление. Примерно половину от общего количества воды выливают в углубление и осторожно перемешивают с материалами, затем выливают оставшуюся воду и смесь снова энергично перемешивают.

При механическом способе перемешивание материалов производится в лабораторных смесителях. Материалы всыпают в смеситель в течение 2 мин. Вода вливается равномерно в течение всего времени засыпки материалов. Время перемешивания для замеса объемом до 30 л — 5 мин, до 50 л — 10 мин.

**Определение консистенции цементной растворной смеси.** Для определения консистенции цементного рас-

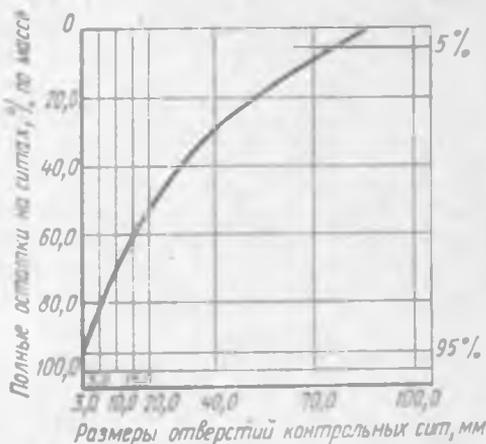


Рис. 1.1. Зерновой состав щебня (гравия)

твора песок и цемент высыпают в предварительно прогтертую мокрой тканью чашу и перемешивают лопаткой в течение 1 мин. Затем в центре сухой смеси делают лунку, вливают в нее воду, дают ей впитаться в течение 0,5 мин и перемешивают смесь в течение 1 мин.

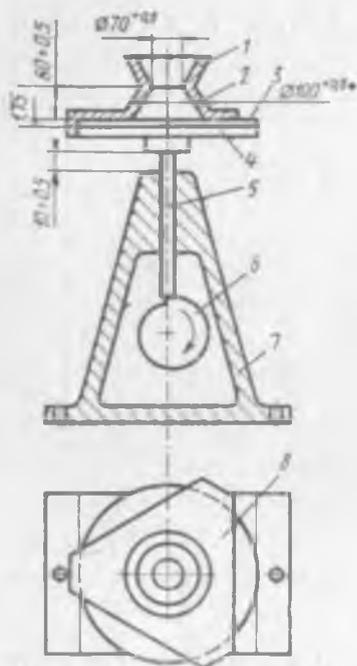


Рис. 1.2. Встряхивающий столик:

- 1 — насадка; 2 — форма-конус;  
3 — стеклянный диск; 4 — диск;  
5 — шток; 6 — кулачок; 7 —  
станина; 8 — центрирующее  
устройство

В центре диска встряхивающего столика (рис. 1.2) устанавливают форму-конус который заполняют раствором смеси до половины высоты и уплотняют 15 штыкованиями металлической штыковкой. Затем наполняют конус раствором смеси с небольшим избытком и штыкуют 10 раз. Избыток раствора смеси после уплотнения срезают ножом вровень с краями формы, затем ее снимают. Отформованный из раствора смеси конус встряхивают на столике 30 раз за  $(30 \pm 5)$  с, после чего измеряют диаметр его расплыва у основания в двух взаимно перпендикулярных направлениях и берут среднее значение.

**Определение удобоукладываемости бетонной смеси и подвижности растворной смеси.** Различают подвижные и жесткие бетонные смеси. Подвижность бетон-

ной смеси определяют согласно ГОСТ 10181.1—81 с помощью прибора — конуса (конус № 1 — для бетонных смесей с  $D_{\text{наиб}}$  — до 40 мм включительно, конус № 2 — для смесей с  $D_{\text{наиб}}$  — 70 и 100 мм) (рис. 1.3). Конус, предварительно смоченный изнутри, устанавливают на гладкий металлический лист размером не менее  $700 \times 700$  мм и заполняют бетонной смесью через воронку тремя равными по высоте слоями. При этом каждый уложенный слой уплотняется в конусе № 1 25-кратным, а в конусе № 2 56-кратным штыкованием металлическим стержнем диаметром 16 мм, длиной 600 мм с закругленными концами.

Во время наполнения и штыкования конус должен быть плотно прижат к листу. После уплотнения бетонной смеси в конусе воронку снимают и избыток смеси срезают вровень с верхними краями конуса. Затем конус плавно в течение 3..7 с снимают с отформованной бетонной смеси и устанавливают рядом с ней. Осадку конуса бетонной смеси определяют, укладывая металлическую линейку ребром на верх конуса и измеряя рас-

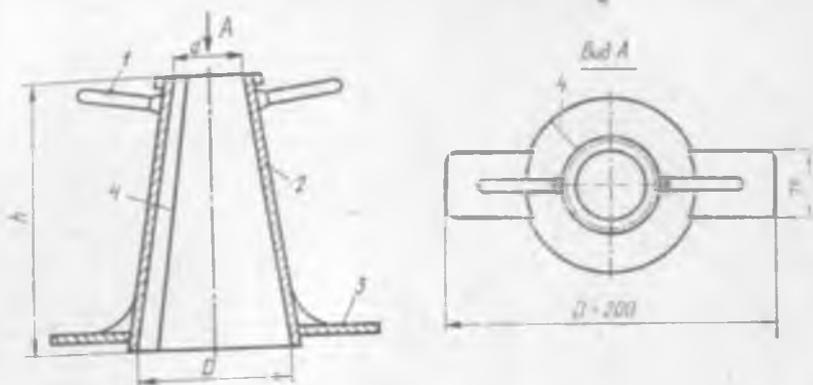


Рис. 1.3. Прибор конус для определения подвижности бетонной смеси:

1 — ручка; 2 — конус; 3 — упоры; 4 — сварной шов

стояние от нижней грани линейки до верха бетонной смеси с точностью до 0,5 см. Подвижность бетонной смеси оценивается величиной осадки конуса (см) как среднее арифметическое результатов двух определений, отличающихся между собой не более чем: на 2 см при  $OK \leq 8$  см и на 3 см при  $OK \geq 9$  см. Если осадка конуса равна нулю, то удобоукладываемость бетонной смеси характеризуется жесткостью.

Жесткость бетонной смеси оценивается временем вибрирования (с), необходимым для выравнивания и уплотнения предварительно отформованного конуса бетонной смеси в приборе для определения жесткости (рис. 1.4). Для определения жесткости бетонной смеси прибор помещают на виброплощадку и собирают его. Устанавливают и жестко закрепляют цилиндрическое кольцо прибора 1, в которое вставляют конус 3 и закрепляют его ручками 2, заводя их в пазы кольца, после чего устанавливают воронку 4. Заполнение конуса прибора бетонной смесью, уплотнение ее и снятие конуса с отформованной смеси производят так же, как описано выше. На поверхность отформованного конуса из бетонной смеси по-

воротом штатива 9 устанавливают диск 7. Штатив закрепляют в фиксирующей втулке 10 зажимным винтом.

Затем одновременно включают виброплощадку и секундомер и вибрируют до тех пор, пока не начнется вы-

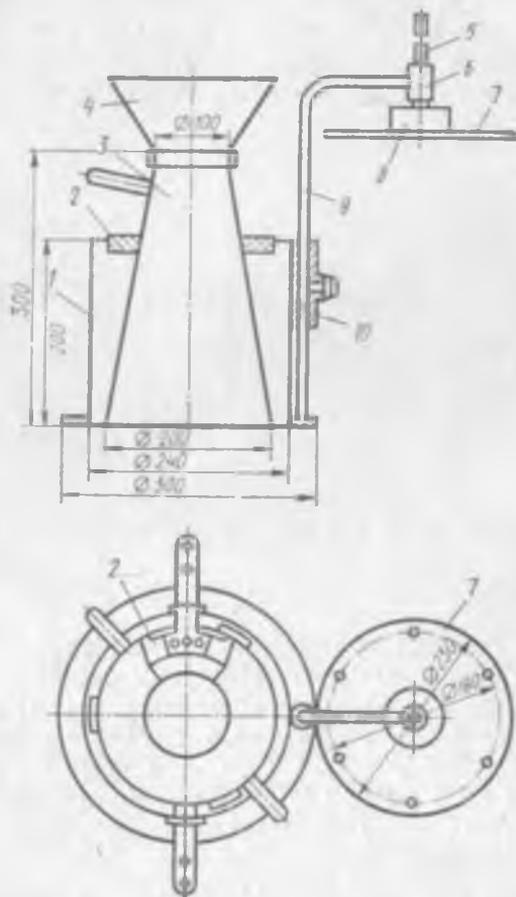


Рис. 1.4. Прибор для определения жесткости бетонной смеси:

1 — кольцо с фальцем в основании; 2 — кольцо-держатель с ручками; 3 — конус; 4 — загрузочная воронка; 5 — штанга; 6 — направляющая втулка; 7 — диск с шестью отверстиями; 8 — шайба; 9 — штатив; 10 — фиксирующая втулка с зажимным винтом

деление цементного теста из любых двух отверстий диска. Одновременно выключают секундомер и виброплощадку. Полученное время характеризует жесткость бетонной смеси. Ее вычисляют с точностью до 1 с как среднее арифметическое результатов двух определений.

Для определения жесткости бетонной смеси допускается использовать технический вискозиметр по ГОСТ 10181—62, показатели жесткости на котором в 4 раза больше, чем при определении жесткости бетонной смеси на стандартном приборе по ГОСТ 10181.1—81.

По показателям подвижности и жесткости бетонные смеси делятся на несколько категорий (табл. 1.2).

Таблица 1.2. Классификация бетонных смесей по жесткости и подвижности

Обозначения показателей смеси	Жесткость Ж, с		Подвижность П, см
	по ГОСТ 10181.1—81	по ГОСТ 10181—62	
Ж <sub>0</sub>	> 31	> 120	—
Ж <sub>1</sub>	30 ... 21	120 ... 80	—
Ж <sub>2</sub>	20 ... 11	80 ... 40	—
Ж <sub>3</sub>	10 ... 5	40 ... 20	—
П <sub>1</sub>	—	—	1 ... 4
П <sub>2</sub>	—	—	5 ... 9
П <sub>3</sub>	—	—	10 ... 15
П <sub>4</sub>	—	—	16

Подвижность растворной смеси определяют с помощью прибора с эталонным конусом (рис. 1.5). Растворную смесь в количестве 3...5 л помещают в сосуд до уровня примерно на 1 см ниже его края. Ее штыкуют 25 раз стержнем диаметром 10...12 мм и сосуд встряхивают 5...6 раз легким постукиванием о стол; затем сосуд устанавливают под конус, который приводят в соприкосновение с поверхностью растворной смеси. Опустив зажимный винт, дают конусу свободно погружаться в растворную смесь в течение 10 с, после чего закрепляют передвижной стержень с конусом и на шкале производят отсчет с точностью до 0,2 см. Величина подвижности растворной смеси (см) принимается как среднее арифметическое результатов двух испытаний.

**Определение жесткости силикато-бетонных смесей.** Жесткость силикато-бетонной смеси (Ж) характеризуется временем вибрирования (с), необходимым для полного уплотнения бетонной смеси, уложенной в цилиндре прибора для определения жесткости (рис. 1.6). Уплотнение бетонной смеси в приборе производят на лабораторной виброплощадке типа 435 А, которая с жестко закрепленным на ней прибором без бетонной смеси имеет амплитуду 0,5 мм и частоту 3000 кол/мин. Цилиндр прибора, изготовленный из листовой стали, имеет внутри

гладкую поверхность со степенью шероховатости не более 40 мкм. Общая масса диска 1 и штанги 2 со стрелкой-указателем 3 должна составлять  $(1750 \pm 50)$  г. Для определения жесткости силикато-бетонной смеси вначале протирают влажной тканью все поверхности прибора,

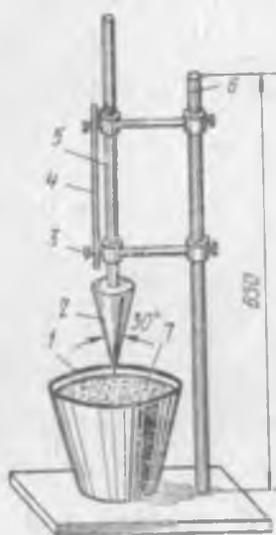


Рис. 1.5. Прибор для определения подвижности растворной смеси:

1 — сосуд для раствора; 2 — конус; 3 — держатель; 4 — шкала; 5 — скользящий стержень; 6 — штатив; 7 — раствор

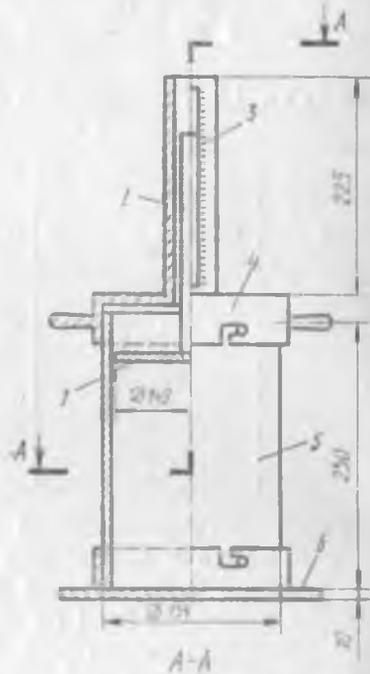
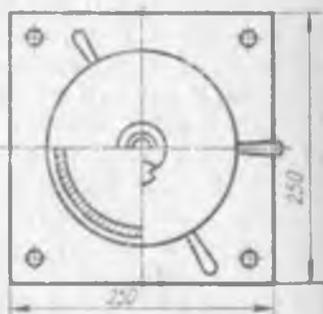


Рис. 1.6. Прибор для определения жесткости силикато-песчаной бетонной смеси:

1 — диск; 2 — штанга; 3 — стрелка; 4 — крышка; 5 — цилиндр; 6 — плита



соприкасающиеся с бетонной смесью, затем его устанавливают на виброплощадку и жестко закрепляют опорную плиту 6, на которой монтируют цилиндр 5. Цилиндр заполняют бетонной смесью путем свободного засыпания ее с высоты, равной 1...5 см, избыток смеси срезают металлической линейкой вровень с верхними краями

цилиндра. На уложенную в цилиндре смесь устанавливают диск прибора со штангой 2, проходящей через крышку 4, затем крышку закрепляют на цилиндре. После этого одновременно включают виброплощадку и секундомер и наблюдают за уплотнением (оседанием) смеси в цилиндре по перемещению стрелки-указателя 3 в прорези вертикальной части крышки прибора. Бетонную смесь вибрируют в цилиндре до полного ее уплотнения, которое определяется прекращением перемещения стрелки-указателя. В момент полного уплотнения смеси выключают виброплощадку и секундомер. Время от начала до конца уплотнения (с) характеризует жесткость силикато-бетонной смеси.

**Корректирование удобоукладываемости бетонной смеси.** Если подвижная бетонная смесь имеет осадку конуса меньше заданной, то в нее добавляют воду порциями, составляющими 2..3% от заданного количества. Изменение осадки конуса на 1 см требует 2..4 л воды на 1 м<sup>3</sup> бетона. Чтобы сохранить принятое водоцементное отношение, добавляют соответствующее количество цемента и производят повторное определение подвижности бетонной смеси. Если бетонная смесь имеет избыточную подвижность по сравнению с требуемой, в замес добавляют песок и крупный заполнитель, сохраняя заданное по расчету соотношение между ними. Заполнители добавляют порциями по 3..5% от их массы и производят повторное определение подвижности.

Корректирование удобоукладываемости жесткой бетонной смеси производится так же, как и подвижной смеси. Только для каждого нового определения (во избежание искажения результатов от повторного вибрирования) берется вновь приготовленная порция бетонной смеси.

**Изготовление образцов.** Изготовление образцов-кубов осуществляют в соответствии с ГОСТ 10180—78. Размер образца-куба зависит от максимального размера зерен крупного заполнителя в бетоне. Для испытаний бетона с наибольшим размером зерен заполнителя 20 и 40 мм наименьшие ребра куба должны составлять 100 и 150 мм. Перед изготовлением образцов внутренние поверхности форм покрывают тонким слоем смазки. Смазка для форм не должна вступать в химическое взаимодействие с бетонной смесью и бетоном и оставлять следы на его поверхности.

Укладку и уплотнение бетонной смеси в формах производят следующим образом: 1) при изготовлении образцов из бетонной смеси жесткостью более 20 с на

$V$ , дм <sup>3</sup>	1	3	8	27
$D_{\text{наб.}}$ , мм	≤ 20	40	70	≥ 100

Среднюю плотность бетона (кг/м<sup>3</sup>) определяют с погрешностью до 1 кг/м<sup>3</sup>:

$$\rho_6 = 1000m/V, \quad (1.5)$$

где  $m$  — масса образца, г;  $V$  — объем образца, см<sup>3</sup>.

Массу измеряют с погрешностью не более 0,1%, а объем — не более 1% при температуре в помещении  $t = (25 \pm 10)^\circ\text{C}$ . Для образцов правильной формы объем образца вычисляют по данным измерений геометрических размеров с погрешностью до  $\pm 1\%$ . При определении объема на образцах неправильной формы их предварительно водонасыщают или парафинируют. Для этого подвешенный на нитке образец осторожно погружают в заполненный водой до сливной трубки объемомер и, взвешивая слившуюся воду, устанавливают ее объем  $V_n$ . Если испытанию подвергали водонасыщенный образец, то  $V_0 = V_n$ , если парафинированный — то его объем (см<sup>3</sup>)

$$V_0 = V_n - (m_n - m_c)\rho_n, \quad (1.6)$$

где  $m_n$ ,  $m_c$  — масса образца соответственно после и до парафинирования, г;  $\rho_n$  — плотность парафина, равная 0,93 г/см<sup>3</sup>.

Для парафинирования высушенный образец нагревают до  $60^\circ\text{C}$  и погружают в расплавленный парафин. Толщина слоя парафина должна составлять примерно 1 мм. Крупные дефекты на образце предварительно парафинируют с помощью кисточки.

Определение влажности согласно ГОСТ 12730.2—78 осуществляют на тех же образцах с теми же требованиями по измерениям, что и для  $\rho_6$ . Высушивают либо целые образцы, либо дробленые пробы при  $t = (105 \pm 5)^\circ\text{C}$  до постоянной массы  $m_c$  (разность массы через 3 ч высушивания не более 1%). Влажность определяют по массе  $W_m$  или по объему  $W_o$  (%):

$$W_m = 100(m_n - m_c)/m_c; \quad W_o = W_m \rho_6 / \rho_n, \quad (1.7)$$

где  $m_n$ ,  $m_c$  — масса проб (образца) бетона до и после сушки, г;  $\rho_n$  — плотность воды, принимается 1 г/см<sup>3</sup>;  $\rho_6$  — плотность сухого бетона, г/см<sup>3</sup>.

**Определение истинной плотности бетона.** Истинную плотность определяют на образцах бетона, измельченного до кусков размером  $\leq 2$  мм. После усреднения навеску с массой  $\geq 200$  г размельчают снова и просеивают через сито № 008, высушивают и делят на две пробы для параллельных опытов.

При использовании прибора Ле Шателье он заполняется обезвоженным керосином до нижней нулевой черты, затем протирают тампоном из фильтровальной бумаги стекло выше уровня керосина. Навеску  $m = 50$  г осторожно всыпают через воронку в прибор до тех пор, пока уровень керосина не поднимется до делений в пределах верхней градуированной части прибора.

Для удаления воздуха прибор поворачивают в течение 10 мин вокруг его вертикальной оси. После 10-минутной выдержки замеряют уровень  $V_1$ . Плотность бетона ( $\text{кг/м}^3$ )

$$\rho_6 = 1000m/V_1. \quad (1.8)$$

Для более точного определения плотности используют пикнометр вместимостью 100 мл. Для этого в промытый дистиллированной водой, спиртом и этиловым эфиром пикнометр, предварительно взвешенный и имеющий массу  $m_1$ , вливают дистиллированную воду и термостатируют при  $(20 \pm 0,1)^\circ\text{C}$ . После этого заполняют водой до уровня отметки и снова взвешивают, определяя массу  $m_4$ . Затем воду выливают, пикнометр просушивают и заполняют порошком пробы примерно на половину объема, определяя массу пикнометра с пробой  $m_2$ . После этого в пикнометр доливают керосин на 3...5 мм выше уровня навески бетона и удаляют воздушные пузырьки, подключив пикнометр к вакуум-насосу на 30 мин. Затем пикнометр полностью заполняют керосином, термостатируют при  $t = (20 \pm 0,1)^\circ\text{C}$  и, установив уровень керосина на отметке, взвешивают —  $m_3$ . Плотность бетона ( $\text{кг/м}^3$ )

$$\rho_6 = 1000(m_2 - m_1)/[(m_4 - m_1) - (m_3 - m_2)x], \quad (1.9)$$

где  $x = 1/\rho_k$ ;  $\rho_k$  — плотность керосина,  $\text{г/м}^3$ .

Значение  $\rho_6$  определяют из двух измерений, разница между результатами не должна превышать  $5 \text{ кг/м}^3$ .

**Определение показателей пористости бетона.** Полный объем пор бетона  $\Pi_n$  (%) определяют согласно ГОСТ 12730.4—78 с погрешностью до  $0,1\%$  по формуле

$$\Pi_n = 100(\rho_6 - \rho_0)/\rho_6, \quad (1.10)$$

где  $\rho_6$  — плотность измельченного в порошок бетона, определенная по методике, изложенной выше,  $\text{кг/м}^3$ ;  
 $\rho_0$  — плотность сухого бетона,  $\text{кг/м}^3$ .

Объем открытых капиллярных пор бетона  $\Pi_0$  (%) согласно ГОСТ 12730.4—78 определяют по формуле

$$\Pi_0 = W_0, \quad (1.11)$$

где  $W_0$  — объемное водопоглощение бетона, % (ГОСТ 12730.3—78).

Объем открытых некапиллярных пор бетона  $\Pi_{нз}$  (% по объему) определяют на образцах правильной или неправильной формы. Для этого после насыщения в воде в течение 24 ч образцы устанавливают на решетке и после 10-минутного выдерживания определяют с помощью объемомера их объем по ГОСТ 12730.1—78 (без предварительного высушивания и парафинирования) по формуле

$$\Pi_{нз} = 100(V_1 - V)V, \quad (1.12)$$

где  $V$ ,  $V_1$  — объем образца в сухом и водонасыщенном состоянии соответственно,  $\text{см}^3$ .

Объем условно закрытых пор бетона  $\Pi_z$  (% по объему) согласно ГОСТ 12730.4—78 определяют по формуле

$$\Pi_z = \Pi_n - \Pi_0 - \Pi_{нз}. \quad (1.13)$$

**Определение водопоглощения, сорбционной и десорбционной влажности.** Водопоглощение бетона (ГОСТ 12730.3—78) определяют на таких же образцах, как и при определении влажности. Образцы помещают в сосуд с водой так, чтобы она покрыла их слоем высотой в 5 см. Массу измеряют на обычных или гидростатических весах через каждые сутки до тех пор пока прирост ее не станет менее 0,1% первоначальной массы. Образцы насыщают водой после высушивания или в естественном состоянии. В последнем случае высушивание осуществляют после завершения водопоглощения. Водопоглощение определяют по массе  $W'_н$  или по объему  $W'_0$  с погрешностью до 0,1% по формулам

$$W'_н = 100(m_n - m_c)/m_c, \quad W'_0 = W'_н \rho_0 / \rho_n, \quad (1.14)$$

где  $m_n$  и  $m_c$  — массы водонасыщенного и сухого образцов, г;  $\rho_0$  — плотность сухого бетона,  $\text{кг/м}^3$ ;  $\rho_n$  — плотность воды, равная  $1 \text{ г/см}^3$ .

Водопоглощение легких бетонов со средней плотностью менее  $1500 \text{ кг/м}^3$ , применяемых для ограждающих

конструкций, определяют по ГОСТ 7025—78. Образцы насыщают водой перед высушиванием. Вода должна покрывать образцы слоем 2...10 см.

Сорбционную влажность тяжелого бетона, бетона на пористых заполнителях и силикатного бетона определяют, измеряя водопоглощение бетона за счет поглощения паров воды из воздуха. При этом массу пробы тяжелого бетона и бетона на пористых заполнителях в зависимости от наибольшего размера зерен заполнителя принимают по табл. 1.3.

Таблица 1.3. Масса бетона в зависимости от размера зерен

$D_{\text{наиб}}$ заполнителя, мм	Масса пробы, г
До 20	100
40	200
Более 40	500

Образцы с указанной массой высушивают до постоянной массы. Перед высушиванием их раскалывают на 3...4 куска. После этого стаканчики с образцами помещают в эксикатор с насыщенным раствором соли при  $t = (20 \pm 2)^\circ\text{C}$ . Выбор раствора соли зависит от заданной относительной влажности воздуха, которая равна для NaCl — 75,5%; для KCl — 86,5%; для  $\text{KNO}_3$  — 95%; для  $\text{K}_2\text{SO}_4$  — 97%; для  $\text{H}_2\text{O}$  — 98%.

Взвешивание производят один раз в неделю до приобретения образцами постоянной массы. Вычисляют сорбционную влажность  $W_{\text{с-ф}}^{\text{с}}$  (% по массе) или  $W_{\text{с-ф}}^{\text{с}}$  (% по объему) по формулам (1.7). При расчете индекс  $\phi$  заменяют значением его относительной влажности, при которой проводились испытания.

Десорбционную влажность находят по методике определения  $W_{\text{с-ф}}^{\text{с}}$  с тем отличием, что образцы помещают в эксикатор с естественной влажностью, а высушивание до постоянной массы проводят после ее стабилизации.

Определение капиллярного всасывания. Капиллярное всасывание можно осуществлять на приборе, показанном на рис. 1.7. Цилиндрический образец помещают в корпус прибора, закрывают крышкой и стягивают болтами. Открыв кран, дают воде возможность, заполнив пространство перед образцом через колено, заполнить капилляр, ось которого совпадает с осью образца. После того как вода начнет выливаться из цилиндра, кран закрывают и по перемещению мениска воды измеряют ка-

пиллярное всасывание во времени. В приборе предусмотрена полуавтоматическая запись с помощью самонаписца ЭПП-09, резистора и токосъемника с указателем.

**Определение водонасыщения бетона под вакуумом под давлением.** Водонасыщение бетона можно определять под вакуумом. Образцы помещают в сосуд вакуумной установки и заливают полностью водой. После этого закрывают сосуд, доводят в нем разряжение до 2,7 кПа

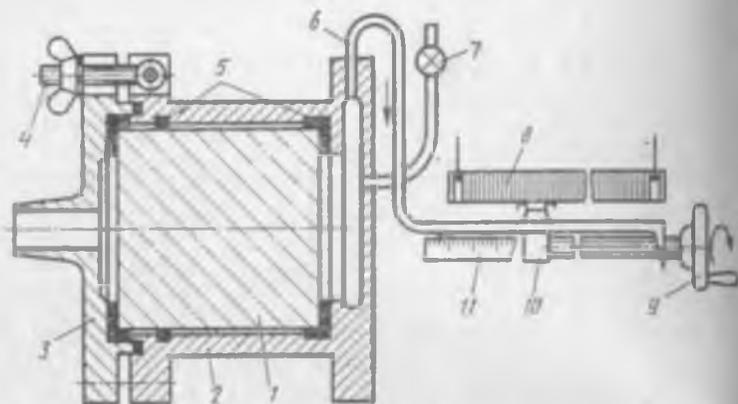


Рис. 1.7. Схема прибора для капиллярного всасывания:

1 — бетонный цилиндр; 2 — корпус; 3 — крышка; 4 — откидной болт; 5 — резиновая прокладка; 6 — капилляр; 7 — пробковый кран; 8 — резистор; 9 — маховик; 10 — указатель с токосъемником; 11 — шкала

выдерживают образцы в течение 3 ч. Для удобства насыщение следует производить в стеклянном сосуде. В этом случае возникает возможность наблюдать окончание выделения пузырьков воздуха из образцов.

Водонасыщение также определяют под давлением. Для этого можно использовать образцы, испытывавшиеся на водонепроницаемость. Сразу же после окончания испытания на водонепроницаемость образцы помещают в ванну с водой, в которой выдерживают до постоянной массы. Расчет водонасыщения осуществляют по формуле (1.7). Разность между водопоглощением и водонасыщением характеризует «условно-замкнутые» или «резервные» поры.

**Определение водонепроницаемости бетона и коэффициента фильтрации.** Водонепроницаемость характеризуется наибольшим давлением воды, при котором еще наблюдается ее просачивание через образцы-цилиндры диаметром, равным высоте, т. е.  $D=H=150$  мм

(ГОСТ 12730.5—78). Изготовленные образцы хранят в камере нормального твердения, а перед испытанием выдерживают сутки на воздухе. После этого их помещают в металлические цилиндрические формы с  $D_{\text{внутр}}=155$  мм,  $H=150$  мм. Зазор между образцом и формой заливают расплавленным уплотняющим составом (битумом, парафином), предварительно разогрев форму. Торцы образцов зачищают стальной щеткой. Подготовленные образцы устанавливают в испытательный прибор, с помощью которого к нижней поверхности образца подводится под заданным давлением вода. Наблюдая за верхней поверхностью, фиксируют момент начала подсачивания воды через бетон. Испытания начинают при давлении 0,1 МПа, повышая его по 0,1 МПа каждые 8 ч. По давлению, при котором на поверхностях четырех из шести образцов еще не фиксируется просачивающаяся через бетон вода, оценивают водонепроницаемость бетона. По водонепроницаемости бетоны делят на следующие классы:

Класс бетона	B2	B4	B6	B8	B10	B12
Давление, МПа	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0	1,2

Оценка водонепроницаемости по классам не позволяет количественно оценить фильтрационные свойства бетонов, необходимые, например, при изучении его коррозионной стойкости. Поэтому определяют еще коэффициент фильтрации воды  $K_f$ .

Согласно ГОСТ 19426—74, изготавливают бетонные образцы-цилиндры с  $D=150$  мм и высотой, зависящей от крупности заполнителя ( $H$  не менее 50, 100 и 150 мм при максимальной крупности заполнителя соответственно 10, 20 и 30 мм).

Образцы можно испытывать в водонасыщенном состоянии и при равновесной влажности. Подготовленные к испытаниям образцы крепят в металлических обоймах по одному из четырех вариантов, указанных на рис. 1.8. При использовании для крепления колец боковую поверхность образцов покрывают слоем смазки; давление в полости резиновой камеры должно в 1,5 раза превышать давление воды; для приклейки конических образцов используют эпоксидный клей. Перед испытанием проверяют надежность герметизации, пропуская воздух или инертный газ при давлении 0,1...0,3 МПа. Затем образ-

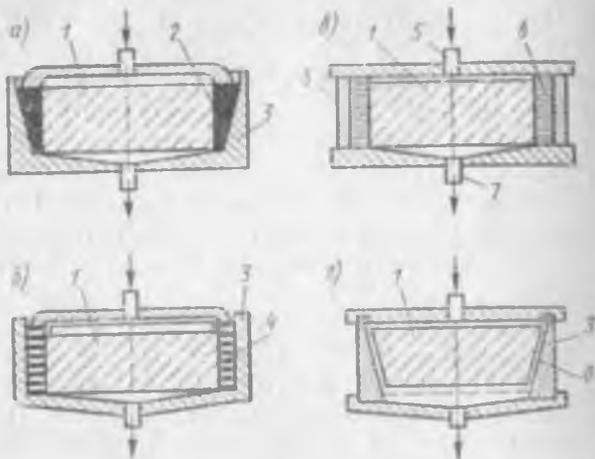


Рис. 1.8. Схемы крепления образцов:

а — заливка мастикой зазора между образцом и обоймой; б — установка образцов с помощью резиновых и металлических колец; в — уплотнение резиновой камерой с избыточным давлением; г — приклеивание образца-конуса к обойме; 1 — образец; 2 — мастика; 3 — испытательное гнездо; 4 — набор резиновых и металлических колец; 5 — патрубок подачи воды под давлением; 6 — половина резиновой камеры; 7 — патрубок для сбора фильтрата; 8 — слой клея

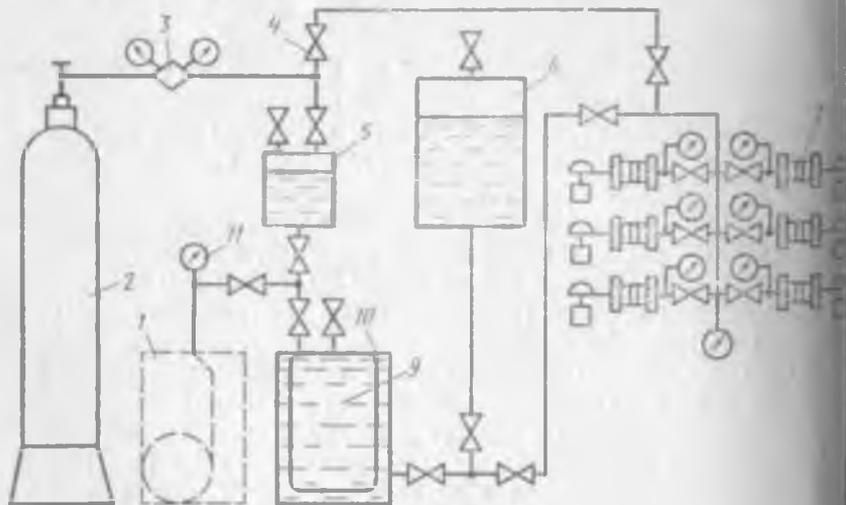


Рис. 1.9. Схема установки для определения коэффициента фильтрации воды:

1 — насос; 2 — баллон с газом; 3 — редуктор; 4 — вентиль; 5 — передатчик давления; 6, 10 — емкости с водой; 7 — испытательное гнездо; 8 — измеритель количества фильтрата; 9 — эластичная емкость с деаэрированной водой; 11 — манометр

цы закрепляют в поворотных гнездах установки (рис. 1.9) и к их торцевой поверхности подают воду. Установка должна позволять собирать профильтрованную воду, не допуская ее испарения. Вода, используемая для испытания, должна быть деаэрирована и не содержать агрессивных и других примесей. Давление увеличивают ступенями по 0,1 МПа с выдержкой по 1 ч. Подъем давления прекращают при появлении фильтрата; при этом давлении определяют  $K_{\phi}$ .

Для каждого образца необходимо измерить количество профильтровавшейся воды не менее чем шесть раз — у образцов, испытываемых с равновесной влажностью, первое измерение производят не ранее чем через 1 ч после начала фильтрации. В этом случае прирост количества профильтровавшейся воды при трех измерениях с интервалом 30 мин не должен превышать 20%. Дальнейшие замеры производят каждые 30 мин. У образцов, испытываемых в водонасыщенном состоянии, первое измерение производят не ранее 4 сут после начала фильтрации при условии установления стационарного потока. Измерения производят через равные промежутки времени, за которые объем фильтрации будет не менее 1 см<sup>3</sup>. Поток считают стационарным, если разница из четырех последовательных измерений не превышает 20%. Количество фильтрата  $Q$  для одного образца рассчитывают как среднее арифметическое пяти замеров. Если при максимальном давлении 1,3 МПа не наблюдается фильтрации в течение 96 ч для бетона при равновесной влажности и 240 ч в водонасыщенном состоянии, испытание прекращают.

Количество фильтрата определяют массовым или объемным способом, собирая воду, прошедшую через образец. При испытании особо плотных бетонов количество влаги определяют по приросту массы силикагеля, который в закрытом сосуде помещают под бетонным образцом.

Значение  $K_{\phi}$  (см/с) рассчитывают по формуле

$$K_{\phi} = \eta [Q^2 / (S \tau \Delta p)] K, \quad (1.15)$$

где  $\eta$  — коэффициент, учитывающий вязкость воды при различной температуре:

$T, ^\circ\text{C}$	1	5	10	15	20	25	30
$\eta$	1,72	1,51	1,30	1,13	1,0	0,89	0,80

$\delta$  — толщина образца, см;  $S$  — площадь образца, см<sup>2</sup>;  $t$  — время, в течение которого измеряется объем фильтрата, с;  $\Delta p = p_1 - p_2 = 100$  Па — разность давлений на входе  $p_1$  и выходе  $p_2$  из образца ( $p_1$  принимают равным избыточному давлению в системе установки, а  $p_2 = 0$  — при условии свободного истечения фильтрата с поверхности образца);  $K$  — коэффициент, учитывающий влияние диаметра образца:

$D$ , мм	150	130	120	100	80	50
$K$	1,0	1,1	1,4	1,8	2,5	5,5

Полученные значения  $K_\phi$  для серии образцов записывают в возрастающем порядке и вычисляют его значение для серии как среднеарифметическое результатов определения для третьего и четвертого образцов.

**Испытание образцов.** При испытании бетона на сжатие определяют следующие две характеристики: заданную прочность на сжатие на образцах-кубах с размером ребра 70, 100, 150, 200, 300 мм или образцах-цилиндрах диаметром 70, 100, 150, 200, 300 мм и высотой  $H = 2D$  и призмennую прочность на образцах-призмах с размерами  $100 \times 100 \times 400$  и  $150 \times 150 \times 600$  мм.

Испытание образцов на осевое сжатие осуществляют на прессах, которые выбирают с учетом следующих требований: ожидаемая разрушающая нагрузка должна составлять 0,2...0,8 от максимального усилия  $P_{\max}$ , соответствующего выбранному диапазону измерения; не допускается использовать участки шкалы менее 0,2  $P_{\max}$  и испытание силой меньше 10% от  $P_{\max}$ .

Перед испытанием образцы осматривают, измеряют их размеры с погрешностью  $\pm 1\%$  и взвешивают. В случае необходимости для тяжелого бетона класса В7,5 допускается шлифование граней или их выравнивание слоем толщиной до 2 мм из быстротвердеющих составов с прочностью не менее половины ожидаемой прочности образца. При испытании образец укладывают на нижнюю опорную плиту пресса боковыми поверхностями. Напряжение в образце при нагружении должно возрастать непрерывно с постоянной скоростью ( $0,6 \pm \pm 0,2$ ) МПа/с до его разрушения.

Прочность бетона на сжатие вычисляют для каждого образца с точностью до 0,1 МПа:

$$R_0 = \alpha (P/S) K_\phi, \quad (1.16)$$

Таблица 1.4. Значение коэффициента  $\alpha$ 

Форма образца	Куб					Цилиндр			
	70,07	100	150	200	300	70× 140	100× 200	150× 300	200× 400
Размер образца, мм: ребра $H \times D$									
$\alpha$	0,85	0,91	1,0	1,05	1,1	1,16	1,16	1,2	1,24

где  $\alpha$  — масштабный коэффициент прочности бетона в образцах базового размера (табл. 1.4);  $P$  — разрушающая нагрузка, Н;  $S$  — средняя площадь рабочего сечения образца, см<sup>2</sup>.

Прочность бетона вычисляют как среднее арифметическое значение результатов испытаний трех образцов при условии, что наибольший и наименьший результаты отклоняются не более чем на 15% от среднего значения. Если эти условия не выполняются, то в качестве средней прочности принимают результат испытаний одного оставшегося образца.

Такой методикой испытаний (ГОСТ 10180—78\*) пользуются для всех видов бетонов на минеральных вяжущих и заполнителях. При испытании некоторых видов тяжелого и ячеистых бетонов необходимо учитывать их особенности, указанные в ГОСТ 10180—78\*.

Призмную прочность определяют по ГОСТ 10180—78\* и методике НИИЖБа. Перед началом испытаний призму центрируют на опорной плите прессы, устанавливают индикаторы и проводят измерения деформаций. Величина деформации по каждой из граней не должна отклоняться от среднего значения более чем на 10%.

После завершения центрирования образца по физической оси, приборы, установленные для измерения деформаций, снимают и начинают загрузку образца. Нагрузку увеличивают до конца разрушения ступенями по  $0,1 P_p$  с интервалами до 5 мин. Продолжительность испытания — не менее 20 мин.

Допускается загружать призмы непрерывно с равномерно возрастающей нагрузкой и постоянной скоростью роста напряжений [ $d\sigma/(dt) = \text{const}$ ]. В этом случае, так же как и при ступенчатом нагружении, [ $d\sigma/(dt) = 0,6 \pm 0,4$  МПа/с], а общая продолжительность испытания — такая же, как и при ступенчатом нагружении.

Определение фактического расхода составляющих материалов на 1 м<sup>3</sup> бетона. Сначала определяют среднюю плотность бетонной смеси при принятом режиме уплотнения, или по методике, изложенной выше, или упрощенным способом. Для этого взвешивают пустую форму, измеряют ее внутренние размеры, заполняют смесью, уплотняют и вновь взвешивают.

Плотность бетонной смеси (кг/м<sup>3</sup>)

$$\rho_{см} = (m - m_1) / V, \quad (1.17)$$

где  $m_1$ ,  $m$  — соответственно массы пустой и заполненной смесью формы;  $V$  — вместимость формы, дм<sup>3</sup>.

Затем по сумме масс материалов  $\Sigma M$ , израсходованных на пробный замес, и плотности бетонной смеси определяют фактический объем замеса:

$$V_s = \Sigma M / \rho_{см}, \quad (1.18)$$

Фактический расход материалов на 1 м<sup>3</sup> уплотненной бетонной смеси

$$\rho_{ф} = (\rho_s / V_s) 1000, \quad (1.19)$$

где  $\rho_{ф}$  — фактический расход материала, кг/м<sup>3</sup>;  $\rho_s$  — расход цемента на замес, кг;  $V_s$  — фактический объем замеса, дм<sup>3</sup>.

Расчет прочности бетона во времени. Пользуясь логарифмическим законом роста прочности бетона во времени, твердеющего в нормальных условиях, зная его первоначальную прочность (но не ранее чем через 3 сут), можно определить прочность бетона в возрасте 28 сут или в другие сроки его твердения:

$$R_n / R_{28} = \lg n / \lg 28, \quad (1.20)$$

где  $R_n$  — первоначальная прочность;  $\lg n$  — логарифмы времени (но не ранее 3 сут);  $R_{28}$  — прочность в возрасте 28 сут;  $\lg 28$  — логарифм 28 или времени, при котором определяется искомая прочность:

$$R_{28} = R_n \lg 28 / \lg n, \quad (1.21)$$

Получаемая прочность является весьма приближенной, так как формулой не учитываются ни действительные условия твердения, ни свойства цемента, ни другие факторы.

Определение объема вовлеченного воздуха в бетонной смеси. Объем вовлеченного воздуха, выражаемый в процентах к общему объему уплотненной бетонной смеси, характеризуется количеством замкнутых пор, содержащихся в ней; его определяют экспериментально или расчетом.

Для бетонных смесей на плотных и пористых заполнителях экспериментальное определение объема вовлеченного воздуха производится согласно ГОСТ 10181.3—81 объемным методом с помощью объемомера (рис. 1.10).

После определения средней плотности бетонной смеси ее извлекают из сосуда или формы и отбирают навеску массой  $m_{см}$  (г):

$$m_{см} = \rho_{см} V_{см}, \quad (1.22)$$

где  $\rho_{см}$  — средняя плотность бетонной смеси, г/см<sup>3</sup>;  $V_{см}$  — объем испытуемой смеси в уплотненном состоянии, принимаемый в 2,5 раза меньше объема цилиндрического сосуда объемомера, см<sup>3</sup>.

Навеску бетонной смеси помещают в цилиндрический сосуд объемомера и заливают в него отвешенное с погрешностью до 1 г количество воды примерно в 1,5...2 раза больше объема испытуемой смеси. Бетонную смесь с водой тщательно перемешивают металлическим стержнем в течение 2...3 мин, снимают образовавшуюся в сосуде пену и помещают в предварительно взвешенный стеклянный стакан вместимостью 100...200 мл. Перемешивание и отбор пены повторяют не менее двух раз, после чего устанавливают суммарную массу отобранной пены  $m_{п}$  с погрешностью до 1 г.

После снятия пены на сосуд накладывают пластину со стрелкой так, чтобы ограничители соприкасались со стенками сосуда. Затем небольшой струей из мерного стакана доливают в сосуд воду до тех пор, пока ее поверхность не придет в соприкосновение с острием стрелки, что фиксируется по моменту соприкосновения остря

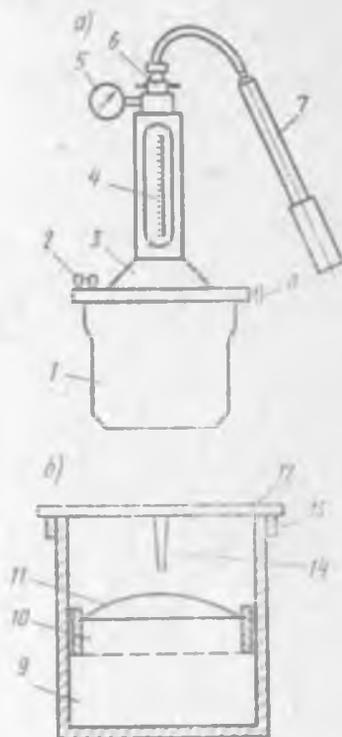


Рис. 1.10. Объемомер (а) и внутренний сосуд (б):

- 1 — сосуд; 2 — накидной болт;
- 3 — крышка; 4 — водомерная трубка; 5 — манометр; 6 — входной вентиль; 7 — ручной насос; 8 — сливной вентиль; 9 — цилиндрический сосуд; 10 — пригружающий пуансон; 11 — петля; 12 — металлическая пластина; 13 — ограничители; 14 — стрелка

стрелки с его отражением в воде. После этого путем взвешивания определяют суммарную массу залитой в сосуд воды с погрешностью до 1 г.

Объем вовлеченного воздуха в бетонной смеси вычисляется с погрешностью до 0,1%:

$$V_a = \frac{V_{см} + V - V_0 - 0,9m_n - \frac{nW_{щ}}{100} - \frac{\Pi V_{см}}{1000}}{V_{см}} \cdot 100, \quad (1.23)$$

где  $V_{см}$  — объем испытываемой бетонной смеси в уплотненном состоянии, см<sup>3</sup>;  $V$  — объем залитой воды, см<sup>3</sup>;  $V_0$  — постоянная объеммера, см<sup>3</sup>, устанавливаемая по приложению к ГОСТ 10181.3—81;  $m_n$  — масса, отобранная при испытании пены, г;  $n$  — коэффициент; для пористого гравия  $n=0,4$ ; для пористого щебня  $n=0,75$ ;  $W_{щ}$  — водопоглощение крупного пористого заполнителя за время от момента приготовления смеси до окончания испытания, % по массе;  $\Pi$  — содержание крупного пористого заполнителя в бетонной смеси, кг/м<sup>3</sup> (для бетонов на плотных заполнителях  $n$ ,  $W_{щ}$  и  $\Pi$  не учитывают).

Объем вовлеченного воздуха определяют как среднее арифметическое значение результатов двух определений из одной пробы бетонной смеси, отличающихся между собой не более чем на 20% от меньшего значения.

При расчетном способе объем вовлеченного воздуха в уплотненной бетонной смеси  $V_a$  вычисляют с погрешностью до 0,1%:

$$V_a = \left[ 1000 - \left( \frac{\Pi}{\rho_{щ}} + \frac{m}{\rho_n} + \frac{\Pi}{n\rho_{щ}} + V + V_1 \right) \right] / 100, \quad (1.24)$$

где  $\Pi$ ,  $m$ ,  $\Pi$ ,  $V$  и  $V_1$  — фактическая масса, кг, соответственно цемента, сухих песка и щебня (гравия), воды и раствора структурообразующей добавки на 1 м<sup>3</sup> уплотненной бетонной смеси;  $\rho_{щ}$ ,  $\rho_n$ ,  $\rho_{щ}$  — плотность цемента, зерен песка и щебня (гравия), кг/дм<sup>3</sup>, определяемая соответственно для цемента по ГОСТ 310.2—76\*, для плотных заполнителей по ГОСТ 8735—75 или 8269—76 и для пористых заполнителей в цементном тесте по ГОСТ 9158—76\*;  $n$  — коэффициент, учитывающий увеличение плотности зерен пористого заполнителя в результате его частичного дробления при перемешивании бетонной смеси; для пористых заполнителей с маркой по прочности П75 и более  $n=1,05$ ; с маркой по прочности менее П75  $n=1,1$ .

Определение фактического водоцементного отношения в бетонной смеси. Для определения фактического

водоцементного отношения в бетонной смеси необходимы следующие реактивы и растворы: азотная кислота (ГОСТ 5850—72); фенолфталеин — 1%-ный спиртовой раствор; хромат калия — 10%-ный раствор (ГОСТ 4233—77); хлорид натрия — 0,1 м раствор; нитрат серебра (ГОСТ 1277—75) — 0,1 н и титрованный раствор. Титр раствора устанавливается по хлориду натрия. Для этого отбирают 10 мл 0,1 н раствора хлорида натрия и титруют нитратом серебра с добавлением 1 мл 10%-ного раствора хромата натрия. Титр раствора серебра (Т), выраженный в мг·экв/мл NaCl, рассчитывают по формуле

$$T = 0,1V/V_1, \quad (1.25)$$

где  $V$  — количество 0,1 н раствора NaCl, взятое на титрование, мл;  $V_1$  — количество раствора AgNO<sub>3</sub>, израсходованное на титрование, мл.

Определение фактического водоцементного отношения в бетонной смеси [9] производится следующим образом. Сразу после приготовления бетонной смеси из нее отвешивают в фарфоровый стакан 2 кг смеси и приливают из пипетки 100 мл раствора хлорида натрия, титр которого предварительно точно установлен.

Смесь тщательно перемешивают фарфоровым шпателем в течение 30 с. Затем в бетонную смесь погружают прибор для отсасывания жидкости (рис. 1.11) и в течение 30 с производят отсос под вакуумом, для создания которого можно использовать бытовой пылесос. Из отсосанной жидкости отбирают пипеткой 5 мл жидкости и отливают ее в коническую колбу вместимостью 100 мл. Время с момента затворения бетонной смеси до отбора пробы не должно превышать 3 мин. В колбу приливают 20 мл дистиллированной воды, одну каплю раствора фенолфталеина и по каплям добавляют разбавленный раствор азотной кислоты до исчезновения окраски фенолфталеина. После нейтрализации раствора приливают 1 мл

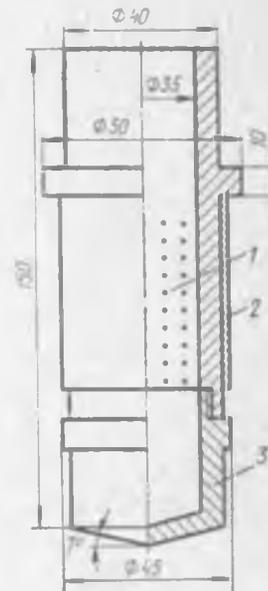


Рис. 1.11. Прибор для отсасывания жидкости:

1 — цилиндр с отверстиями; 2 — фильтр; 3 — нижний стакан

хромата калия и титруют раствором нитрата серебра до появления красноватой окраски.

На основании результатов двух-трех титрований рассчитывают концентрацию ( $C_2$ ) хлоридов в отобранном из бетонной смеси растворе:

$$C_2 = T V_3 / V, \quad (1.26)$$

где  $T$  — титр раствора  $AgNO_3$ , установленный по  $NaCl$  мг·эquiv/мл;  $V$  — объем раствора, отобранного из бетонной смеси, взятой на титрование, мл;  $V_3$  — объем раствора  $AgNO_3$ , израсходованный на титрование, мл.

После извлечения жидкости из бетонной смеси прибор для отбора пробы разбирают, моют, сушат, устанавливают чистый фильтр для новых испытаний. Бетонная смесь, отобранная для опыта, использованию не подлежит. Зная концентрацию хлоридов, можно вычислить фактическое содержание воды в бетонной смеси и водоцементное отношение. Для расчета исходят из соотношения

$$C_1 V_1 = C_2 V_2, \quad (1.27)$$

где  $C_1$  — концентрация раствора хлорида натрия, мг·эquiv/мл;  $V_1$  — объем раствора  $NaCl$ , введенный в бетон, мл;  $C_2$  — концентрация хлорида натрия в отобранном из бетона растворе, мг·эquiv/мл;  $V_2$  — общий объем жидкости в отвешенном количестве бетона после введения раствора  $NaCl$ , мл.

Так как

$$V_2 = V_1 + V_0, \quad (1.28)$$

где  $V_0$  — фактическое содержание жидкости (мл) в 2 кг бетонной смеси; остальные обозначения те же, что в формуле (1.27);

то подставив в уравнение (1.27) выражение (1.28), получим

$$C_1 V_1 = C_2 (V_1 + V_0), \quad (1.29)$$

откуда фактическое содержание воды в отобранной пробе

$$V_0 = V_1 (C_1 - C_2) / C_2. \quad (1.30)$$

Соотношение цемента в отобранной пробе (масса 2 кг) рассчитывают исходя из фактического состава бетона на  $1 \text{ м}^3$ .

Зная содержание цемента в отобранной пробе бетонной смеси и содержание в ней воды ( $V_0$ ), фактическое водоцементное отношение

$$W/U_{\text{факт}} = V_0 / U. \quad (1.31)$$

Продолжительность опыта не превышает 15 мин.

#### *1.4. Мероприятия по технике безопасности при выполнении лабораторных работ*

Лабораторные работы должны проводиться в соответствии с общими требованиями по технике безопасности, предъявляемыми СНиП 111-А.11—70 и изложенными в соответствующих инструкциях и указаниях к применяемым методам, приборам и оборудованию.

Испытательное оборудование должно быть исправно, вычищено и смазано. Электродвигатели, шкивы и другие виды передач должны быть ограждены защитными устройствами.

В процессе испытаний при проведении наблюдений за поверхностью образцов и установленными на них приборами следует применять сетки и другие ограждения для защиты от осколков при разрушении образцов. Применение ультразвуковых приборов требует соблюдения обычных правил работы с радиоэлектронной аппаратурой. При работе со смесительным оборудованием следует проверить надежность ограждений на всех открытых и движущихся его частях. Включение и выключение всех механизмов производится только ответственным по технике безопасности в лаборатории после того, как студенты отойдут от механизма.

При использовании рентгеновских и  $\gamma$ -излучений в радиометрических и дефектоскопических приборах необходимо строго выполнять основные санитарные правила работы с радиоактивными веществами и другими источниками ионизирующих излучений.

Стенд для натяжения арматуры должен быть закрыт предохранительной сеткой или щитами с прорезями для измерительных приборов. Контрольно-измерительные приборы устанавливаются на арматуру до ее натяжения. При натяжении арматуры необходимо убедиться в исправности анкеров и арматурных стержней и натяжных устройств. В торцах стенда необходимо установить защитные приспособления. Во время натяжения арматуры студенты и обслуживающий персонал должны находиться сбоку от домкрата. При электротермическом натяжении арматуры и при работе на других электроустановках следует соблюдать правила технической эксплуатации и безопасности обслуживания электроустановок промышленных предприятий.

Изложенные основные положения являются дополнением к имеющимся в лаборатории документам и инструкциям по охране труда.

**МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ К ЛАБОРАТОРНЫМ РАБОТАМ  
ПО РАЗДЕЛУ КУРСА  
«БЕТОНОВЕДЕНИЕ И ТЕХНОЛОГИЯ БЕТОНА»**

В современной технологии сборного железобетона применяются различные виды бетонов. Для получения бетонов высокого качества при минимальном расходе цемента необходимо знать их свойства и факторы, влияющие на них. Поэтому на соответствующие темы в практикуме приведены лабораторные работы № 1—8, 12. Дополнительно включены лабораторные работы № 9, 10, посвященные методам проектирования состава высокопрочных легких бетонов и пористых бетонов на пористых заполнителях, а также лабораторная работа № 11, в которой рассматривается метод проектирования состава бетонов с использованием структурных характеристик. Последнее позволяет более точно разрабатывать зависимости состав — структура — свойства.

Применение в лабораторных работах математических методов планирования эксперимента, с помощью которых можно учитывать большое количество факторов, влияющих на свойства бетонной смеси и бетона, дает возможность не только уточнить технологические расчеты, но и успешно управлять технологией и качеством бетона.

**2.1. Лабораторная работа № 1. Качественная оценка заполнителей по технологическим характеристикам**

**Цель работы.**

Определить технологические характеристики крупного и мелкого заполнителей и дать сравнительную оценку качества заполнителей по этим характеристикам.

**Введение.** Заполнители занимают в бетоне до 80% объема и оказывают значительное влияние на свойства бетона и его стоимость. Правильный выбор заполнителей для бетона — одна из важных задач технологии бетона. Все заполнители могут быть охарактеризованы едиными основными показателями качества, приведенными в соответствующих стандартах. Стандартные характеристики дают в основном качественную оценку заполнителя и отвечают на вопрос о пригодности данного заполнителя для бетона [2, 5]. Для оценки влияния заполнителей на свойства и экономичность бетона в общем случае необходимо знать влияние данного заполнителя на удобоукладываемость или водопотребность бетонной смеси, а также на прочность бетона при сжатии. Для такой оценки предложен способ испытания заполнителя непосредственно в бетоне [3], что обеспечивает получение наиболее достоверных данных. В результате такого испытания определяют две характеристики заполнителя

называемые технологическими: водопотребность песка или щебня (гравия) и их коэффициент прочности. Зная водопотребность заполнителей, можно определить две важнейшие характеристики бетона: истинное водоцементное отношение и объемную концентрацию цементного камня в бетоне, которые определяют основные свойства бетона и могут быть использованы при проектировании состава бетона [3].

**Содержание лабораторной работы.** Работа состоит из нескольких заданий, каждое из которых выполняется одним звеном. Звено проводит испытания одного вида мелкого и одного вида крупного заполнителей. В каждом задании песок отличается зерновым составом и модулем крупности, крупный заполнитель — зерновым составом и наибольшей крупностью. Звенья определяют модуль крупности песка, наибольшую крупность щебня (гравия) и выполняют исследования по определению водопотребности и коэффициента прочности заполнителей [3]. Работа рассчитана на 3 ч.

**Указания по проведению лабораторной работы.**  
1. Для определения модуля крупности песка производят зерновой рассев песка и рассчитывают частные и полные остатки, а также модуль крупности песка  $M_{кр}$  по методике, приведенной в § 1.3. Результаты испытаний заносят в табл. 2.1.

Таблица 2.1. Результаты определения зернового состава песка

Показатели	Размер отверстий сит, мм						Проход сквозь сито № 0,14
	5	2,5	1,25	0,63	0,315	0,14	
Остатки на ситах, г:							
частные, %							
полные, %							
Модуль крупности песка	$M_{кр} =$						

2. Для определения крупности  $D_{наиб}$  и  $D_{наим}$  щебня (гравия) делают зерновой рассев пробы заполнителя, рассчитывают частные и полные остатки. По полным остаткам определяют наибольшую и наименьшую крупность щебня (гравия) по методике, приведенной в § 1.3. Результаты испытаний заносят в табл. 2.2.

Таблица 22. Результаты определения зернового состава щебня (гравия)

№ зва-на	Остатки на ситах	Размер отверстий сит, мм					Прошло через сито 3 мм	D <sub>норм</sub>	D <sub>норм</sub>
		70	40	20	10	5			
1	В г: частные, % полные, %								
и т. д.									

3. Водопотребность песка находят следующим образом:

а) 900 г цемента перемешивают с водой в течение 5 мин, а затем на встряхивающем столике определяют распыл цементного теста при водоцементном отношении, соответствующем его нормальной густоте (ГОСТ 310.4—81; см. выше § 1.3.); б) подбирают  $(В/Ц)_р$ , при котором раствор состава 1:2 (по массе) на исследуемом песке имеет такой же распыл конуса. Для этого перемешивают в течение 1 мин всухую и 5 мин с водой 300 г цемента и 600 г песка, после чего по стандартной методике определяют распыл конуса

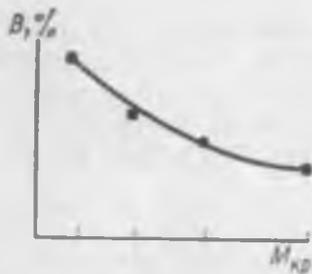


Рис. 2.1. Изменение водопотребности смеси в зависимости от крупности песка

(см. § 1.3).

Водопотребность песка (%).

$$V_{II} = \frac{(В/Ц)_р - (В/Ц)_н}{2} 100. \quad (2.1)$$

Результаты определения водопотребности различных песков представляют в виде графика (рис. 2.1).

4. Водопотребность крупного заполнителя определяют в следующем порядке: а) измеряют осадку конуса растворной смеси состава 1:2 при водоцементном отношении  $(В/Ц)_р$ , определенном ранее. Для этого 5 кг цемента и 10 кг песка перемешивают вначале 1 мин всухую, а затем 5 мин с водой, количество которой устанавливают в соответствии с  $(В/Ц)_р$ . После этого определяют

ют подвижность раствора стандартным методом (см. § 1.3); б) подбирают водоцементное отношение  $(B/C)_6$ , при котором достигается та же осадка конуса бетонной смеси состава 1:2:3,5 (цемент:песок:щебень), что и для раствора, указанного в п. «а». Для этого 2,5 кг цемента, 5,0 кг песка и 8,75 кг щебня (гравия) перемешивают 1 мин всухую и 5 мин с водой, а затем определяют подвижность бетонной смеси (осадку конуса) стандартным способом.

Для заполнителей с высоким водопоглощением рекомендуется проводить испытание дважды: сразу после изготовления замеса и через 30 мин. При втором испытании одинаковая подвижность смеси достигается добавлением воды. Между первым и вторым испытаниями замес предохраняют от высыхания, например укрывая смесь влажной тканью.

Водопотребность щебня (гравия) (%) вычисляют по формуле

$$B_{\text{ш(гр)}} = \frac{(B/C)_6 - (B/C)_p}{3,5} 100, \quad (2.2)$$

где 3,5 — количество частей щебня, приходящихся на 1 ч. цемента.

5. После корректирования подвижности из растворной и бетонной смеси изготавливают эталонные образцы кубы, которые испытывают в возрасте 28 сут. После испытания эталонных растворных и бетонных кубов определяют коэффициенты прочности, ориентировочно характеризующие влияние песка и щебня (гравия) на прочность раствора и бетона:

для песка

$$A_{\text{п}} = A_p = R_p / [(C/B)_p - 0,5]; \quad (2.3)$$

для щебня

$$A_{\text{ш}} = A_6 = R_6 / [(C/B)_6 - 0,5]. \quad (2.4)$$

Полученные результаты испытаний всех звеньев вносят в таблицы 2.3 и 2.4.

Значения коэффициентов  $A_6$  целесообразно использовать в дальнейшем при расчете состава бетона. По результатам испытаний всех звеньев делают сравнительную оценку качества заполнителей по технологическим характеристикам и общие выводы с анализом результатов испытаний.

Таблица 2.3. Характеристики песков

№ звена	Песок	$M_{кр}$ песка	Водопотребность $V_{п.}$ %	(В/Ц) <sub>п</sub>	Подвижность растворной смеси, см	Прочность раствора на сжатие $R_p$ , МПа	Коэффициент прочности $A_p$
1	П-1						

и т. д.

Таблица 2.4. Характеристики крупного заполнителя

№ звена	Крупный заполнитель	$D_{max}$ щебня (гравия)	Водопотребность $V_{щ(гр)}$	(В/Ц) <sub>б</sub>	Подвижность бетонной смеси, см	Прочность бетона на сжатие $R_b$ , МПа	Коэффициент прочности $A_b$
1	Щ-1						

и т. д.

## 2.2. Лабораторная работа № 2. Исследование факторов влияющих на свойства бетонной смеси и бетона, с применением математических методов планирования эксперимента

**Цель работы.** Исследовать влияние некоторых факторов на свойства бетонной смеси и бетона с использованием метода математического планирования эксперимента применительно к задачам оптимизации свойств бетонной смеси и бетона с обработкой результатов опытов методами математической статистики.

**Введение.** Свойства бетонной смеси оказывают большое влияние на качество бетона и технологию изделий. Бетонная смесь независимо от принятой технологии изделий и вида бетона должна удовлетворять двум основным требованиям: 1) сохранять однородность, полученную в процессе приготовления; 2) обладать удобоукладываемостью, соответствующей методам и условиям формирования изделий.

Основными факторами, влияющими на свойства бетонной смеси, являются: начальное содержание воды в смеси; удельный расход вяжущего вещества; зерновой состав мелкого и крупного заполнителя и другие их качественные характеристики; добавки пластифицирующие поверхностно-активных веществ; вибрационное воздействие в процессе их формирования [2, 3].

В работе применяется полный факторный эксперимент (ПФЭ). Планирование в этом случае осуществляется на двух уровнях — верхнем (+1) и нижнем (—1), что позволяет реализовать все неповторяющиеся варианты опытов на указанных уровнях для различного числа факторов. При этом число опытов  $N$  зависит от числа факторов и равно  $2^k$  (например, для двух факторов —  $2^2=4$ ). В качестве факторов в зависимости от условий задачи могут приниматься расходы воды, цемента, песка, показатели качества заполнителей и т. п. В матрице планирования факторы даются в кодированном виде. При проведении опытов все факторы варьируются на двух уровнях. Значения факторов сводятся в табл. 2.5.

Таблица 2.5. Основные характеристики плана эксперимента

Характеристики	$x_1$	$x_2$	$x_n$
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	$x_{1 \min}$	$x_{2 \min}$	$x_n \min$

План проведения полного двухфакторного эксперимента при числе факторов, равном двум, приведен в табл. 2.6.

Таблица 2.6. Линейный план эксперимента

Число опытов	№ опыта	Матрица планирования		Взаимодействие переменных $x_1, x_2$	Свойства		
		$x_1$	$x_2$		$y'$	$y''$	$y'''$
	1	2	3	4	5	6	7
N	1	+1	-1	-1	$y_1'$	$y_1''$	$y_1'''$
	2	-1	-1	+1	$y_2'$	$y_2''$	$y_2'''$
	3	+1	+1	+1	$y_3'$	$y_3''$	$y_3'''$
	4	-1	+1	-1	$y_4'$	$y_4''$	$y_4'''$

Согласно плану в опыте № 1 (см. табл. 2.6), фактор  $x_1$  должен устанавливаться на верхнем, а фактор  $x_2$  — на нижнем уровнях. В гр. 4 занесены результаты от перемножения экспериментов гр. 2 на соответствующие элементы гр. 3. В гр. 5, 6, и 7 помещаются результаты опытов (например, показатели удобоукладываемости

смеси, прочности бетона и т. п.). В соответствии с планом проведения экспериментов для каждого опыта рассчитывают состав бетона. Для того чтобы получить несколько результатов в каждом опыте, их выполняют в последовательности, указанной в табл. 2.6, а затем повторяют в обратной последовательности. Результаты опытов необходимо обработать методами математической статистики, получая при этом в алгебраической форме уравнения, выражающие зависимости исследуемых свойств бетонной смеси или бетона от исходных факторов.

Для двухфакторного эксперимента

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_{12}x_1x_2, \quad (2.5)$$

где  $b_0, b_1, b_2$  — коэффициенты регрессии.

Коэффициенты регрессии

$$b_0 = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N y_j; \quad b_i = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N x_{ij}y_j; \quad b_{iu} = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N x_{ij}x_{uj}y_j, \quad (2.6)$$

где  $N$  — число опытов полного факторного эксперимента;  $j$  — номер опыта;  $i, u$  — номера факторов;  $y_j$  — среднее значение исследуемого свойства в  $j$ -м опыте;  $x_{ij}$  — значение фактора  $x_i$  в  $j$ -м опыте;  $x_{uj}$  — значение фактора  $x_u$  в  $j$ -м опыте.

После получения уравнения производят статистические проверки отличия  $b_i$  от нуля и пригодности уравнений для описания исследуемых зависимостей. Некоторые из коэффициентов регрессии  $b_i$  могут оказаться очень малыми — незначительными. Для установления значимости коэффициента необходимо оценить ошибку опыта ( $S_s$ ) или дисперсию воспроизводимости эксперимента ( $S_s^2$ ). При этом если при проведении эксперимента во всех  $N$  точках плана принимают одинаковое количество  $k$  параллельных опытов, то дисперсия

$$S_s^2 = \frac{1}{Nk} \sum_{j=1}^N S_j^2, \quad (2.7)$$

где  $S_j^2$  — оценка дисперсии в  $j$ -й серии параллельных опытов;

$$S_j^2 = \frac{1}{k-1} \sum_{i=1}^k (y_{ji} - \bar{y}_j)^2, \quad (2.8)$$

где  $\bar{y}_j$  — среднее арифметическое  $k$  значений функции в  $j$ -й точке плана используется при вычислении коэффициентов модели  $b_i$ .

Для упрощения вычислений ошибки эксперимента  $S_b = \sqrt{S_b^2}$  в технологических задачах ее можно определить по формуле

$$S_b = \sqrt{\sum_{j=1}^N W_j / (N\alpha \sqrt{k})}, \quad (2.9)$$

где  $W_j$  — размах результатов в  $j$ -й точке плана;

$$W_j = y_{j \max} - y_{j \min}. \quad (2.10)$$

Значения коэффициента  $\alpha$ , зависящего от числа параллельных опытов  $k$ , можно принять по табл. 2.7.

Таблица 2.7. Значения коэффициента  $\alpha$  при  $k$ , равном:

$k$	$\alpha$	$k$	$\alpha$
2	1,13	5	2,33
3	1,59	6	2,53
4	2,06	7	2,70

Зная дисперсию воспроизводимости опыта, можно с некоторой вероятностью  $P$  установить доверительные интервалы коэффициента  $b_i$  по неравенству

$$b_i - t S_b < b_i < b_i + t S_b, \quad (2.11)$$

где  $t$  — критерий Стьюдента (см. табл. 2.14);  $S_b = S_b / \sqrt{N}$  — ошибка в определении коэффициентов уравнения (в ПФЭ одинакова для всех коэффициентов).

Формула (2.11) означает, что с вероятностью  $P$  (обычно  $P=0,95$ ) этот интервал включает значение  $b_i$ . Для нахождения  $t$ -критерия необходимо знать число степеней свободы  $f_s$ , при котором определено значение ошибки  $S_b$ . Под числом степеней свободы при планировании эксперимента понимают разность между числом опытов и количеством констант, определяемых независимо друг от друга.

В нашем случае  $f_s = N(k-1)$ , так как в каждой точке плана выполняется одно независимое определение  $\bar{y}_j$ . Значение  $t$ -критерия в табл. 2.14 соответствует доверительной вероятности  $P=0,95$ . С доверительным интервалом

лом связано критическое значение коэффициента регрессии

$$b_{кр} = t S_b \quad (2.12)$$

Полученные расчетные значения  $b_i$  ниже критического значения допустимо считать незначимыми (равными нулю). Таким образом, проверка значимости коэффициентов состоит в сравнении  $|b_i|$  с  $b_{кр}$ . При условии  $|b_i| \leq b_{кр}$  коэффициент  $b_i$  считается незначимым и исключается из уравнения. Коэффициент значим при выполнении условия  $|b_i| \geq b_{кр}$ .

Для принятия решения о практическом использовании полученной модели необходимо оценить «качество» модели, т. е. сопоставить ошибки предсказания модели с ошибкой опыта. Естественно, что чем меньше предполагаемые ошибки отличаются от ошибок опыта, тем надежнее модель.

Статистическую проверку адекватности уравнения, т. е. способности с достаточной степенью вероятности описать функцию отклика, обычно производят с помощью критерия Фишера

$$F = S_{на}^2 / S_b^2 \quad (2.13)$$

где  $S_{на}^2$  — оценка дисперсии неадекватности;

$$S_{на}^2 = \frac{1}{N - B} \sum_{j=1}^N (\bar{y}_j - \hat{y}_j)^2 \quad (2.14)$$

где  $B$  — число значимых коэффициентов модели,  $\bar{y}_j$ ,  $\hat{y}_j$  — экспериментальное и расчетное значение функции отклика в  $j$ -й точке плана.

С оценкой дисперсии неадекватности связано число степеней свободы  $f_{на} = N - B$ .

Уравнение регрессии считается адекватным, если выполняется условие  $F \leq F_{табл}$ , где  $F_{табл}$  — табличное значение  $F$ -критерия (табл. 2.16) при числе степеней свободы числителя  $f_1 = f_{на}$ , а знаменателя  $f_2 = f_b$ .

Значения  $F$ -критерия в табл. 2.16 даны при  $P = 0,95$ . В том случае, если  $F > F_{табл}$ , то модель неадекватна, исследование должны быть продолжены.

После проведения исследования и анализа полученных результатов делаются выводы и строится графическая зависимость свойств бетонной смеси и бетона от изучаемых факторов.

Содержание лабораторной работы. Работа состоит из нескольких заданий, каждое из которых выполняется

бригадой студентов, состоящей из двух звеньев. Звено готовит два замеса бетона, оба объемом по 7 л, отличающиеся от замесов другого звена расходами цемента, воды или другими переменными факторами. Производится математическое планирование эксперимента, выполняются необходимые расчеты и экспериментальная часть работы, по результатам которой производят построение математической модели зависимости удобоукладываемости бетонной смеси и прочности бетона при сжатии от двух исследуемых факторов.

**Задание 1.** Приготовить бетонную смесь на фракционированном щебне или гравии с  $D_{\text{наиб}}=20$  мм. Песок крупностью  $M_{\text{кр}}=1,5..2,0$  или  $M_{\text{кр}}\geq 2,5$ . Содержание песка  $r\approx 0,35..0,38$ . Расход цемента ( $320\pm 50$ ) кг/м<sup>3</sup>, расход воды ( $170\pm 15$ ) л/м<sup>3</sup>. Определить изменение удобоукладываемости бетонной смеси и прочности бетона при сжатии от расхода воды и цемента.

**Задание 2.** Приготовить бетонную смесь на фракционированном щебне с  $D_{\text{наиб}}=20$  мм, расход цемента 320 кг/м<sup>3</sup>, расход воды ( $175\pm 15$ ) л/м<sup>3</sup>. Содержание песка  $r=0,36\pm 0,03$ . Определить изменение удобоукладываемости бетонной смеси и прочность бетона при сжатии в зависимости от расхода песка и воды.

**Задание 3.** Приготовить бетонную смесь на фракционированном щебне с  $D_{\text{наиб}}=20$  мм, расход цемента ( $320\pm 50$ ) кг/м<sup>3</sup>, расход воды 155 л/м<sup>3</sup>. Добавка суперпластификатора ( $0,8\pm 0,3$ ) % от массы цемента. Определить изменение удобоукладываемости бетонной смеси и прочности бетона при сжатии в зависимости от количества суперпластификатора при разных расходах цемента.

**Указания к проведению лабораторной работы.** Каждая бригада рассчитывает математическую модель зависимости удобоукладываемости и прочности от двух заданных переменных факторов. Для этого составляют условия варьирования факторов по данным задания, матрицу планирования и условия проведения эксперимента. Производят расчет расхода материалов на 1 м<sup>3</sup> бетона. Для чего задаются средней плотностью бетонной смеси ( $\rho=2300..2400$  кг/м<sup>3</sup>). Определяют расход заполнителей исходя из принятой плотности бетонной смеси, назначаемого расхода воды и цемента. Зная значение  $r$ , рассчитывают расход песка и крупного заполнителя и определяют расход материалов на замес объемом 7 л. Каждое звено рассчитывает и prepares два замеса, определяет показатели подвижности или жесткости,

среднюю плотность бетонной смеси и рассчитывает фактический расход материалов. Из каждого замеса изготавливается три образца размером  $100 \times 100 \times 100$  мм и вычисляется прочность бетона при сжатии в возрасте 7...14 сут или после тепловлажностной обработки.

Затем по описанной выше методике выполняют необходимые расчеты для получения математической модели зависимости удобоукладываемости бетонной смеси и прочности бетона при сжатии от заданных переменных факторов (Ц, В, П или др.) в виде уравнений и графиков. Результаты всех расчетов приводят в отчете. Результаты заносят в табл. 2.8.

Таблица 2.8. Сводная таблица экспериментальных данных

№ бригады	№ звена	№ опыта	Переменные факторы Ц, В, П и др. кг/м <sup>3</sup>	Средняя плотность бетонной смеси, кг/м <sup>3</sup>	Фактический расход материалов на 1 м <sup>3</sup> бетона, кг					Предел прочности при сжатии, МПа	Вид уравнения жесткости (подвижности) и прочности
					Ц	В	П	Ш (Г)	добавки		
1	1	1	Ц-370, В-155								
		2	Ц-270, В-155								
	2	3	Ц-370, В-185								
		4	Ц-270, В-185								

и т. д.

По результатам работы одной бригады делаются частные выводы, а всех бригад — общие выводы, включающие теоретическое обоснование полученных результатов.

**Пример.** Построение математической модели зависимости удобоукладываемости бетонной смеси и прочности бетона при сжатии от расхода цемента и воды приводится применительно к заданию 1. Предполагаем, что зависимость удобоукладываемости бетонной смеси и прочности бетона при сжатии от двух факторов (в данном примере от расхода цемента  $x_1$  и воды  $x_2$ ) имеют вид  $y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2$ . Коэффициенты в этом уравнении определяются с помощью полного факторного эксперимен-

Т а б л и ц а 2.9. Основные характеристики плана эксперимента

Характеристики	Расход цемента $x_1$ , кг/м <sup>3</sup>	Расход воды $x_2$ , л/м <sup>3</sup>
Основной уровень	320	170
Интервал варьирования	50	15
Верхний уровень	370	185
Нижний уровень	270	155

та для двух переменных (планирование типа ПФЭ 2<sup>2</sup>), которые варьируются на двух уровнях. В табл. 2.9 приведены условия варьирования факторов при проведении эксперимента.

Матрица планирования и условия проведения эксперимента приведены в табл. 2.10. Значения переменных в табл. 2.10 соответствуют основным характеристикам плана (табл. 2.9) и матрице планирования полного двухфакторного эксперимента (табл. 2.10).

Т а б л и ц а 2.10. Матрица планирования полного двухфакторного эксперимента

№ опыта	План в кодированных переменных		План в натуральных переменных	
	$x_1$	$x_2$	расход цемента $x_1$ , кг/м <sup>3</sup>	расход воды $x_2$ , л/м <sup>3</sup>
1	-1	-1	270	155
2	+1	-1	370	155
3	-1	+1	270	185
4	+1	+1	370	185

Выполняем расчет состава бетонных смесей, соответствующих условиям плана эксперимента. Каждое звено производит расчеты для двух опытов. Принимаем значение средней плотности бетонной смеси 2300 кг/м<sup>3</sup>. Расход заполнителей  $Z = p_{см} - Ц - В = 2300 - 270 - 155 = 1875$  кг. Расход песка  $П = Zr = 1875 \cdot 0,35 = 655$  кг; расход щебня  $Щ = Z - П = 1875 - 655 = 1220$  кг. Аналогично производим расчеты для других опытов. Результаты заносим в табл. 2.11.

Определяем жесткость или подвижность бетонной смеси и прочность бетона при сжатии. Для каждого опыта делают три определения ( $k=3$ ). Результаты полного факторного эксперимента (ПФЭ) приведены в табл. 2.12.

Таблица 2.11. Расход материалов в кг на 1 м<sup>3</sup> бетона и на один замес

№ опыта	Расход материалов на 1 м <sup>3</sup> бетона, кг				Расход материалов на один замес в 7 л, кг			
	Ц	В	П	Щ	Ц	В	П	Щ
1	270	155	655	1220	1,89	1,085	4,58	8,54
2	370	155	620	1155	2,59	1,085	4,34	8,08
3	270	185	645	1200	1,89	1,295	4,51	8,40
4	370	185	610	1135	2,59	1,295	4,27	7,90

Таблица 2.12. Результаты исследований

№ опыта	Жесткость, с				Предел прочности при сжатии, МПа			
	Ж <sub>1</sub>	Ж <sub>2</sub>	Ж <sub>3</sub>	Ж <sub>ср</sub>	R <sub>1</sub>	R <sub>2</sub>	R <sub>3</sub>	R <sub>ср</sub>
1	31	29	32	30,6	28,6	31,1	29,5	29,7
2	28	30	27	28,3	44,3	47,8	46,2	46,1
3	7	5	9	7,0	22,9	24,6	21,9	23,1
4	6	7	5	6,0	36,1	38,7	35,3	36,7

Значение коэффициентов регрессии вычисляем по средним значениям функции Ж<sub>ср</sub> и R<sub>ср</sub> (принимается как среднее арифметическое из трех параллельных определений  $y_{ср} = Ж_{y_i}/k$ ;  $y_{ср} = R_{y_i}/k$ ).

Расчет коэффициентов регрессии для построения математических моделей приведен в табл. 2.13.

Таблица 2.13. Коэффициент регрессии

№ опыта	План		Ж=f(Ц/В)			R=f(Ц/В)		
	x <sub>1</sub>	x <sub>2</sub>	y <sub>j</sub> -Ж	x <sub>1j</sub> y <sub>j</sub>	x <sub>2j</sub> y <sub>j</sub>	y <sub>j</sub> -R	x <sub>1j</sub> y <sub>j</sub>	x <sub>2j</sub> y <sub>j</sub>
1	-1	-1	30,6	-30,6	-30,6	29,7	-29,7	-29,7
2	+1	-1	28,3	+28,3	-28,3	46,1	+46,1	-46,1
3	-1	+1	7,0	-7,0	+7,0	23,1	-23,1	+23,1
4	+1	+1	6,0	+6,0	+6,0	36,7	+36,7	+36,7
Сумма Σ			71,9	-3,3	-45,9	135,6	+30,0	-16,7
b <sub>1</sub> =Σ/4			b <sub>0</sub> =17,9	b <sub>1</sub> =-0,8	b <sub>2</sub> =-11,5	b <sub>0</sub> =33,9	b <sub>1</sub> =7,5	b <sub>2</sub> =-4,2

Таблица 2.14. Значения критерия Стьюдента ( $P=0,95$ )

$f$	$t$	$f$	$t$	$f$	$t$	$f$	$t$
1	12,71	6	2,45	11	2,20	16	2,12
2	4,30	7	2,36	12	2,18	17	2,11
3	3,18	8	2,31	13	2,16	18	2,10
4	2,78	9	2,26	14	2,14	19	2,09
5	2,57	10	2,23	15	2,13	20	2,09

Для проведения статистического анализа вычисляем ошибку эксперимента:  $S_e = \sum W_j / (N\alpha \sqrt{k})$ , где  $W_j = y_{j \max} - y_{j \min}$ ;  $\alpha = 1,59$  (табл. 2.7, при  $k=3$ );  $N$  — число опытов. Для этого пользуемся данными табл. 2.12. В результате расчетов получаем ошибки эксперимента по жесткости бетонной смеси и прочности бетона при сжатии

$$S_s = \frac{3+3+4+2}{4 \cdot 1,59 \sqrt{3}} = 1,02; \quad S_p = \frac{2,5+3,5+2,7+3,4}{4 \cdot 1,59 \sqrt{3}} = 1,03$$

Значимость полученных коэффициентов регрессии приведенных в табл. 2.13, устанавливаем путем сравнения с критическим  $b_{кр}$  по формуле  $b_{кр} = t S_e / \sqrt{N}$ .

Значение  $t$  критерия Стьюдента принимаем по табл. 2.14. Для  $f_s = N(k-1) = 4(3-1) = 8$  значение критерия Стьюдента равно 2,31. Тогда величина  $b_{кр}$  составляет: для жесткости  $b_{кр} = 2,31 \cdot 1,02 / \sqrt{4} = 1,18$ ; для прочности при сжатии  $b_{кр} = 2,31 \cdot 1,03 / \sqrt{4} = 1,18$ . В уравнении жесткости  $b_0 = 17,9 > b_{кр}$ ;  $b_1 = 0,8 < b_{кр}$ ;  $b_2 = 11,5 > b_{кр}$ . Следовательно, коэффициенты  $b_0$  и  $b_2$  значимы, а  $b_1$  можно приравнять нулю и исключить из уравнения. Окончательная модель уравнения жесткости в кодированных переменных имеет вид

$$Ж = 17,9 - 11,5x_2.$$

В уравнении прочности  $b_0 = 33,9 > b_{кр}$ ,  $b_1 = 7,5 > b_{кр}$  и  $b_2 = 4 > b_{кр}$  все коэффициенты значимы, т. е. статистически отличаются от нуля. Модель уравнения, описывающая зависимость прочности при сжатии от расхода цемента и воды, имеет вид

$$R = 33,9 + 7,5x_1 - 4x_2.$$

Для проверки адекватности полученных моделей следует найти расчетные значения функции путем подста

новки кодированных значений переменных (см. табл. 2.10) в уравнение регрессии, а затем вычислить дисперсию неадекватности по каждой модели. Результаты вычисления дисперсии неадекватности приводятся в табл. 2.15.

Таблица 2.15. Результаты вычисления дисперсии

№ опыта	Жесткость, с				Предел прочности при сжатии, МПа			
	$J_{ср}$	$J_p$	$(J_{ср} - J_p)^2$	$f_1 = N - B$	$R_{ср}$	$R_p$	$(R_{ср} - R_p)^2$	$f_2 = N - B$
1	30,6	29,4	1,24	4-2-2	29,7	30,4	0,49	4-3-1
2	28,3	29,4	1,21	4-2-2	46,1	45,4	0,49	4-3-1
3	7,0	6,4	0,36	4-2-2	23,1	22,4	0,49	4-3-1
4	6,0	6,4	0,16	4-2-2	36,7	37,4	0,49	4-3-1
2,87					1,96			

$$S_{на}^2 = \frac{1}{N-B} (\bar{y}_{ср} - \hat{y})^2 = \frac{2,87}{2} = 1,43$$

$$S_{на}^2 = 1,96$$

Фактическое значение  $F_{ср}$  критерия вычисляем по формуле  $F_{ср} = S_{на}^2 / S_p^2$  и сравниваем с табличным значением критерия Фишера, приведенным в табл. 2.16, при  $f_1 = N - B$  и  $f_2 = f_3$ . Модель считаем адекватной, и она может быть использована для решения технологических задач при выполнении условия  $F_{ср} < F_{табл}$ .

Таблица 2.16. Значения критерия Фишера ( $P = 0,95$ )

Число степеней свободы $f_1$	Число степеней свободы $f_2$						
	1	2	3	4	5	6	7
1	161,43	199,50	215,58	224,58	230,16	233,9	236,77
2	18,51	19,00	19,16	19,25	19,30	19,33	19,35
3	10,13	9,55	9,28	9,12	9,01	8,94	8,89
4	7,71	6,94	6,59	6,39	6,25	6,16	6,09
5	6,61	5,79	5,41	5,19	5,05	4,95	4,88
6	5,99	5,14	4,76	4,53	4,39	4,28	4,21
7	5,59	4,74	4,35	4,12	3,97	3,87	3,79
8	5,32	4,46	4,07	3,84	3,69	3,58	3,50
9	5,12	4,26	3,86	3,63	3,48	3,37	3,29
10	4,97	4,10	3,71	3,48	3,33	3,22	3,14
11	4,84	3,98	3,59	3,36	3,20	3,10	3,01
12	4,75	3,89	3,49	3,26	3,11	3,10	2,91
13	4,67	3,81	3,41	3,18	3,03	2,92	2,83
14	4,60	3,74	3,34	3,11	2,96	2,85	2,76
15	4,54	3,68	3,29	3,06	2,90	2,79	2,71

Для уравнения жесткости  $F_{ср} = 1,43/1,02 = 1,37$ . При  $P = 0,95, f_1 = 2, f_2 = 8, F_{табл} = 4,46, F_{ср} < F_{табл} = 1,37 < 4,46$ . Для уравнения прочности при сжатии  $F_{ср} = 1,96/1,03 = 1,9$ . При  $P = 0,95, f_1 = 1, f_2 = 8, F_{ср} < F_{табл} = 1,9 < 5,32$ . Поскольку в обоих случаях выполнено условие  $F_{ср} < F_{табл}$ , полученные модели можно считать адекватными и, следовательно, их можно использовать для решения технологических задач. Для удобства применения полученных моделей в практических задачах целесообразно кодированные значения переменных заменить на натуральные:

$$Ж = 17,9 - 11,5x_2 = 17,9 - 11,5 \frac{В - 170}{15} = 147,1 - 0,76В;$$

$$\begin{aligned} R &= 33,9 + 7,5x_1 - 4x_2 = 33,9 + 7,5 \frac{Ц - 320}{50} - 4 \frac{В - 170}{15} = \\ &= 33,9 + 0,15Ц - 48 - 0,27В + 45,3 = \\ &= 31,2 + 0,15Ц - 0,27В. \end{aligned}$$

Значительно упрощает определение влияния расхода воды и цемента на удобоукладываемость бетонной смеси и прочность бетона при сжатии графическое представле-

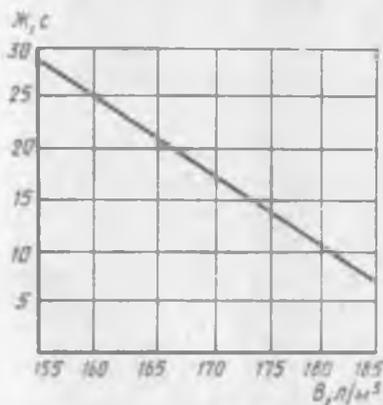


Рис. 2.2. Влияние расхода воды на жесткость бетонной смеси

ние уравнений (рис. 2.2 и 2.3). Для построения графика (рис. 2.2) решаем уравнение жесткости  $Ж = 147,1 - 0,76В$  для минимального и максимального значения расходов воды (155 и 185 л/м³):  $Ж_1 = 147,1 - 0,76 \cdot 155 = 29,3$  с;  $Ж_2 = 147,1 - 0,76 \cdot 185 = 6,5$  с.

Для построения изолиний прочности бетона при сжатии задаемся значением прочности (например,  $R = 30 \text{ МПа}$ ) и двумя значениями переменной (например,  $V_{\text{min}}$  и  $V_{\text{max}}$ ) и решаем уравнение прочности относительно другой переменной ( $\Pi$ ). Например, из уравнения  $R = 31,2 + 0,15 \Pi - 0,27 V$ ;  $30 = 31,2 + 0,15 \Pi - 0,27 \cdot 155$ ;  $\Pi_1 = 40,7 / 0,15 = 271 \text{ кг/м}^3$ ;  $30 = 31,2 + 0,15 \Pi - 0,27 \cdot 185$ ;  $\Pi_2 = 48,8 / 0,15 = 325 \text{ кг/м}^3$ . Через точки с координатами  $\Pi_1 =$

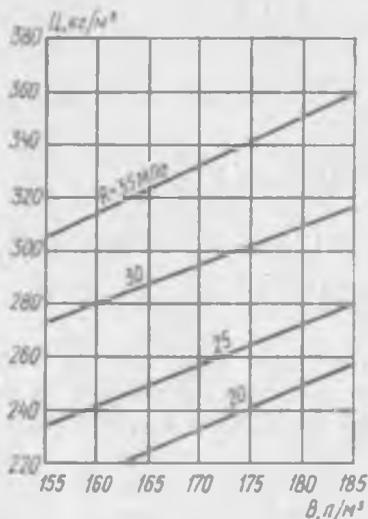


Рис. 2.3. График прочности бетона в зависимости от расхода цемента и воды

$= 271 \text{ кг/м}^3$ ;  $V_1 = 155 \text{ л/м}^3$  и  $\Pi_2 = 325 \text{ кг/м}^3$ ;  $V_2 = 185 \text{ л/м}^3$  проводим прямую. Эта прямая соответствует составу бетона, обеспечивающим получение  $R = 30 \text{ МПа}$ . Аналогично строятся изолинии других значений прочности с определенным интервалом. В данном случае на рис. 2.3 интервал принят равным  $5 \text{ МПа}$ .

### 2.3. Лабораторная работа № 3. Определение реологических характеристик бетонной смеси

**Цель работы.** Определить реологические характеристики бетонной смеси и исследовать влияние на них некоторых факторов.

**Введение.** Одним из основных критериев технологических свойств бетонной смеси является ее удобоукладываемость или формуемость, т. е. способность растекаться и принимать заданную форму, сохраняя при этом

сплошность и однородность массы. Для сплошности среды необходимо, чтобы система обладала определенными связями, величина которых превышала бы гравитационные силы, воздействующие на частицы системы (в данном случае бетонной смеси), что исключает отделение частиц крупного заполнителя от раствора, их оседание и расслоение бетонной смеси.

Для деформирования (уплотнения) бетонной смеси в начальный момент необходимо преодолеть предельное напряжение сдвига  $\tau$ , а затем, чтобы избежать расслоения, — сохранить наименьшую пластическую вязкость смеси  $\eta$  для ее вязкого течения и наполнения формы. Предельное напряжение сдвига и пластическая вязкость, так же как и период релаксации, являются реологическими характеристиками бетонной смеси. Для определения этих характеристик применяют специальные приборы [2]. Для оценки реологических характеристик в производственных условиях применяют упрощенные методы, получая технологические характеристики бетонной смеси, показатель жесткости или осадку конуса, которые характеризуют поведение смеси в определенных условиях и служат для ориентировочной оценки способности смеси к формуемости и уплотнению при тех или иных условиях воздействия. Однако эти характеристики не дают полных данных о реологических свойствах бетонной смеси.

Используя результаты стандартных испытаний, можно ориентировочно определить реологические свойства бетонной смеси. Так, с помощью стандартного конуса можно определить предельное напряжение сдвига:

$$\tau = \rho_{см} V / (2S), \quad (2.15)$$

где  $\rho_{см}$  — средняя плотность бетонной смеси, кг/м<sup>3</sup>;  $V$  — объем конуса, см<sup>3</sup>;  $S$  — площадь основания конуса после его расплыва, см<sup>2</sup>.

Если бетонный конус расплыва не дает (жесткая бетонная смесь), то его следует пригрузить сверху грузом  $P$ . Тогда

$$\tau = (\rho_{см} V + P) / (2S). \quad (2.16)$$

Ориентировочно можно определить структурную вязкость смеси  $\eta$  на установке, показанной на рис. 2.4:

$$\eta = K (\rho_1 - \rho_2) t, \quad (2.17)$$

где  $K$  — константа прибора, устанавливаемая градуированием на смеси или жидкости (например, глицерине)

с известной вязкостью или путем сравнения вязкости полученной на приборе, с вязкостью, определенной на специальных вискозиметрах (ротационных или др.),  $\rho_1$  — средняя плотность бетонной смеси, г/см<sup>3</sup>;  $\rho_2$  — средняя плотность шарика, г/см<sup>3</sup>;  $t$  — время погружения или всплытия шарика на определенную глубину, с.

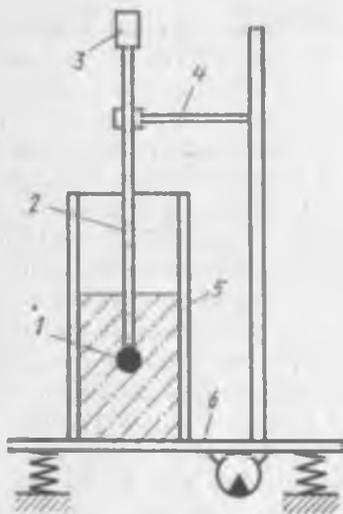


Рис. 2.4. Схема простейшего шарикового вискозиметра:  
1 — стальной шарик; 2 — измерительная штанга; 3 — пригруз;  
4 — штатив; 5 — форма; 6 — вибростол

внутреннего воздействия (в первом случае) и способствующая уменьшению внутреннего трения (во втором случае), оказывает большое влияние на изменение свойств смеси, что выражается в увеличении коэффициента тиксотропии.

При использовании песка и крупного заполнителя внутреннее трение будет возрастать еще больше.

Большое влияние на реологические свойства бетонной смеси оказывает соотношение между водой и цементом, а также между водой и твердой фазой. Структурную вязкость можно значительно уменьшить за счет добавления в бетонную смесь пластифицирующих добавок.

**Содержание лабораторной работы.** Работа проводится подгруппой из двух бригад. Бригады в соответствии с заданием определяют реологические характеристики бетонной смеси и устанавливают влияние на них некото-

На реологические свойства бетонной смеси оказывают влияние минералогический состав и тонкость помола цемента. В смесях с более тонкомолотыми частицами возрастают силы внутреннего сцепления за счет межмолекулярных и адгезионных сил, уменьшается толщина водных прослоек, вследствие чего возрастает структурная вязкость смеси. В смесях с более грубым помолом твердой фазы более значительное влияние оказывают силы внутреннего трения. В этом случае большая часть воды располагается в пустотах, а не между зернами материала, не играя роль смазки, и структурная вязкость смеси возрастает. Вибрация, вызывающая ослабление сил

рых факторов. Для этой цели используются стандартные методы определения удобоукладываемости бетонных смесей и упрощенная установка, схема которой приведена на рис. 2.4. Затем, используя результаты испытаний, по формулам 2.15...2.17 рассчитываются предельное напряжение сдвига и структурная вязкость. Бригады обмениваются результатами опытов и на основании их делают общий вывод о влиянии исследуемых факторов на реологические характеристики бетонной смеси. Время проведения работы — 4 ч.

**Задание 1.** Бригада I определяет изменение удобоукладываемости и предельного напряжения сдвига бетонной смеси в зависимости от вида и качества крупного и мелкого заполнителей. Материалы: расход портландцемента —  $350 \text{ кг/м}^3$ ; звено 1 использует песок с  $M_{кр} = 1,5$ ; щебень с  $D_{н\text{ивб}} = 10$  и  $20$  мм; звено 2 применяет песок с  $M_{кр} = 2$  и  $3$ ; щебень с  $D_{н\text{ивб}} = 20$  мм; звено 3 использует песок с  $M_{кр} = 1,5$  и гравий с  $D_{н\text{ивб}} = 10$  и  $20$  мм.

**Задание 2.** Бригада II определяет изменение удобоукладываемости и структурной вязкости бетонной смеси в зависимости от величины водоцементного отношения, вида и количества пластифицирующей добавки.

Звено 1 для первого замеса использует те же материалы и расход материалов, что и звено 1 бригады I. Два других замеса отличаются от первого замеса водоцементным отношением на  $\pm 10\%$ . Звенья 2 и 3 используют те же материалы и расход материалов на  $1 \text{ м}^3$  бетона, что и звено 1 бригады I. Дополнительно при изготовлении замесов в воду затворения вводится пластифицирующая добавка в количествах  $0,1 \dots 0,3 - 0,5\%$  СДБ и  $0,3 \dots 0,55 - 0,8\%$  суперпластификатора соответственно звеном 2 и 3.

**Указания к проведению лабораторной работы.**

1. Каждое звено рассчитывает расход материалов на  $1 \text{ м}^3$  бетона и для приготовления замеса объемом  $7 \text{ л}$ .

2. Изготавливаются замесы и определяется подвижность или жесткость, средняя плотность бетонной смеси, а также фактический расход материалов на  $1 \text{ м}^3$  бетона в соответствии с общими методическими указаниями (см. § 1.3). При изготовлении первого замеса I-й бригадой уточняется количество воды из условия получения бетонной смеси с заданной подвижностью или жесткостью (задается преподавателем). При приготовлении других замесов количество воды берется согласно заданиям по звеньям.

3. Результаты выполненных расчетов приводятся в отчете. Результаты испытаний двух бригад заносятся в табл. 2.17.

Таблица 2.17. Результаты испытаний бетонных смесей

№ бригады	№ звена	№ замеса	Песок $M_{гр}$	Щебень $D_{щ\text{еб}}$	Гравий $D_{грав}$	В/Ц	Вид и количество добавки, %	Средняя плотность бетонной смеси, $kg/m^3$	Подвижность, см, или жесткость, с, бетонной смеси	Фактический расход материалов, $kg/m^3$					
										цемент	вода	песок	щебень	добавка	
I	1	1													
		2													

и т. д.

4. Каждым звеном бригады I делаются необходимые измерения и рассчитывается величина предельного напряжения сдвига. Для этого при определении удобоукладываемости бетонной смеси определяют также объем конуса и его площадь после расплыва. Результаты измерений и расчетов приводятся в отчете и заносятся в табл. 2.18.

Таблица 2.18. Результаты опытов бригады I

№ звена	№ замеса	Характеристика бетонного конуса		Масса бетонной смеси в конусе, кг	Масса пригруза $P$ , кг	Предельное напряжение сдвига $\tau$ , Па
		диаметр, см	площадь, $cm^2$			
1	1					
	2					

и т. д.

5. На основе результатов опытов бригады I делаются выводы по изменению удобоукладываемости и предельного напряжения сдвига в зависимости от вида и качества мелкого и крупного заполнителей.

6. Бригада II определяет изменение структурной вязкости на установке (см. рис. 2.4) в зависимости от величины водоцементного отношения, вида и количества пластифицирующей добавки. Результаты измерений и расчетов приводятся в отчете и заносятся в табл. 2.19.

Таблица 2.19. Результаты опытов бригады II

№ звена	№ замеса	Средняя плотность бетонной смеси, кг/м <sup>3</sup>	Время погружения шарика, с	Структурная вязкость $\eta$ , Па·с
1	1 2 3			

и т. д.

7. На основе результатов опытов бригады II делают выводы по изменению удобоукладываемости и структурной вязкости бетонной смеси в зависимости от величины водоцементного отношения, вида и количества пластифицирующей добавки.

8. Бригады обмениваются результатами опытов, на основании которых строят графоаналитическую зависи-

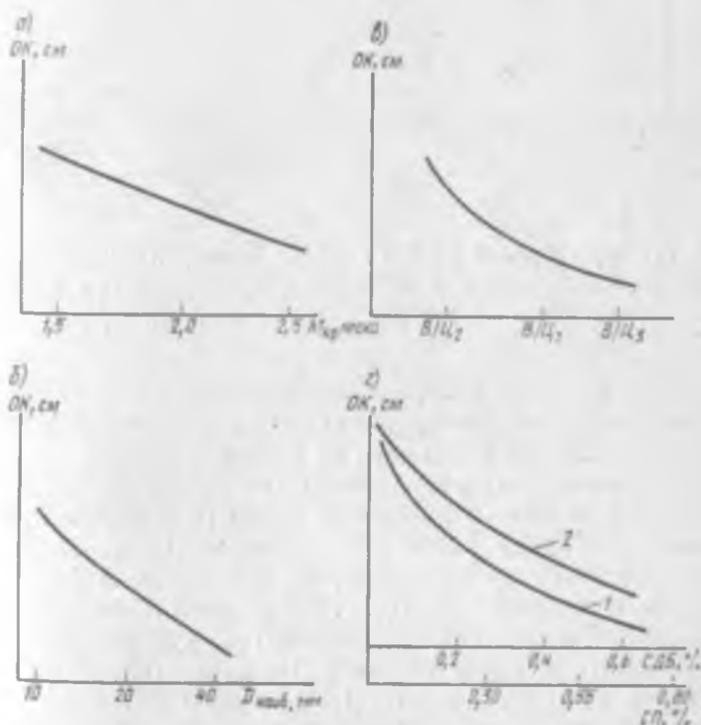


Рис. 2.5. Изменение удобоукладываемости бетонной смеси в зависимости от качества мелкого (а), крупного (б) заполнителей, величины водоцементного отношения (в), вида и количества пластифицирующей добавки (г):

1 — суперпластификатор, 2 — СДБ

мость изменения удобоукладываемости (рис. 2.5), предельного напряжения сдвига (рис. 2.6) и структурной вязкости (рис. 2.7) от исследуемых факторов. На основе результатов опытов двух бригад делаются общие выводы о влиянии исследуемых факторов на реологические характеристики.

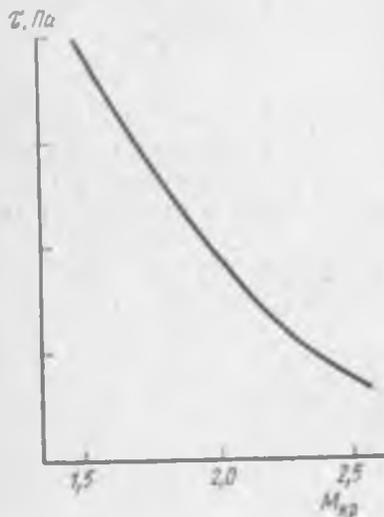


Рис. 2.6. Изменение предельного напряжения сдвига бетонной смеси в зависимости от крупности песка

#### 2.4. Лабораторная работа № 4. Выбор химических добавок применительно к условиям производства бетонных и железобетонных изделий с оценкой их эффективности

**Цель работы.** Выбрать химическую добавку применительно к условиям производства бетонных и железобетонных изделий и оценить ее эффективность.

**Введение.** Для регулирования свойств бетонной смеси и бетона, а также экономии цемента в бетон при изготовлении вводят различные добавки. Широко применяются химические вещества, добавляемые в бетон в небольшом количестве (0,1...0,2% массы цемента). Эффективными добавками являются суперпластификаторы — синтетические полимерные вещества, которые вводятся в количестве 0,1...1,2% массы цемента. Эти добавки увеличивают подвижность и текучесть бетонной смеси и существенно улучшают строительно-технологические свойства бетона [2, 3]. Номенклатура химических добавок и рекомендации по их применению приведены в [13].

Эффективность применения добавок в бетонах зависит от многих технологических факторов (вида и минералогического состава цемента, состава бетона, вида и качества заполнителя и т. п.).

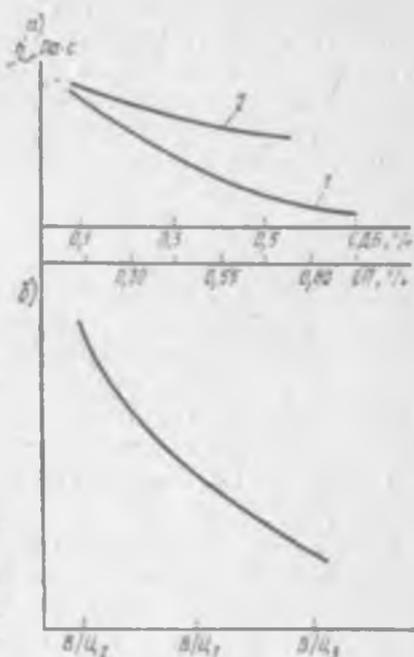


Рис. 2.7. Изменение структурной вязкости:

а — от вида и количества пластифицирующей добавки: 1 — суперпластификатор; 2 — СДБ; б — от величины водоцементного отношения

**Содержание лабораторной работы.** Работа состоит из нескольких заданий, каждое из которых выполняется двумя звеньями. Звено готовит необходимое количество замесов, один из которых является эталонным. Из этих замесов изготавливаются образцы, количество которых устанавливается исходя из условий задачи, поставленной в задании. Эффективность добавки определяется путем сравнения значений свойств бетонной смеси и бетона с исследуемой добавкой и без нее (в эталонной смеси). Учитывая, что эффективность добавки зависит от многих технологических факторов, желательно при определении ее одновременно исследовать влияние этих факторов. Для упрощения в этом случае рекомендуется применить метод математического планирования эксперимента с расчетами на ЭВМ [4, 6, 7, 22].

Время проведения работы 3 ч.

**Задание 1.** Выбрать химическую добавку, ускоряющую процесс твердения бетона в железобетонных конструкциях с ненапрягаемой арматурой, и определить

оптимальное количество добавки, обеспечивающее достижение наибольшей прочности бетона в возрасте 1 сут. Заданная прочность бетона 30 МПа. Подвижность бетонной смеси 5 см. Материалы: портландцементы с содержанием  $C_3A=5..7\%$  (для 1-го звена) и более 10% (для 2-го звена); песок с  $M_{кр}=2,5$ ; водопотребность — 7%, доля песка в смеси заполнителей  $r \approx 0,35$ ; щебень с  $D_{наиб}=20$  мм, фракционированный. Изделия твердеют в нормальных температурно-влажностных условиях. Выбор добавки и назначение ее количества следует произвести согласно рекомендациям [13].

**Задание 2.** Определить оптимальное содержание пластифицирующей добавки СДБ для бетона прочностью 30 МПа в железобетонных ненапрягаемых конструкциях и определить получаемую при этом экономию портландцемента. Материалы для приготовления бетонной смеси и условия проведения эксперимента те же, что и в задании 1. Портландцемент с содержанием  $C_3A=5..7\%$ . Ориентировочное количество пластифицирующей добавки СДБ принять в соответствии с рекомендациями [13].

**Задание 3.** Определить эффективность применения суперпластификатора марки С-3 (или другой марки) на свойства бетонной смеси (подвижность) для монолитного бетона с заданной прочностью 30 МПа. Подвижность бетонной смеси 18..20 см. Материалы для приготовления бетонной смеси те же, что и в задании 1.

**Задание 4.** Определить экономию цемента от введения в бетонную смесь суперпластификатора С-3 (или другой марки) при условии сохранения подвижности смеси и прочности бетона при изготовлении железобетонных напрягаемых конструкций. Требуемая прочность бетона 30 МПа. Материалы для приготовления бетона и условия проведения эксперимента те же, что и в задании 1.

**Указания по проведению лабораторной работы.**  
1. Каждое звено подбирает состав бетона без добавки по показателям заданной прочности и удобоукладываемости. Этот состав бетона является эталоном. Затем рассчитывают расход материалов на замес (обычно 7 л).

2. Подбор состава бетона с добавками производится по показателю подвижности или жесткости бетонной смеси и прочности бетона на сжатие (в зависимости от задания). При этом необходимо соблюдать условия, изложенные в рекомендациях [13].

3. Изготавливаются замесы и образцы, определяется

подвижность или жесткость бетонной смеси, средняя плотность бетонной смеси и фактический расход материалов на 1 м<sup>3</sup> бетона в соответствии с общими методическими указаниями к лабораторным работам (см. § 1.3).

4. В установленные сроки образцы испытывают для определения средней плотности и прочности бетона при сжатии.

5. Результаты выполненных расчетов и испытаний приводят в отчете, составленном индивидуально каждым студентом.

6. По результатам работы двух звеньев делаются частные выводы, а всех звеньев — общие выводы, включающие теоретическое и экономическое обоснование выбранной добавки и ее количества, а также оценку эффективности от ее применения (например, по себестоимости 1 м<sup>3</sup> бетонной смеси).

7. При оценке эффективности добавок за эталон принимаются бетонные смеси или бетоны без добавок. Эффективность добавки определяется путем сравнения значений исследуемых характеристик бетонной смеси или бетона с исследуемой добавкой и эталона. Добавка считается эффективной и пригодной для применения, если полученные в результате опытов свойства бетонной смеси или бетона выше эталонных и находятся в пределах критериев эффективности, приведенных в рекомендациях [13].

**Пример.** Определение оптимального содержания добавки СДБ в бетоне приводится применительно к заданию 2.

1. Производится расчет расхода материалов на 1 м<sup>3</sup> бетона без добавки (эталонный состав). Рассчитывается расход материалов на замес 7 л. Приготавливается опытный замес и корректируется расчетный состав бетона по заданной подвижности (ОК 5 см).

2. Корректируется состав бетона с добавкой [13] исходя из поставленной в задании задачи (в данном случае добавка применяется для сокращения расхода цемента), изготавливаются пробные замесы, в которые при изготовлении вводится добавка СДБ в количествах 0,1; 0,15; 0,2 от массы цемента. При этом уменьшается расход цемента и воды по сравнению с составом бетонной смеси без добавки до получения бетонной смеси заданной подвижности. Добавка вводится в виде 10%-ного раствора СДБ, расход которой определяется по табл. 2.20. Результаты расчетов заносят в табл. 2.21.

Т а б л и ц а 2.20. Определение расхода раствора СДБ

Плотность раствора СДБ, г/см <sup>3</sup>	Концентрация раствора СДБ, %	Содержание сухого вещества в растворе, кг/л	Расход раствора на 100 кг цемента, л, при введении СДБ % от массы цемента		
			0,1	0,15	0,2
1,05	10	0,105	0,95	1,425	1,9
1,06	12	0,128	0,851	1,277	1,702
1,07	14	0,151	0,752	1,129	1,504
1,08	16	0,174	0,653	0,931	1,308
1,09	18	0,187	0,554	0,833	1,108
1,10	20	0,22	0,454	0,681	0,903
1,11	22	0,242	0,424	0,636	0,847
1,12	24	0,264	0,394	0,591	0,787
1,13	26	0,286	0,364	0,546	0,725
1,14	28	0,308	0,334	0,501	0,664
1,15	30	0,33	0,303	0,455	0,606
1,16	32	0,36	0,384	0,427	0,568
1,17	34	0,39	0,265	0,399	0,53
1,18	36	0,42	0,246	0,371	0,492
1,19	38	0,45	0,227	0,343	0,454
1,20	40	0,48	0,208	0,312	0,416

Т а б л и ц а 2.21. Расход материалов, кг

№ задания	№ яруса	Расход материалов на 1 м <sup>3</sup> бетона					Расход материалов на замес объемом 7 л				
		цемент	вода	песок	щебень	добавка, % от массы цемента	цемент	вода	песок	щебень	добавка, % от массы цемента
12	1					0					0
	2					0,1					0,1
							0,15				
						0,20					0,20

3. Из откорректированных составов бетонной смеси изготавливают образцы, которые твердеют в нормальных температурно-влажностных условиях.

Предположим, что в результате испытания образцов и пересчета составов бетона получены следующие дан

ные (табл. 2.22). Анализ приведенных в таблице результатов показывает, что оптимальным количеством добавки СДБ является 0,2% от массы цемента. В этом случае обеспечивается получение бетона с заданной прочностью

Таблица 2.22. Результаты испытаний

№ задания	№ звена	Количество СДБ, % от массы цемента	Средняя плотность бетонной смеси, кг/м <sup>3</sup>	В/Ц	Фактический расход цемента, кг/м <sup>3</sup>	Прочность бетона при сжатии, МПа	Расход цемента для получения бетона прочностью 30 МПа
2	1	0	2230	0,44	370	29,3	365
		0,1	2250	0,42	352	29,8	355
	2	0,15	2260	0,41	345	30,4	340
		0,2	2270	0,39	335	30,8	328

30 МПа при экономии цемента около 10%. Полученная экономия цемента удовлетворяет ориентировочным данным по уменьшению расхода цемента за счет введения добавки [13].

### 2.5. Проектирование состава тяжелого бетона и исследование основных факторов, влияющих на его состав

Проектирование состава бетона является одним из важнейших этапов в технологии бетона. В результате проектирования состава бетона должно быть определено рациональное отношение между применяемыми материалами, которое обеспечивает необходимую подвижность (жесткость) бетонной смеси, прочность бетона в конструкции с учетом технологии ее изготовления, долговечность и экономичность бетона (минимальный расход цемента или минимальную стоимость).

Проектирование состава бетона включает: назначение требований к бетону исходя из особенностей изготовления и эксплуатации конструкций; выбор материалов для бетона и получение необходимых данных, характеризующих их свойства; определение предварительного со-

става бетона; корректирование состава на пробных замесах; дополнительное корректирование в процессе производства, связанное с колебаниями свойств материалов и другими факторами.

В настоящее время наибольшее распространение получили следующие способы подбора состава тяжелого бетона: расчетно-экспериментальный; ускоренный способ оценки качества цемента в бетоне и назначение состава бетона; подбор состава бетона по таблицам, графикам, номограммам; планирование эксперимента и выбор состава бетона с применением математико-статистических методов.

Первые три 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 и оптимальному количеству песка в смеси заполнителей, проверяются на прочность (или 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 и влажных заполнителей.

Способ с использованием математико-статистических методов позволяет решить задачу подбора составов бетонов по прочности, морозостойкости и другим показателям при различной подвижности (жесткости) смеси.

Состав бетона обычно выражают двумя способами: 1) соотношением по массе с обязательным указанием водоцементного отношения и активности цемента, принимая количество цемента за единицу (например, 1 : 2 : 4 по массе, В/Ц=0,6,  $R_{ц}=32,5$  МПа); 2) расходом материалов по массе (кг) на 1 м<sup>3</sup> уложенной и уплотненной бетонной смеси (например, цемента — 280, песка — 600, щебня — 1270, воды — 170).

### *2.5.1. Лабораторная работа № 5. Проектирование состава тяжелого бетона расчетно-экспериментальным методом и исследование основных факторов, влияющих на свойства бетона*

Цель работы. Освоить методику проектирования рационального состава тяжелого бетона расчетно-экспериментальным методом и исследовать факторы, влияющие на состав бетона.

**Введение.** Проектирование состава бетона расчетно-экспериментальным методом производится в три этапа: 1) предварительный расчет расхода материалов на пробные замесы; 2) уточнение параметров состава на пробных замесах; 3) определение расхода составляющих на 1 м<sup>3</sup> бетона (назначение состава).

Для того чтобы осуществить проектирование состава бетона, необходимо знать: заданную прочность бетона к определенному возрасту (или другие его свойства), которые задаются обычно в рабочих чертежах; удобоукладываемость бетонной смеси (назначается в зависимости от размеров конструкции, плотности армирования, способов укладки и уплотнения); вид и наибольшую крупность заполнителя; вид и марку цемента.

Для экономичного расходования цемента необходимо соблюдать рекомендации табл. 2.23.

Т а б л и ц а 2.23. Рекомендуемые для бетона марки цемента

Класс бетона	Марка цемента	Класс бетона	Марка цемента
B7,5	300	B25	500
B10	400	B30	600
B15	400	B40	600

**Содержание лабораторной работы.** Работа состоит из нескольких заданий, каждое из которых выполняется двумя звеньями. В задании предусматривается проектирование состава тяжелого бетона расчетно-экспериментальным методом и исследование факторов, влияющих на состав бетона.

Работа рассчитана на 4 ч.

**Задание 1.** Звену 1 подобрать состав тяжелого бетона с заданной прочностью 20 МПа из бетонной смеси подвижностью 5...6 см. Материалы: портландцемент М400; песок средней крупности; щебень известняковый с  $D_{\text{наиб}}=20$  мм. Рассчитать состав бетона, если песок имеет влажность 5%, а щебень — 1,5%.

Звену 2 выполняет аналогичное задание, но дополнительно необходимо исследовать, как влияет жесткость бетонной смеси на состав бетона той же прочности путем параллельного проектирования состава бетона с жесткостью 5...12 с (по ГОСТ 10181.1.—81).

**Задание 2.** То же, что и в задании 1, но подбор состава бетона осуществляется на гравии с  $D_{\text{наиб}}=20$  мм.

Рассчитать производственный состав бетона, если песок имеет влажность 4%, а гравий — 1%.

Задание 3. Звену 1 подобрать состав тяжелого бетона с заданной прочностью 20 МПа из бетонной смеси подвижностью 5...6 см. Отпускная прочность 70% от марочной. Материалы те же, что и в задании 1.

Звено 2 выполняет то же задание, что и первое звено, но необходимо дополнительно исследовать, как влияет на состав бетона  $M_{кр}$  песка путем параллельного подбора состава бетона на мелком песке.

Указания по проведению лабораторной работы. Каждое звено рассчитывает состав тяжелого бетона, исходя из конкретных условий задания следующим образом:

1. Определяют водоцементное (или цементно-водное) отношение в зависимости от требуемой прочности, срока и условий твердения по заданию путем предварительных опытов, устанавливающих зависимость прочности бетона от этого фактора и активности цемента (с использованием данных заполнителей) или ориентировочно по формулам:

$$R_6 = AR_n (Ц/В \pm 0,5), \quad (2.18)$$

откуда

а) для обычного бетона с  $В/Ц \geq 0,4$  ( $Ц/В \leq 2,5$ )

$$В/Ц = AR_n / (R_6 + A \cdot 0,5R_n); \quad (2.19)$$

б) для высокопрочного бетона с  $В/Ц \leq 0,4$  ( $Ц/В \geq 2,5$ )

$$В/Ц = A_1 R_n / (R_6 - A_1 \cdot 0,5R_n). \quad (2.20)$$

Значения коэффициентов  $A$  и  $A_1$  в приведенных формулах можно принять по табл. 2.24 в зависимости от качества используемых материалов.

Таблица 2.24. Значения коэффициентов  $A$  и  $A_1$

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

При тепловой обработке бетона в изделиях важно не только обеспечить получение заданной прочности бетона, но и обеспечить после тепловой обработки так на-

зываемую отпускную прочность, которая обычно должна составлять ~70% от заданной прочности. При принятых на заводах режимах тепловой обработки прочность бетона обычно получается меньше 70% от заданной прочности. В этих случаях приходится несколько завышать проектную прочность бетона и принимать ее по формуле

$$R_{расч} = K_0 R_{28} / K_\phi, \quad (2.21)$$

где  $K_0$  — доля от прочности бетона, которая должна быть получена к концу тепловой обработки для обеспечения заданной отпускной прочности бетона;  $K_\phi$  — доля прочности бетона от 28-суточной прочности нормального твердения, которая может быть (примерно) получена в зависимости от состава бетона, длительности и температуры тепловой обработки и других факторов (табл. 2.25).

Таблица 2.25. Значения коэффициента  $K_\phi$

Характеристика смеси	Продолжительность тепловой обработки	
	6...8 ч	8...12 ч
Подвижная смесь с осадкой конуса 6 см	0,55	0,60
То же, с осадкой менее 6 см	0,58	0,65
Умеренно жесткая смесь Ж <sub>2</sub>	0,62	0,70
Жесткая смесь Ж <sub>1</sub>	0,67	—

Пересчитанная таким образом прочность бетона может быть введена в формулы (2.19) или (2.20) для расчета необходимого водоцементного отношения.

2. Определяют расход воды исходя из заданной удобоукладываемости по табл. 2.26.

3. Находят расход цемента по формуле

$$Ц = ВЦ/В. \quad (2.22)$$

Если расход цемента на 1 м<sup>3</sup> бетона окажется ниже допускаемого по строительным нормам и правилам, то необходимо увеличить его до нормы.

4. Вычисляют расход крупного заполнителя и песка в кг на 1 м<sup>3</sup> бетона, исходя из следующих двух условий:

а) сумма абсолютных объемов компонентов, расходуемых на 1 м<sup>3</sup> хорошо уплотненной бетонной смеси для получения плотного бетона, должна равняться 1000 л

Таблица 2.26. Расход воды в бетонной смеси, л/м<sup>3</sup>

Показатели смеси	Жесткость по ГОСТ 10181.1-81, с	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>0</sub>	>31	—	150	135	125	120	160	150	135	130
Ж <sub>1</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>3</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 ... 20	225	220	205	195	235	230	215	205

Примечания: 1. Расход воды приведен для смеси на портландцементе с НЦТ=26 ... 28% и на песке с  $M_{кр}=2$ . 2. При изменении нормальной густоты цементного теста на каждый процент в меньшую сторону расход воды уменьшается 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 сторону — уменьшается, на то же значение.

(небольшим объемом вовлеченного воздуха, порядка 1,5...2% можно пренебречь).

$$Ц/\rho_{ц} + В + П/\rho_{п} + Ш/\rho_{ш} = 1000; \quad (2.23)$$

б) цементно-песчаный раствор в бетонной смеси должен заполнить пустоты в крупном заполнителе с учетом некоторой раздвижки зерен. Необходимый объем раствора можно определить, если принять, что раздвижка зерен крупного заполнителя увеличит его пустотность на некоторый коэффициент  $\alpha$  (больше единицы).

Таким образом, необходимый объем растворной составляющей в бетонной смеси определяется из равенства

$$Ц/\rho_{ц} + В + П/\rho_{п} = V_{ш}Ш/(\rho_{ш}\alpha), \quad (2.24)$$

где Ц, В, П и Ш — расходы цемента, воды, песка и щебня;  $\rho_{ш}$  — насыпная плотность щебня, кг/л;  $\rho_{ц}$ ,  $\rho_{п}$ ,  $\rho_{ш}$  — плотность цемента, песка и щебня, кг/л;  $\alpha$  — коэффициент раздвижки зерен щебня раствором;  $V_{ш}$  — пустотность щебня в относительных единицах.

Решая совместно уравнения (2.23) и (2.24), получают формулы, позволяющие рассчитать необходимый расход крупного заполнителя и песка в кг на 1 м<sup>3</sup> бетона:

$$Ш = 1000 / (V_{ш}\alpha/\rho_{ш} + 1/\rho_{ш}). \quad (2.25)$$

Значения коэффициента  $\alpha$ , зависящего от расхода цемента и водоцементного отношения для подвижных смесей, приведены в табл. 2.27.

Таблица 2.27. Значения коэффициента  $\alpha$

Расход цемента, кг/м <sup>3</sup>	$\alpha$ 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  $\alpha$  уменьшают на 0,03 на каждый процент увеличения водопотребности песка. Если применить крупный песок с водопотребностью менее 7%, то  $\alpha$  увеличивают 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  $\alpha \sim 1,1$ . 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  $\alpha > 1,1$ .

Далее определяют расход песка в кг на 1 м<sup>3</sup> бетона по формуле

$$П = 1000 - (Ц/\rho_{ц} + В + Ш/\rho_{ш})\rho_{н}. \quad (2.26)$$

5. По найденным расходам всех составляющих материалов на 1 м<sup>3</sup> рассчитывают расход компонентов на пробный замес принятого объема  $V$ , л.

6. Из пробных замесов каждое звено изготавливает образцы-кубы размером 100×100×100 мм в количестве не менее 3 шт. и определяет плотность свежетоформованного бетона. Если при изготовлении замесов подвижность (жесткость) смеси отличается от заданной, то необходимо провести корректирование ее удобоукладываемости по методике, приведенной в § 1.3.

После твердения по принятому режиму образцы испытывают для определения прочности бетона при сжатии. Перед испытанием измеряют грани образца с точностью до 1 мм и взвешивают. По результатам испытаний двух-трех серий образцов в указанные сроки строят график зависимости  $R_b = f(Ц/В)$  (рис. 2.8). На графике для заданной прочности  $R_b$  бетона находится искомое значение цементно-водного отношения, обеспечивающее получение необходимой прочности бетона.

7. Пользование формулами для расчета цементно-водного отношения, при котором обеспечивалась бы достаточно точно заданная прочность бетона, почти не представляется возможным, так как приведенные выше формулы (и аналогичные им другие) по своему построению и рекомендуемым числовым значениям коэффициентов не учитывают конкретные условия в каждом случае. Поэтому они пригодны лишь для предварительных расчетов расхода материалов на  $1 \text{ м}^3$  бетона, а не для назначения состава бетона в конкретных условиях технологического процесса.

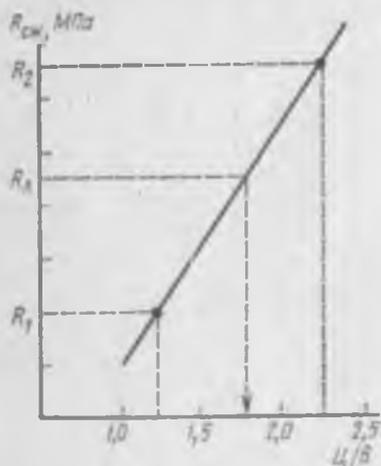


Рис. 2.8. Влияние цементно-водного отношения на прочность бетона при сжатии

В основу подбора состава бетона в данной лабораторной работе положено нахождение необходимого значения цементно-водного отношения на основе построения зависимости  $R_сж = f(Ц/В)$  по результатам экспериментальных данных, полученных для заданных технологических условий.

Поскольку эту зависимость на определенном участке значений цементно-водных отношений при постоянном качестве материалов можно принять линейной, достаточно иметь показатели прочности при двух различных значениях такого отношения (при прочих равных условиях), чтобы построить эту зависимость графически и по ней выбрать то значение цементно-водного отношения, которое обеспечит получение заданной прочности бетона и будет положено в основу расчета рекомендуемого состава бетона.

Для построения графика зависимости  $R_сж = f(Ц/В)$  готовят еще один или два замеса, отличающиеся от первого замеса значениями цементно-водного отношения на  $\pm 0,5$  так, чтобы значения этого отношения были в пределах  $1,2 \dots 2,5$ . Расчет материалов на эти замесы производят по вышеизложенной методике.

8. Зная расход воды ( $V = \text{const}$ ) и цементно-водное отношение, рассчитывают расход материалов на  $1 \text{ м}^3$

бетона. Результаты расчетов и испытаний образцов заносят в табл. 2.28, а состав бетона (расход материалов) для получения заданной прочности бетона в зависимости от исследуемых технологических факторов\* — в табл. 2.29.

9. Полученный (на сухих материалах) состав бетона пересчитывают на производственный состав бетона (с учетом влажности заполнителя, указанной в задании). На основании приведенных в табл. 2.29 данных рассчитывается стоимость материалов для обеспечения заданной прочности бетона.

10. На основании результатов работы двух звеньев выбирают рациональный состав бетона с учетом исследованных технологических факторов и стоимости материалов.

### *2.5.2. Лабораторная работа № 6. Планирование эксперимента и выбор состава тяжелого бетона с применением математико-статистических методов*

**Цель работы.** Освоить методику подбора рационального состава тяжелого бетона с применением методов математического планирования эксперимента.

**Введение.** Планирование эксперимента и выбор состава бетона с применением математико-статистических методов рекомендуется производить: при использовании на предприятии или строительстве нескольких составов бетона по прочности и удобоукладываемости бетонной смеси; при построении зависимостей, необходимых для корректирования состава бетона в процессе его приготовления; при организации производства изделий по новой технологии, а также в случае использования автоматических систем управления технологическим процессом.

Сущность планирования эксперимента и выбора состава тяжелого бетона с применением математико-статистических методов заключается в установлении математической зависимости между заданными свойствами бетона и расходом и свойствами составляющих компонентов [2, 3]. Получаемая математическая зависимость используется для назначения и поиска оптимальных со-

---

\* При исследовании влияния технологических факторов на состав бетона для обеспечения заданной прочности бетона можно использовать математические методы планирования эксперимента с обработкой результатов методом математической статистики.

Таблица 2.28. Результаты испытаний образцов, изготовленных из смесей пробных замесов

№ задания	№ звена	№ замеса	Удобукладываемость бетонной смеси		Характеристики заполнителей		Средняя плотность бетона	Средняя плотность бетонной смеси, кг/м <sup>3</sup>	Фактический расход материалов, кг/м <sup>3</sup>				Предел прочности при сжатии, МПа	Средняя плотность бетона, кг/м <sup>3</sup>		
			плотность, г/см <sup>3</sup>	жесткость, с	щебень $D_{max}$	песок $M_{кр}$			цемент	воды	песка	щебня (гравия)			$R_n$	$R_{об}$
1	1	1														
		2														
	2	1														
		2														

Примечание.  $R_n$  — получено путем пересчета прочности образцов после испытаний ( $R_n$ ) на 28-суточный возраст с учетом размера образцов (см. § 1.3).

Таблица 2.29. Расход материалов для обеспечения заданной прочности бетона

№ задания	№ звена	Переменный фактор, влияющий на получение заданной прочности бетона				Прочность бетона, МПа	Расход материалов, кг/м <sup>3</sup>				Стоимость материалов на приготовление 1 м <sup>3</sup> бетона		
		щебень $D_{max}$	гравий $D_{max}$	песок $M_{кр}$	подвижность, см		жесткость, с	цемента	воды	песка		щебня	гравия
1	1												
	2												

ставов. Построение математических зависимостей производится на основе специальных лабораторных исследований с последующим уточнением.

**Содержание лабораторной работы.** Работа состоит из двух заданий, каждое из которых выполняется двумя звеньями. В каждом задании предусматривается подбор состава тяжелого бетона с применением методов математического планирования эксперимента. Работа рассчитана на 6 ч.

**Задание 1.** Подобрать состав бетона нормального твердения в возрасте 3 сут с прочностью 70% от заданной, равной 30 и 40 МПа, при введении в состав бетонной смеси добавки-ускорителя твердения  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  в количестве  $\sim 1,5\%$  от массы цемента с жесткостью смеси  $\approx 10$  с (по ГОСТ 10181.1—81). Материалы: портландцемент марки 400; песок средней крупности; щебень гранитный с  $D_{\text{макс}} = 20$  мм.

В качестве переменных факторов принимается: В/Ц смеси —  $X_1$ ; доля песка в смеси заполнителей  $r$  —  $X_2$ ; водосодержание смеси В, л/м<sup>3</sup>, —  $X_3$ .

Значение интервалов варьирования факторов приведены в табл. 2.30.

Таблица 2.30. Интервалы варьирования факторов

Код	Значение кода	Значение факторов		
		$X_1$	$X_2$	$X_3$
Основной уровень	0	0,4	0,4	180
Интервал варьирования	$\Delta X_1$	0,05	0,05	10
Верхний уровень	+	0,45	0,45	190
Нижний уровень	—	0,35	0,35	170

**Задание 2.** Аналогично заданию 1, но в качестве переменных факторов принимаются: В/Ц смеси —  $X_1$ , доля песка в смеси заполнителей  $r$  —  $X_2$ , расход добавки —  $X_3$ .

Значение интервалов варьирования факторов приведены в табл. 2.31.

**Указания по проведению лабораторной работы.** В зависимости от задания уточнить оптимизируемые параметры (прочность бетона, удобоукладываемость и т. п.); уточнить факторы, определяющие изменчивость оптимизируемых параметров; рассчитать основной исходный состав бетонной смеси; уточнить интервалы варьирования факторов; выбрать план и условия про-

Таблица 2.31. Интервалы варьирования факторов

Код	Значение кода	Значение факторов		
		$x_1$	$x_2$	$x_3$
Основной уровень	0	0,4	0,38	3
Интервал варьирования	$\Delta X_i$	0,05	0,05	1
Верхний уровень	+	0,45	0,43	4
Нижний уровень	-	0,35	0,33	2

ведения исследований; обработать результаты эксперимента с построением математических зависимостей свойств бетонной смеси от выбранных факторов.

Основной исходный состав бетонной смеси рассчитывается согласно указаниям, приведенным в лабораторной работе № 5. В качестве факторов в зависимости от условий задания могут назначаться Ц/В (В/Ц) отношения бетонной смеси, расход воды (цемента), расход заполнителей или соотношение между ними ( $r$ ), расход добавки и т. п. Значение фактора в основном исходном составе называется *основным* (средним или нулевым). При проведении исследований все факторы варьируются или на трех уровнях — основном, нижнем и верхнем, отстоящих от основного на одинаковую величину, называемую *интервалом варьирования*, или на двух уровнях (реже) — верхнем и нижнем. Рекомендуемые при проведении лабораторных исследований значения интервалов варьирования наиболее часто используемых факторов приведены в табл. 2.32.

Таблица 2.32. Значения интервалов варьирования факторов

Факторы	Интервалы варьирования
В/Ц смеси	0,1...0,15
Расход воды, л	20...25
Расход цемента, кг	15...20% от величины основного уровня
Доля песка в смеси заполнителей $r$	0,05...0,1
Расход крупного заполнителя, л	75...100
Расход добавок, кг	50...70% от величины основного уровня

Опытные замесы в зависимости от числа факторов и условий решаемой задачи проводят по заранее составленному плану (или матрице). Для составления плана эксперимента рекомендуется руководствоваться указаниями, приведенными в лабораторной работе № 2 и в [2, 3, 14]. Объем замеса в каждом опыте устанавливают с учетом числа определяемых характеристик (прочности на сжатие, растяжение и т. д.).

Приготовление бетонной смеси, формование образцов, испытание бетонной смеси и образцов производится в соответствии с § 1.3 и соответствующих стандартов.

В отчете приводят необходимые расчеты, связанные с планированием эксперимента, проведением исследований и обработкой результатов опытов с построением математических зависимостей свойств бетонной смеси и бетона от выбранных факторов. На основании результатов работы выбирают рациональный состав тяжелого бетона.

Ниже приведен пример выполнения задания указанным способом.

**Пример.** Подбор состава тяжелого бетона с применением методов математического планирования эксперимента.

Подобрать состав бетона нормального твердения в возрасте 3 сут с прочностью 70% от заданной, равной 30 и 40 МПа при введении в состав бетонной смеси добавки-ускорителя твердения  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  в количестве 3% от массы цемента и с жесткостью смеси не более 30 с. Материалы: БТЦ М500, НГЦТ-0,265; песок с  $M_{кр}=1,9$ ,  $\rho_n=2,64$  кг/л; гранитный щебень с  $D_{н\text{анб}}=20$  мм, водопоглощение  $W=0,5\%$ ,  $\rho_{щ}=2,62$  кг/л.

В качестве переменных выбираем: В/Ц смеси —  $X_1$ , долю песка в смеси заполнителей  $r$  —  $X_2$ ; водосодержание смеси  $V$ , л/м<sup>3</sup>, —  $X_3$ . Назначаем интервалы варьирования с учетом рекомендаций, приведенных в табл. 2.30 (табл. 2.33).

Т а б л и ц а 2.33. Значения интервалов варьирования факторов

Код	Значение кода	Значение факторов		
		$X_1$	$X_2$	$X_3$
Основной уровень	0	0,4	0,4	180
Интервал варьирования	$\Delta X_i$	0,05	0,05	10
Верхний уровень	+	0,45	0,45	190
Нижний уровень	—	0,35	0,35	170

Т а б л и ц а 2.34. Линейный план проведения эксперимента при числе факторов  $k=3$

№ опыта	Матрица планирования ( $x_i$ )			Взаимодействие ( $x_i x_j$ )			Свойства бетона (выход)		
	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_1 x_2$	$x_1 x_3$	$x_2 x_3$	$y_{(1)}$	$y_{(2)}$	...
$N_1$	1	+	+	+	+	+			
	2	-	+	+	-	-			
	3	+	-	+	-	+			
	4	-	-	+	+	-			
	5	+	+	-	+	-			
	6	-	+	-	-	+			
	7	+	-	-	-	-			
	8	-	-	-	+	+			
$n_0$	9	0	0	0	0	0			
	10	0	0	0	0	0			
	11	0	0	0	0	0			

Т а б л и ц а 2.35. Трехуровневый план проведения эксперимента при числе факторов  $k=3$  ( $N=N_1+N_a+n_0$ )

№ опыта	Матрица планирования ( $x_i$ )			Квадраты переменных ( $x_i^2$ )			Взаимодействие $x_i x_j$			Свойства бетона (выход)		
	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_1^2$	$x_2^2$	$x_3^2$	$x_1 x_2$	$x_1 x_3$	$x_2 x_3$	$y_{(1)}$	$y_{(2)}$	...
$N_1$	1	+	+	+	+	+	+	+	+			
	2	-	+	+	+	+	+	-	+			
	3	+	-	+	+	+	+	+	-			
	4	-	-	+	+	+	+	-	+			
	5	+	+	-	+	+	+	+	-			
	6	-	+	-	+	+	+	-	+			
	7	+	-	-	+	+	+	+	-			
	8	-	-	-	+	+	+	+	+			
$N_a$	9	+	0	0	+	0	0	0	0	0		
	10	-	0	0	+	0	0	0	0	0		
	11	0	+	0	0	+	0	0	0	0		
	12	0	-	0	0	+	0	0	0	0		
	13	0	0	+	0	0	+	0	0	0		
	14	0	0	-	0	0	+	0	0	0		
$n_0$	15	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
	16	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
	17	0	0	0	0	0	0	0	0	0		

В задании поставлена задача определения прочностных характеристик в сравнительно незначительном диапазоне изменения переменных, поэтому принимается для реализации линейный план для  $k=3$  (табл. 2.34), а для определения жесткости — трехуровневый нелинейный план для  $k=3$  (табл. 2.35).

Сначала производится расчет состава бетона, например, расчетно-экспериментальным способом в соответствии с указаниями, приведенными в работе № 5. Для этого помимо кодовой записи плана проведения эксперимента составляется табл. 2.36 натуральных значений переменных в каждом опыте.

Таблица 2.36. Натуральные значения переменных в каждом опыте

№ опыта		План эксперимента			Натуральные значения переменных		
Табл. 2.34	Табл. 2.35	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$X_1 - B/C$	$X_2 - r$	$X_3 - B, \text{ д/м}^3$
1	1	+1	+1	+1	0,45	0,45	190
2	2	-1	+1	+1	0,35	0,45	190
3	3	+1	-1	+1	0,45	0,35	190
4	4	-1	-1	+1	0,35	0,35	190
5	5	+1	+1	-1	0,45	0,45	170
6	6	-1	+1	-1	0,35	0,45	170
7	7	+1	-1	-1	0,45	0,35	170
8	8	-1	-1	-1	0,35	0,35	170
—	9	+1	0	0	0,45	0,4	180
—	10	-1	0	0	0,35	0,4	180
—	11	0	+1	0	0,4	0,45	180
—	12	0	-1	0	0,4	0,35	180
—	13	0	0	+1	0,4	0,4	190
—	14	0	0	-1	0,4	0,4	170
9	15	0	0	0	0,4	0,4	180
10	16	0	0	0	0,4	0,4	180
11	17	0	0	0	0,4	0,4	180

Определение жесткости смеси производится с помощью технического вискозиметра или прибора для определения жесткости смеси, а прочности бетона при сжатии испытанием образцов-кубов  $100 \times 100 \times 100$  мм в возрасте 3 и 28 сут нормального хранения. Для этого в каждом опыте изготавливается по шесть образцов.

При проведении опытных замесов в соответствии с выбранным планом целесообразно опыт в нулевой точке (все факторы на основном уровне) равномерно распределить между всеми остальными, дублируя их через каждые

Таблица 2.37. Результаты опытов по определению прочности

№ опыта	План эксперимента			Взаимодействие			Прочность бетона, МПа · 10		R <sub>ср</sub> , %	R <sub>п</sub> x					
	x <sub>1</sub>	x <sub>2</sub>	x <sub>3</sub>	x <sub>1</sub> x <sub>2</sub>	x <sub>1</sub> x <sub>3</sub>	x <sub>2</sub> x <sub>3</sub>	R <sub>1</sub>	R <sub>2</sub>		x <sub>1</sub>	x <sub>2</sub>	x <sub>3</sub>	x <sub>1</sub> x <sub>2</sub>	x <sub>1</sub> x <sub>3</sub>	
1	+	+	+	+	+	+	166	302	55	166	166	166	166	166	
2	-	+	+	-	-	+	280	391	72	-280	280	280	-280	-280	
3	+	-	+	-	+	-	166	353	47	166	-166	166	-166	166	
4	-	-	+	+	-	-	311	425	73	-311	-311	311	311	-311	
5	+	+	-	+	-	-	151	281	54	151	151	-151	151	-151	
6	-	+	-	-	+	-	279	472	59	-279	279	-279	-279	279	
7	+	-	-	-	+	+	225	340	66	225	-225	-225	-225	-225	
8	-	-	-	+	+	+	269	447	60	-269	-269	-269	269	269	
9	0	0	0	0	0	0	223	363	62	0	0	0	0	0	
10	0	0	0	0	0	0	235	375	63	0	0	0	0	0	
11	0	0	0	0	0	0	228	381	60	0	0	0	0	0	
										Σ	-431	-95	-1	-53	-87

3..5 замесов, т. е. принимается следующий порядок реализации линейного и трехуровневого нелинейного планов: опыты 1, 2, 3, 9, 4, 5, 10, 6, 7, 8, 11, и опыты 1, 2, 3, 4, 5, 15, 6, 7, 8, 9, 10, 16, 11, 12, 13, 14, 17 соответственно.

Пусть в результате испытания образцов получили следующие данные (табл. 2.37). При использовании планов первого порядка для определения коэффициентов уравнений прочности и используем следующие формулы:

$$b_0 = \sum_1^{N_1} y_u / N_1; \quad (2.27)$$

$$b_i = \sum_1^{N_1} x_{iu} y_u / N_1; \quad (2.28)$$

$$b_{ij} = \sum_1^{N_1} x_{iu} x_{ju} y_u / N_1; \quad (2.29)$$

где  $y_u$  — значение исследуемого свойства бетона в  $u$ -м опыте;  $x_{iu}$  — значение  $i$ -го фактора в  $u$ -м опыте;  $x_{ju}$  — значение  $j$ -го фактора в  $u$ -м опыте ( $i \neq j$ );  $N_1$  — число опытов в плане, за исключением опытов в нулевых точках (для  $k=2$   $N_1=4$ ; для  $k=3$   $N_1=8$  и т. д.).

бетона при сжатии

$x_0x_3$	$R_{28x}$						$R_1/R_{28x}$					
	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_1x_2$	$x_1x_3$	$x_2x_3$	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_1x_2$	$x_1x_3$	$x_2x_3$
166	302	302	302	302	302	302	55	55	55	55	55	55
280	-391	391	391	-391	-391	391	-72	72	72	-72	-72	72
-166	353	-353	354	-353	353	-353	47	-47	47	-47	47	-47
-311	-425	-425	425	425	-425	-425	-73	-73	73	73	-73	-73
-151	281	281	-281	281	-281	-281	54	54	-54	54	-54	-54
-279	-472	472	-472	-472	472	-472	-59	59	-59	-59	59	-59
225	340	-340	-340	-340	-340	340	66	-66	-66	-66	-66	66
269	-447	-447	-447	447	447	447	-60	-60	-60	60	60	60
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
33	-459	-119	-69	-101	137	-51	-42	-6	8	-2	-44	20

Знак перед численным значением прочности определяется соответствующей графой табл. 2.37.

Для  $R_3$  имеем:

$$b_0 = (166 + 280 + 166 + 311 + 151 + 279 + 225 + 269)/8 = 231;$$

$$b_1 = (166 - 280 + 166 - 311 + 151 - 279 + 225 - 269)/8 = -54;$$

$$b_2 = (166 + 280 - 166 - 311 + 151 + 279 - 225 - 269)/8 = -11,9;$$

$$b_3 = (166 + 280 + 166 + 311 - 151 - 279 - 225 - 269)/8 = -0,125;$$

$$b_{12} = (166 - 280 - 166 + 311 + 151 - 279 - 225 + 269)/8 = -6,7;$$

$$b_{13} = (166 - 280 + 166 - 311 - 151 + 279 - 225 + 269)/8 = -11;$$

$$b_{23} = (166 + 280 - 166 - 311 - 151 - 279 + 225 + 269)/8 = 4,1.$$

Для  $R_{28}$  имеем:

$$b_0 = 3011/8 = 376; \quad b_1 = -459/8 = -57; \quad b_2 = -119/8 = -14,9;$$

$$b_3 = -69/8 = -8,6; \quad b_{12} = -101/8 = -12,6; \quad b_{13} = 137/8 = 17,1;$$

$$b_{23} = -51/8 = -6,4.$$



Для  $R_3/R_{28}$  имеем:

$$b_0 = (55 + 72 + 47 + 73 + 54 + 59 + 66 + 60)/8 = 60,75;$$

$$b_1 = (55 - 72 + 47 - 73 + 54 - 59 + 66 - 60)/8 = -5,25;$$

$$b_2 = (55 + 72 - 47 - 73 + 54 + 59 - 66 - 60)/8 = -0,75;$$

$$b_3 = (55 + 72 + 47 + 73 - 54 - 59 - 66 - 60)/8 = 1;$$

$$b_{12} = (55 - 72 - 47 + 73 + 54 - 59 - 66 + 60)/8 = -0,25;$$

$$b_{13} = (55 - 72 - 47 - 73 - 54 + 59 - 66 + 60)/8 = -5,5;$$

$$b_{23} = (55 + 72 - 47 - 73 - 54 - 59 + 66 + 60)/8 = 2,5.$$

План проведения опытов и результаты определения жесткости заносятся в табл. 2.38.

При использовании планов второго порядка в зависимости от числа факторов (в нашем случае  $k=3$ ) расчет коэффициентов уравнений жесткости производится по формулам (2.30)...(2.33):

$$b_0 = 0,1831 [0y] - 0,0704 \sum_1^k [i iy]; \quad (2.30)$$

$$b_i = 0,1 [i y]; \quad (2.31)$$

$$b_{ii} = -0,0704 [0y] + 0,5 [i iy] - 0,1268 \sum_1^k [i iy]; \quad (2.32)$$

$$b_{ij} = 0,125 [i j y], \quad (2.33)$$

где  $[0y] = \sum_1^N y_u$ ;  $[i iy] = \sum_1^N x_{iu}^2 y_u$ ;  $i \neq j$ ;  $[iy] = \sum_1^N x_{iu} y_u$ ;

$[i iy] = \sum_1^N x_{iu} y_u$ ;  $N$  — общее число опытов в плане (включая нулевые точки).

Сначала вычисляются соответствующие суммы, пользуясь данными табл. 2.38:

$$[0y] = \sum_1^N y_u = 534;$$

$$[1y] = \sum_1^N x_{1u} y_u = -46;$$

$$[2y] = \sum_1^N x_{2u} y_u = 4;$$

$$[3y] = \sum_1^N x_{2u} y_u = -150;$$

$$[11y] = \sum_1^N x_{1u}^2 y_u = 360;$$

$$[22y] = \sum_1^N x_{2u}^2 y_u = 354;$$

$$[33y] = \sum_1^N x_{3u}^2 y_u = 352;$$

$$\sum [i i y] = [11y] + [22y] + [33y] = 1066;$$

$$[12y] = \sum_1^N x_{1u} x_{2u} x_{3u} = -12;$$

$$[13y] = \sum_1^N x_{1u} x_{2u} x_{3u} y_u = -10;$$

$$[23y] = \sum_1^N x_{2u} x_{3u} y_u = 8.$$

Подставляя полученные промежуточные значения сумм в формуле (2.30)...(2.33), получаем:

$$b_0 = 0,1831 \cdot 534 - 0,0704 \cdot 1066 = 97,8 - 75 = 22,8 \approx 23;$$

$$b_1 = 0,1(-46) = -4,6;$$

$$b_2 = 0,1 \cdot 4 = 0,4;$$

$$b_3 = 0,1(-150) = -15;$$

$$b_{11} = -0,0704 \cdot 534 + 0,5 \cdot 360 - 0,1268 \cdot 1066 = -37,6 + 180 - 135 = 7,4;$$

$$b_{22} = -0,0704 \cdot 534 + 0,5 \cdot 534 - 0,1268 \cdot 1066 = -37,6 + 177 - 135 = 4,4;$$

$$b_{33} = -0,0704 \cdot 534 + 0,5 \cdot 532 - 0,1268 \cdot 1066 = -37,6 + 176 - 135 = 3,4;$$

$$b_{12} = 0,125(-12) = -1,5; \quad b_{13} = 0,125(-10) = -1,25;$$

$$b_{23} = 0,125(8) = 1.$$

Значения коэффициентов всех уравнений заносятся в сводную табл. 2.39.

Таблица 2.39. Значения коэффициентов уравнений прочности и жесткости

Параметр	Коэффициенты уравнений									
	$b_0$	$b_1$	$b_2$	$b_3$	$b_{11}$	$b_{22}$	$b_{33}$	$b_{12}$	$b_{13}$	$b_{23}$
$R_{20}$	231	-54	-12	-0,125*	—	—	—	-6,5*	11	4*
$R_{20}$	376	-57	-15	-8,6*	—	—	—	-12,6*	17,1	-6,5*
$(R_1/R_{20}) \times 100$	61	-5,25	1*	1*	—	—	—	-0,25*	5,5	2,5
Ж	22,8	-4,6	0,4	-15	7,4	4,4	3,4	-1,5*	-1,25*	1*

Примечание. Знак \* у цифр указывает, что коэффициенты незначимые.

В соответствии с руководством [14, раздел 9.16] производится статистическая проверка значимости коэффициентов и пригодности полученных уравнений для описания исследуемых зависимостей. Для этого по результатам опытов в основной (нулевой) точке определяют: среднеарифметическое значение параметра  $y_0$ ; дисперсию в нулевой точке  $S_0^2 = S_{y_0}^2$ ; среднее квадратическое отклонение  $S_{y_0} = S_0$ ; среднюю квадратическую ошибку в определении коэффициентов  $S\{b_i\}$  по формулам (2.34)...(2.37):

$$\bar{y}_0 = \sum_1^{n_0} y_{0u} / n_0; \quad (2.34)$$

$$S_{y_0} = S_0 = \sqrt{S_0^2} = \sqrt{\sum_1^{n_0} (\bar{y}_0 - y_{0u})^2 / (n_0 - 1)}; \quad (2.35)$$

$$S_y^2 = S_0^2 = \sum_1^{n_0} (\bar{y}_0 - y_{0u})^2 / (n_0 - 1); \quad (2.36)$$

$$S\{b_i\} = S_y / \sqrt{N_i}; \quad (2.37)$$

где  $n_0$  — число опытов в нулевой точке;  $y_{0u}$  — значение исследуемого свойства бетона в нулевой точке в  $u$ -м опыте.

Так, для  $R_3$  имеем:

$$\bar{y}_0 = (223 + 235 + 228)/3 = 229;$$

$$S_0^2 = S_{y_0}^2 = [(229 - 223)^2 + (229 - 235)^2 + (229 - 228)^2]/2 = 36,5;$$

$$S_0 = S_{\bar{y}} = \sqrt{36,5} = 6; \quad S\{b_i\} = 6/\sqrt{8} = 6/2,84 = 2,14.$$

Для  $R_{28}$  имеем:

$$\bar{y}_0 = (363 + 375 + 381)/3 = 373;$$

$$S_0^2 = S_{y_0}^2 = [(373 - 363)^2 + (373 - 375)^2 + (373 - 381)^2]/(3 - 1) = 84;$$

$$S_0 = S_{\bar{y}} = \sqrt{84} = 9,16; \quad S\{b_i\} = 9,16/\sqrt{8} = 3,24.$$

Для  $R_3/R_{28}$  имеем:

$$\bar{y}_0 = (62 + 63 + 60)/3 = 62;$$

$$S_0^2 = S_{y_0}^2 = (62 - 62)^2 + (62 - 63)^2 + (62 - 60)^2/2 = 2,5;$$

$$S_0 = S_{\bar{y}} = \sqrt{2,5} = 1,58; \quad S\{b_i\} = 1,58/2,84 = 0,56.$$

Результаты расчетов заносят в табл. 2.40.

Т а б л и ц а 2.40. Сводные результаты расчетов

Параметр	$y_0$	$S_{y_0}^2 - S_0^2$	$S_{\bar{y}} - S_0$	$S\{b_i\}$
$R_3$	229	36,5	6	2,14
$R_{28}$	373	84	9,16	3,24
$(R_3/R_{28})100$	62	2,5	1,58	0,56

Далее определяется расчетное значение критерия Стьюдента:

$$t_p |b_i|/S\{b_i\} \quad (2.38)$$

и устанавливается значимость коэффициентов уравнений для определения  $R_{28}$ ,  $R_3$  и  $R_3/R_{28}$ . Проверку рекомендуется производить, начиная с самого малого коэффициента.

Для  $R_{28}$  имеем

$$t_p(b_{23}) = |-6,5|/3,24 = 2,006$$

и сравниваем с  $t_\tau$  из табл. 2.41 при  $f_{\bar{y}} = n_0 - 1 = 2$ .

Таблица 2.41. Значение критерия Стьюдента

Число степеней свободы $f = n - 1$	2	3	4	5	6	8	10	12	14	16
Критерий Стьюдента $t_\tau$	4,3	3,18	2,78	2,57	2,45	2,31	2,23	1,18	2,15	2,12

Если  $t_p < t_\tau$ , то при обычно назначаемом уровне значимости  $\alpha = 0,05$  коэффициент считают равным нулю, а соответствующий ему член уравнения отбрасывают. В нашем случае  $t_p(b_{23}) = 2,006 < t_\tau = 4,3$ , т. е. коэффициент незначим.

Далее рассматривают:  $t_p(b_3) = |-8,61|/3,24 = 2,62$  — коэффициент незначим;  $t_p(b_{12}) = |-12,51|/3,24 = 3,858$  — коэффициент также незначим;  $t_p(b_2) = |-15|/3,24 = 4,63$  — коэффициент значим. Следовательно, значимы и все остальные коэффициенты.

Таким же образом оценивают коэффициенты для  $R_3$  и  $R_3/R_{23}$ . Незначимые коэффициенты отмечены в табл. 2.39 звездочкой.

Для уравнения жесткости смеси имеем следующие оценки:

$$\bar{y}_0 = (27 + 23 + 22)/3 = 24;$$

$$S_0^2 = S_{\bar{y}_0}^2 = [(27 - 24)^2 + (23 - 24)^2 + (22 - 24)^2]/(3 - 1) = 7;$$

$$S_0 = S_{\bar{y}_0} = \sqrt{7} = 2,646.$$

Используя соотношения по [14, п. 9, 17 «б»], можно вычислить ошибки в определении коэффициентов уравнения по формулам (при  $k=3$ ):

$$S^2\{b_0\} = 0,1831S_{\bar{y}_0}^2; \quad S\{b_0\} = 0,4279S_{\bar{y}_0}; \quad (2.39)$$

$$S^2\{b_i\} = 0,1S_{\bar{y}_0}^2; \quad S\{b_i\} = 0,3162S_{\bar{y}_0}; \quad (2.40)$$

$$S^2\{b_{ii}\} = 0,3732S_{\bar{y}_0}^2; \quad S\{b_{ii}\} = 0,6109S_{\bar{y}_0}; \quad (2.41)$$

$$S\{b_{ij}\} = 0,125S_{\bar{y}_0}^2; \quad S\{b_{ij}\} = 0,3536S_{\bar{y}_0}. \quad (2.42)$$

Получаем:

$$S\{b_0\} = 0,4279S_{\bar{y}_0} = 0,4279 \cdot 2,646 = 1,134;$$

$$S\{b_i\} = 0,3162S_{\bar{y}_0} = 0,3162 \cdot 2,646 = 0,838;$$

$$S \{b_{11}\} = 0,6109 S_{\bar{y}} = 0,6109 \cdot 2,646 = 1,618;$$

$$S \{b_{12}\} = 0,3536 S_{\bar{y}} = 0,3536 \cdot 2,646 = 0,937.$$

Определяют значимость коэффициентов, сравнивая  $t_p$  с  $t_{\tau}$  по табл. 2.41 при  $f=16$ :

для  $b_0$   $t_p = |22,8|/1,134 = 20$  — коэффициент значим, так как  $t_p = 20 > t_{\tau} = 2,12$ ;

для  $b_2$   $t_p = |-0,4|/0,838 = 0,477 < t_{\tau}$  — коэффициент незначим;

для  $b_1$   $t_p = |-4,6|/0,838 = 5,49$  — коэффициент значим, следовательно, значим и коэффициент  $b_3 = -15$ ;

для  $b_{33}$   $t_p = |3,4|/1,618 = 2,1 < 2,12$  — коэффициент незначим;

для  $b_{22}$   $t_p = |4,4|/1,618 = 2,72$  — коэффициент значим, следовательно, значим и коэффициент  $b_{11} = 7,4$ ;

для  $b_{12}$   $t_p = |-1,5|/0,937 = 1,6 < 2,12$  — коэффициент незначим, следовательно, незначимы все парные взаимодействия.

Уточненные коэффициенты вносят в табл. 2.42.

Т а б л и ц а 2.42. Уточненные коэффициенты

Параметры	Значения коэффициентов										m
	$b_0$	$b_1$	$b_2$	$b_3$	$b_{11}$	$b_{22}$	$b_{33}$	$b_{12}$	$b_{13}$	$b_{23}$	
$R_3$	231	-54	-12	0	—	—	—	0	-11	0	4
$R_{23}$	376	-57	-15	0	—	—	—	0	17	0	4
$(R_3/R_{23})100$	61	-5	0	0	—	—	—	0	-5,5	2,5	4
Ж	23	-4,5	0	-15	7,4	4,4	3,4	-1,5	0	0	7

В результате проведенного эксперимента и расчетов уравнения прочности и жесткости имеют следующий вид:

$$\bar{y}_3 = 231 - 54x_1 - 12x_2 - 11x_1x_3; \quad \bar{y}_{23} = 376 - 57x_1 -$$

$$- 15x_2 + 17x_1x_3; \quad \bar{y}_{3/23} = 61 - 5x_1 - 5,5x_1x_3 + 2,5x_2x_3;$$

$$\bar{y}_{\text{ж}} = 23 - 4,5x_1 - 15x_2 + 7,4x_1^2 + 4,4x_2^2 + 3,4x_3^2 - 1,5x_1x_2.$$

Производится проверка пригодности уточненных уравнений. Для проверки пригодности полученного уточ-

Таблица 2.43. Вспомогательные данные для вычисления дисперсии адекватности

№ опыта	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$X_4$	$X_1 X_2$	$X_1 X_3$	$X_1 X_4$	$\hat{y}$	$\bar{y}_0$	$ \Delta $	$ \Delta ^2$
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	376	+	+	+	+	+	+	321	302	19	361
		-57	-15	0	0	17,1	0				
2	376	-	+	+	-	-	+	401	391	10	100
		57	-15	0	0	-17,1	0				
3	376	+	-	+	-	+	-	351	353	2	4
		-57	+15	0	0	17,1	0				
4	376	-	-	+	+	-	-	431	425	6	36
		57	15	0	0	-17,1	0				
5	376	+	+	-	+	-	-	287	281	6	36
		-57	-15	0	0	-17,1	0				
6	376	-	+	-	-	+	-	435	472	37	1369
		57	-15	0	0	17,1	0				
7	376	+	-	-	-	-	+	317	340	23	529
		-57	15	0	0	-17,1	0				
8	376	-	-	-	+	+	+	465	447	18	324
		57	15	0	0	17,1	0				
$\Sigma$	376	-57	-15	0	0	17,1	0	-	-	-	$\Sigma \Delta^2 = 2759$

Примечания: 1. Над чертой приведены кодированные значения переменных в соответствии с матрицей планирования, под чертой — произведения, полученные умножением коэффициентов на соответствующее кодированное значение переменной. 2. Последняя строка содержит расчетные значения четырех коэффициентов уравнения ( $m=4$ ) из табл. 2.42. 3. В гр. 9 приведены расчетные значения  $R_{\text{ж}}$  по уточненному уравнению, в гр. 10 — значения  $R_{\text{н}}$ , полученные в результате испытания опытных образцов (см. табл. 2.37). 4.  $|\Delta| = \hat{y} - y_0$ , а  $|\Delta|^2 = (\hat{y} - y_0)^2$ .

ненного уравнения вычисляется дисперсия адекватности (или остаточная дисперсия) по формуле

$$S_{ад}^2 = \frac{\sum_1^{N_1} (y_u - \bar{y}_a)^2}{N_1 - m}, \quad (2.43)$$

где  $y_u$  — значение исследуемого свойства бетона в  $u$ -м опыте;  $\bar{y}_a$  — то же, но вычисленное по уточненному уравнению;  $m$  — число значимых коэффициентов, включая  $b_0$ .

Для вычисления дисперсии адекватности  $S_{ад}^2$  составляется вспомогательная таблица для каждого параметра. Пример расчета  $S_{ад}^2$  для параметра  $R_{28}$  приведен в табл. 2.43.

После этого определяется дисперсия адекватности

$$S_{ад}^2 = \sum \Delta^2 / f_{ад} = 2759/4 = 689,75.$$

В рассматриваемом примере  $N_1 = 8$ ;  $n_0 = 3$ ;  $m = 4$ ;  $f_{ад} = N_1 - m = 8 - 4 = 4$ ;  $f_{\bar{y}} = n_0 - 1 = 3 - 1 = 2$  (табл. 2.44).

Определяется расчетное значение коэффициента Фишера  $F_p$ , учитывая, что  $S_{ад}^2 > S_{\bar{y}}^2$ :

$$F_p = S_{ад}^2 / S_{\bar{y}}^2 = 689,75 / 84 = 8,21 \quad (2.44)$$

и сравнивается с  $F$  для степеней свободы, с которыми определялись  $S_{ад}^2$  и  $S_{\bar{y}}^2$ , т. е.  $f_{ад} = N_1 - m$ ;  $f_{\bar{y}} = n_0 - 1$  (см. табл. 2.44).

Таблица 2.44. Значение критерия Фишера

	Значение $F$ -критерия при $f_{ад}$								
	1	2	3	4	5	6	12	24	$\infty$
2	18,5	19,2	19,2	19,3	19,3	19,3	19,4	19,5	19,5
3	10,1	9,6	9,3	9,1	9	8,9	8,7	8,6	8,5
4	7,7	6,9	6,6	6,4	6,3	6,2	5,9	5,8	5,6
5	6,6	5,8	5,4	5,2	5,1	5	4,7	4,5	4,4
6	6	5,1	4,8	4,5	4,4	4,3	4	3,8	3,7
7	5,6	4,7	4,4	4,1	4	3,9	3,6	3,4	3,2
8	5,3	4,5	4,1	3,8	3,7	3,6	3,3	3,1	2,9
10	5	4,1	3,7	3,5	3,3	3,2	2,9	2,7	2,5

По табл. 2.44, при  $f_{ад} = 4$  и  $f_{\bar{y}} = 2$   $F_T = 19,3$ , т. е.  $F_p = 8,21 < F_T = 19,3$ . Следовательно, уравнение прочности  $R_{28}$  пригодно для описания исходной зависимости в исследованных пределах изменения факторов.

Теперь можно приступить к решению задачи. Первым ограничением является обеспечение жесткости бетонной смеси, которая не должна быть выше 30 с. Из анализа уравнения жесткости видно, что при прочих равных условиях минимальную жесткость будет иметь смесь, в которой доля песка примерно равна  $r = 0,4$  ( $x_2 \sim 0$ ). Принимая  $x_2 = 0$  и подставляя это значение в уравнение, получим

$$Ж = 23 - 4,5x_1 - 15x_3 + 7,4x_1^2 + 3,4x_3^2.$$

Определяем предельные значения факторов  $x_1$  и  $x_3$ , обеспечивающих значение жесткости смеси не более 30 с;

а) при  $x_1 = -1$  ( $B/C = 0,35$ )

$$Ж = 23 + 4,5 + 7,4 - 15x_3 + 3,4x_3^2 = 35 - 15x_3 + 3,4x_3^2.$$

Подставляя в данное уравнение значение  $Ж = 30$  с, получаем

$$30 = 35 - 15x_3 + 3,4x_3^2 \text{ или } 3,4x_3^2 - 15x_3 + 5 = 0.$$

Отсюда

$$x_3 = (+15 \pm \sqrt{(225 - 68)})/6,8 = (15 \pm 12,53)/6,8 = 0,364 \text{ и } 4,05; x_3 \geq 0,364.$$

Второе значение  $x_3 = 4,05$  находится за пределами эксперимента и не учитывается. Следовательно, из условия получения жесткости не более 30 с,  $x_3$  должно быть в интервале 0,364...1 или в натуральных значениях:

$$B_1 = x_0 + x_3 \Delta X = 180 + 0,364 \cdot 10 \approx 184 \text{ л/м}^3; \quad B_2 = x_0 + x_3 \Delta X = 180 + 1 \cdot 10 = 190 \text{ л/м}^3; \text{ т. е. в пределах } B = 184 \dots 190 \text{ л/м}^3;$$

$$\text{б) при } x_1 = -0,5 (B/C = 0,375) \quad x_3 \geq -0,177; \quad B = 178 \dots 190 \text{ л/м}^3;$$

$$\text{в) при } x_1 = 0 (B/C = 0,4) \quad x_3 \geq -0,427; \quad B = 176 \dots 190 \text{ л/м}^3;$$

$$\text{г) при } x_1 = +0,5 (B/C = 0,425) \quad x_3 \geq -0,456; \quad B = 175,4 \dots 190 \text{ л/м}^3;$$

$$\text{д) при } x_1 = +1 (B/C = 0,45) \quad x_3 = -0,25; \quad B = 178 \dots 190 \text{ л/м}^3.$$

Для рассмотренных случаев определяются условия получения максимальной ранней прочности, т. е.  $R_3/R_{28\text{max}}$ :

$$\text{а) для } x_1 = -1 \text{ и } x_2 = 0 (B/C = 0,35 \text{ и } r = 0,4) \\ (R_3/R_{28}) 100 = 61 + 5 + 5,5x_3 = 66 + 5,5x_3 \text{ и } R_3/R_{28\text{max}} \text{ достигается при } x_3 = +1.$$

Отсюда  $(R_3/R_{28})100=71,5\%$ . При этом  $Ж=23+4,5-15+7,4+3,4=23,3$   $Ж < 30$  с;  $R_{28}=376+57-17=416$  кгс/см<sup>2</sup>=41,6 МПа;

б) для  $x_1=0$  и  $x_2=0$  ( $B/C=0,45$  и  $r=0,4$ )  $(R_3/R_{28})100=61\%$  и  $Ж < 30$  с достигается при значении  $x_3 \geq -0,427$  и  $V=176$  л/м<sup>3</sup>, при этом  $R_{28}=376$  кгс/см<sup>2</sup>=37,6 МПа;

в) для  $x_1=+1$  и  $x_2=0$  ( $B/C=0,45$  и  $r=0,4$ )  $(R_3/R_{28})100=61-5-5,5x_3=56-5,5x_3$ ; при  $x_3=-0,41$   $(R_3/R_{28})100=58,25\%$ ;  $R_{28}=376-57-7=312$  кгс/см<sup>2</sup>=31,2 МПа.

Таким образом:

для бетона  $R_{28}=40$  МПа и прочностью, равной 70% от  $R_{28}$ ,  $x_1=-1$ ;  $B/C=0,35$ ;  $x_2=0$ ;  $r=0,4$ ;  $x_3=+1$ ;  $V=190$  л/м<sup>3</sup>;  $Ж \leq 30$  с;

для бетона  $R_{28}=30$  МПа и прочностью, равной 60% от  $R_{28}$ ,  $x_1=+1$ ;  $B/C=0,45$ ;  $x_2=0$ ,  $r=0,4$ ;  $x_3=-0,4$ ;  $V=176$  л/м<sup>3</sup>;  $Ж \leq 30$  с.

Аналогично производят расчеты для остальных параметров.

Расчет адекватности для уравнения жесткости приводим по данным табл. 2.38:

$$S_{\Delta}^2 = \sum \Delta^2 / f_{\Delta} = 141 / [17 - 7 - (3 - 1)] = 17,63;$$

$$F_p = 17,63 / 7 = 2,52 \leq 19,3 \text{ (по табл. 2.44 } f_{\Delta} = 8 \text{ и } f_y = 2).$$

Принятый состав бетона проверяют опытным путем и корректируют для производственного применения с учетом влажности заполнителей.

### 2.5.3. Лабораторная работа № 7. Ускоренный способ оценки качества цемента в бетоне и назначение состава бетона

**Цель работы.** Освоить методику ускоренного способа оценки качества цемента в бетоне и назначения состава бетона требуемой прочности.

**Введение.** Ускоренный способ оценки качества цемента в бетоне и назначения состава бетона рекомендуется применять в заводских условиях при отсутствии данных об активности цемента.

Для ускорения оценки качества цемента в бетоне и одновременного назначения состава бетона требуемой прочности используется линейная зависимость

прочности бетона от цементно-водного отношения  $R_0 = f(C/V)$ .

Для этого достаточно изготовить бетонные смеси с тремя водоцементными (0,7...0,36) или соответственно с цементно-водным (1,43...2,8) отношениями. Из этих смесей изготовить образцы, которые следует или пропарить, или выдержать в условиях нормальной температуры и влажности и испытать на сжатие в суточном или ином возрасте. По полученным данным строят зависимость  $R_0 = f(C/V)$ . Использование накопленных данных и графиков позволяет установить цементно-водное отношение для получения требуемой прочности бетона в заданное время, на основе которого и определяется состав бетона.

**Содержание лабораторной работы.** Работа состоит из нескольких заданий, каждое из которых выполняется одной бригадой. Бригада подбирает состав бетона и определяет активность цемента, используя для этих целей ускоренный способ оценки качества цемента в бетоне и назначения состава бетона требуемой прочности [14]. Работа рассчитана на 3 ч.

**Задание 1.** Подобрать состав тяжелого бетона с прочностью 20 МПа, если после пропаривания прочность бетона при сжатии должна быть равна 70% от заданной прочности. Подвижность бетонной смеси 5 см. Материалы: портландцемент с неизвестной активностью (ее следует определить); песок кварцевый  $M_{кр}=2$ ; щебень известняковый —  $D_{наиб}=20$  мм, водопоглощение 1,5%.

**Задание 2.** Подобрать состав тяжелого бетона с прочностью 20 МПа после твердения в нормальных условиях. Подвижность бетонной смеси 5 см. Образцы испытать в возрасте 28 сут. Материалы те же, что и в задании 1.

**Задание 3.** Подобрать состав тяжелого бетона с прочностью 30 МПа, если после пропаривания прочность бетона при сжатии должна быть равна 70% от заданной прочности. Жесткость бетонной смеси 10 с по ГОСТ 10181.1—81. Материалы: портландцемент с неизвестной активностью (ее следует определить); песок кварцевый —  $M_{кр}=3$ ; щебень гранитный —  $D_{наиб} = 20$  мм, водопоглощение — 1%.

**Указания по проведению лабораторной работы.**

1. Каждая бригада, состоящая из трех звеньев, изготовляет три состава бетонной смеси с цементно-водным отношением соответственно 1,43; 2 и 2,8.

2. Расход материалов на замес, из которого может быть отформовано три серии образцов по три образца с размером ребра 100 мм каждого состава бетонной смеси, приведен в табл. 2.45.

Таблица 2.45. Расход материалов на замес

Состав бетонной смеси	Ц/В В/Ц	Расход материалов на замес, кг				
		цемента	песка	крупного заполнителя	воды	воды на поглощение крупным заполнителем
1	$\frac{1,43}{0,7}$	2,5	8,3	13,5	1,74	$\frac{13,5}{100} W_{из}$
2	$\frac{2}{0,5}$	3,6	7,5	12,3	1,8	$\frac{12,3}{100} W_{из}$
3	$\frac{2,8}{0,36}$	7,7	4,5	10,6	2,73	$\frac{10,6}{100} W_{из}$

Примечания: 1. Расход материалов на замес дан с некоторым избытком. 2. Для образцов-кубов с ребром 150 мм расход каждого материала следует умножить на 3,4.

3. Каждое звено изготавливает замес и определяет среднюю плотность бетонной смеси, подвижность (см) или жесткость (с) (см. §. 1.3).

4. Из каждого состава бетонной смеси формируют девять образцов. Смесь уплотняют на виброплощадке до полного прекращения ее оседания, выравнивания и появления на всей поверхности цементного раствора [14].

5. После выдерживания в течение 2 ч шесть образцов каждого состава подвергают тепловой обработке при атмосферном давлении по следующему режиму: если бетонная смесь изготовлена на портландцементе, то 3 ч — подъем, 6 ч — выдерживание при температуре изотермического прогрева 80...85°C и 2 ч — охлаждение; если использован шлакопортландцемент или пуццолановый портландцемент, то 3 ч — подъем, 8 ч — выдерживание при температуре изотермического прогрева 90...95°C и 2 ч — охлаждение. Оставшиеся три образца каждого состава выдерживают в течение 1 сут в формах при комнатной температуре.

6. Через 12 ч с момента отключения пара образцы

извлекают из форм. Три образца испытывают для определения прочности на сжатие по ГОСТ 10180—78. Три пропаренных образца и три образца, не подвергавшихся пропариванию, каждого состава извлекаются из форм и помещают в камеру нормального твердения для определения прочности бетона при сжатии в возрасте 28 сут.

По результатам испытания образцов на сжатие определяют среднюю прочность бетона каждого состава, которая переводится к прочности кубов с ребром 150 мм с помощью переводных коэффициентов (см. § 1.3).

Для построения зависимости  $R_b = f(\text{Ц/В})$  (где  $R_b$  — прочность бетона при сжатии) по горизонтальной оси откладывают значения цементно-водного отношения, а по вертикальной — прочность бетона при сжатии (МПа). На рис. 2.9 прямая  $R_1$  выражает зависимость  $R_1 = f(\text{Ц/В})$ , где  $R_1$  — прочность бетона при сжатии, испытанного через 12 ч после тепловой обработки.

В случае, если прямая не проходит через три точки и какая-нибудь из них по ординате отклоняется от возможного отклонения на проходимой прямой с той же абсциссой более чем на 10%, то опыт необходимо повторить [14]. Пример построения функции  $R_1 = f(\text{Ц/В})$  приведен на рис. 2.9. Для выбора цементно-водного отношения и для получения бетона заданной прочности на заводе достаточно построить функцию  $R_1 = f(\text{Ц/В})$ . При этом, если по остыванию бетона требуется получить, например, прочность бетона при сжатии, равную 70%-ной заданной прочности 20 МПа, т. е. необходимо найти цементно-водное отношение для прочности 14 МПа, то через точку, соответствующую этой прочности, на оси ординат надо провести прямую, параллельную оси абсцисс до пересечения с прямой  $R_1$ . Точка на абсциссе дает искомую величину  $\text{Ц/В} = 1,6$ . Если же требуется по-

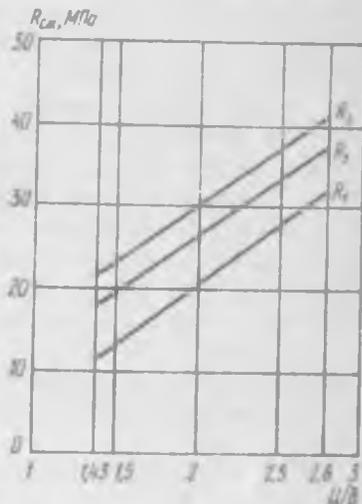


Рис. 2.9. Прочность бетона при сжатии в зависимости от цементно-водного отношения:

$R_1$  — испытанного через 12 ч после пропаривания;  $R_2$  — то же, через 28 сут последующего нормального твердения;  $R_3$  — нормального твердения в возрасте 28 сут

лучить заданную прочность сразу после остывания, линию, параллельную оси абсцисс, следует провести через точку ординаты, соответствующую 20 МПа. В этом случае  $C/V=2$ .

Когда требуемая прочность должна быть обеспечена к возрасту 28 сут, необходимо построить функцию  $R_3=f(C/V)$ , где  $R_3$  — прочность бетона при сжатии нормального твердения в возрасте 28 сут (рис. 2.9). Если необходимо иметь прочность пропаренного бетона через 27 сут, последующего твердения в нормальных условиях, нужно построить функцию  $R_2=f(C/V)$ , где  $R_2$  — прочность пропаренного бетона при сжатии, испытанного через 27 сут, последующего нормального твердения (рис. 2.9).

Для построения функций  $R_3=f(C/V)$  и  $R_2=f(C/V)$  можно воспользоваться значениями  $M$ , приведенными в табл. 2.46, и вычислить соответственно  $R_3$  и  $R_2$  при двух других значениях цементно-водного отношения, например 1,43 и 2,8.

Ниже приводится пример расчета и построения этих зависимостей.

**Пример.** Пусть прочность бетона после пропаривания при  $C/V=1,43$  равна 11,5 МПа, а при  $C/V=2,8$  — 31 МПа.

Тогда, используя данные табл. 2.46, получим:

а) для  $R_3$ :

$$\text{при } C/V=1,43 \quad R_3=R_1M/100=11,5 \cdot 158/100=18,2 \text{ МПа};$$

$$\text{при } C/V=2,8 \quad R_3=R_1M/100=31 \cdot 120/100=37,2 \text{ МПа.}$$

На рис. 2.9 прямая  $R_3=f(R_1)$ ;

б) для  $R_2$ :

$$\text{при } C/V=1,43 \quad R_2=R_1M/100=11,5 \cdot 177/100=20,4 \text{ МПа};$$

$$\text{при } C/V=2,8 \quad R_2=R_1M/100=31 \cdot 135/100=42 \text{ МПа.}$$

На рис. 2.9 прямая  $R_2=f(R_1)$ .

Приведенные расчеты, выполненные с привлечением данных табл. 2.46, проверяют при испытании образцов, выдержанных после пропаривания 27 сут в нормальных условиях, и образцов, не подвергшихся пропариванию, выдержанных в нормальных условиях 28 сут.

Для определения активности применяемого для бетона цемента используется зависимость  $R_1=f(R_u)$  (см. табл. 2.46).  $R_1$  как функция  $R_u$  может быть установлена при различных значениях  $C/V$ . Поэтому необходимо принять то цементно-водное отношение, которому соответствует наименьшая величина коэффициента вариации ( $C_v$ ). Из табл. 2.46 видно, что наименьшей величи-

Таблица 2.46. Показатели прочности бетона в зависимости от цементно-водного отношения [14]

Ц/В	$R_1=f(R_1)$			$R_2=f(R_2)$			$R_3=f(R_3)$			$R_4=f(R_4)$			$R_5=f(R_5)$		
	M	S	C <sub>в</sub>												
1,43	177	44	25	158	37	23	44	16	36	67	14	21	116	18	15
2	148	23	16	131	22	17	71	12	20	78	11	15	115	17	15
2,5	138	24	17	123	20	17	96	19	20	81	13	16	112	16	14
2,8	135	22	17	120	28	18	110	20	18	83	14	17	110	16	14
	$R_2=R_2M/100$			$R_3=R_3M/100$			$R_4=R_4M/100$			$R_5=R_5M/100$			$R_6=R_6M/100$		
	$R_1=R_1M/100$			$R_2=R_2M/100$			$R_3=R_3M/100$			$R_4=R_4M/100$			$R_5=R_5M/100$		

Примечания: 1. M — среднее значение коэффициента прочности, %; S — среднеквадратическое отклонение, %; C<sub>в</sub> — коэффициент вариации, %. 2. R<sub>1</sub> и R<sub>2</sub> соответственно прочность пропаренного бетона, испытанного через 12 ч после отключения пара и через 27 сут последующего твердения в нормальных условиях; R<sub>3</sub> — прочность бетона нормального твердения в возрасте 28 сут.

ной  $C_0$  является 15%. Тогда  $R_n$  определяют по формуле, приведенной в табл. 2.46:

$$R_n = R_1 100/M, \quad (2.45)$$

где  $M = 85\%$  (см. табл. 2.46).

При  $Ц/В = 2,8$  (см. табл. 2.46 и рис. 2.9)  $R_1 = 31$  МПа. Тогда  $R_n = 31 \cdot 100/85 = 36,5$  МПа.

Установив значение цементно-водного отношения для бетона заданной прочности в установленные сроки после пропаривания или нормального твердения образцов (см. рис. 2.9), производится расчет состава бетона на  $1 \text{ м}^3$ .

Для этого по табл. 2.26 (см. лабораторную работу № 5) принимается расход воды ( $\text{л}/\text{м}^3$ ). Затем определяют расход цемента. Зная фактическую среднюю плотность бетонной смеси, расход воды и цемента, определяют расход заполнителей в бетоне ( $\text{кг}/\text{м}^3$ ):

$$Щ + П = \rho - Ц - В. \quad (2.46)$$

Приняв значение  $r$  по табл. 2.47, рассчитывают содержание в бетоне ( $\text{кг}/\text{м}^3$ ):

$$\text{песка } П = (Щ + П) r, \quad (2.47)$$

$$\text{щебня } Щ = (Щ + П) - П. \quad (2.48)$$

В результате получается состав бетонной смеси в уплотненном состоянии на  $1 \text{ м}^3$ . Затем изготавливается проверочный замес. После изготовления замеса определяют подвижность (жесткость) смеси. Если при двукратном определении получается требуемая по заданию осадка конуса (см) или жесткость (с), состав подобран правильно. Если подвижность (жесткость) смеси отличается от заданной, необходимо откорректировать состав бетонной смеси согласно §. 1.3. Одновременно проверяют плотность уплотненной бетонной смеси. Если она отличается от расчетной более чем на 1%, состав бетона следует пересчитать по уточненной средней плотности бетонной смеси. Далее, используя полученный состав бетона, определяется производственный состав бетона с учетом влажности песка и крупного заполнителя.

При подборе состава бетона в лабораторных условиях используются сухие материалы. При выдаче состава бетона на производство необходимо полученный в лабораторных условиях состав бетона пересчитать на производственный состав, т. е. с учетом влаги, содержащейся в заполнителях. Ниже приведен пример опре

Таблица 2.47. Значения  $r$ 

Расход цемента в бетоне, кг/м <sup>3</sup>	Бетон на гравии				Бетон на щебне			
	Наибольшая крупность заполнителей, мм							
	10	20	40	70	10	20	40	70
200	0,42	0,4	0,38	0,37	0,45	0,43	0,41	0,4
300	0,4	0,38	0,36	0,35	0,43	0,41	0,4	0,39
400	0,38	0,36	0,35	0,34	0,4	0,38	0,37	0,36
500	0,36	0,35	0,34	0,33	0,38	0,36	0,35	0,34

деления производственного состава тяжелого бетона и расчета материалов на замес бетоносмесителя.

**Пример.** 1. Расход компонентов на 1 м<sup>3</sup> бетона (кг): цемент — 336, песок — 736, щебень — 1232, вода — 150. Суммарная масса материалов 2454 кг. Состав по массе равен: 1 : 2,19 : 3,67 при В/Ц=0,47.

2. Предположим, что в производственных условиях щебень и песок имеют соответственно влажность 1 и 4% по массе. В этом случае на 1 м<sup>3</sup> бетона необходимо взять влажного щебня (1232×1,01)=1244 кг, а песка — (736×1,04)=765 кг. В таком количестве влажных заполнителей содержится 41 л воды. На эту величину и следует уменьшить объем воды, указанный в вышеприведенном составе.

3. Производственный состав тяжелого бетона равен (кг/м<sup>3</sup>): цемент — 336, щебень — 1244, песок — 765, вода — 109.

Суммарная масса материалов та же (2454 кг), а производственный состав по массе равен: 1 : 2,28 : 3,7 при В/Ц=0,47.

Расчет количества материалов на замес бетоносмесителя производится следующим образом. Необходимо учесть, что в новых моделях бетоносмесителей вместимость барабана указывается в литрах готового замеса бетонной смеси ( $V_{зам}$ ), например 330, 800, 1600 л.

Для расчета расхода каждого материала на замес бетоносмесителя следует количество каждого компонента из производственного состава пересчитать по формулам:

$$Ц_{зам} = ЦV_{зам}/1000, \quad (2.49)$$

$$П_{зам} = ПV_{зам}/1000 \text{ и т. д.}, \quad (2.50)$$

где Ц, П и т. д. — производственный расход материалов на 1 м<sup>3</sup> бетона, кг.

При использовании старых моделей бетоносмесителей, когда вместимость смесителя указывается по суммарному объему загрузки сухих материалов, расход материалов на замес можно определить используя коэффициент выхода бетонной смеси:

$$\beta = 1000 / \left( \frac{\text{Ц}}{\rho_{\text{цц}}} + \frac{\text{П}}{\rho_{\text{пп}}} + \frac{\text{Щ}}{\rho_{\text{шш}}} \right), \quad (2.51)$$

где  $\rho_{\text{цц}}$ ,  $\rho_{\text{пп}}$ ,  $\rho_{\text{шш}}$  — насыпная масса цемента, песка и щебня.

Для рассматриваемого примера

$$\beta = \frac{1000}{336/1,1 + 736/1,56 + 1232/1,5} = 0,627.$$

Зная  $\beta$ , определяют объем бетона на замес. Например, при вместимости бетоносмесителя 500 л объем бетона в замесе будет равен:  $0,500 \beta$  ( $\text{м}^3$ ). Умножая массу каждого компонента производственного состава на объем бетона одного замеса, получается расход материалов на замес бетоносмесителя, а именно:

$$\text{Ц} = \text{Ц}_{\text{пронз}} \cdot 0,500\beta; \quad (2.52)$$

$$\text{П} = \text{П}_{\text{пронз}} \cdot 0,500\beta \text{ и т. д.} \quad (2.53)$$

Для рассматриваемого примера:

$$\text{Ц} = 336 \cdot 0,500 \cdot 0,627 = 105 \text{ кг};$$

$$\text{П} = 736 \cdot 0,500 \cdot 0,627 = 238 \text{ кг и т. д.}$$

## 2.6. Проектирование состава легких бетонов на пористых заполнителях и исследование основных факторов, влияющих на их состав

В настоящее время в строительной практике применяют различные виды легких бетонов на пористых заполнителях. Ввиду их большого разнообразия пока нет единой методики расчета таких бетонов. Поэтому в практикуме наряду с предусмотренным в новой программе проектированием состава легкого бетона на пористых заполнителях (Лабораторная работа № 8) приведены также дополнительно лабораторные работы № 9 и 10 по проектированию состава эффективных легких бетонов, а именно, высокопрочного и поризованного легких бетонов на пористых заполнителях.

Целью проектирования состава легких бетонов является получение требуемой прочности на сжатие и

средней плотности, а при необходимости и других свойств (морозостойкости, усадки и др.) при наименьшем расходе вяжущего на 1 м<sup>3</sup> бетона. При проектировании состава легких бетонов необходимы следующие исходные данные: требуемая прочность бетона с указанием срока ее достижения и условий твердения, наибольшая допустимая средняя плотность бетона в сухом состоянии, показатели подвижности или жесткости бетонной смеси с учетом условий формирования и вида изделий.

Для получения легких бетонов на пористых заполнителях, отвечающих предъявляемым требованиям, используется ряд технологических приемов, которые в процессе проектирования состава бетона позволяют регулировать отдельные их свойства.

Большое значение при проектировании состава легких бетонов имеет выбор пригодных для данного бетона крупного и мелкого заполнителей, определение и оценка их средней плотности, прочности, зернового состава и других показателей.

### *2.6.1. Лабораторная работа № 8. Проектирование состава легкого бетона на пористых заполнителях и исследование основных факторов, влияющих на его состав*

**Цель работы.** Освоить методику проектирования состава легкого бетона на пористых заполнителях, исследовать основные технологические факторы, влияющие на получение бетона заданных параметров.

**Введение.** Подбор состава легкого бетона производится по такому же принципу, что и тяжелого бетона, — на основе расчетно-экспериментального метода с той лишь разницей, что вследствие значительного разнообразия свойств и характеристик пористых заполнителей (даже в пределах одного и того же вида) невозможно пользоваться формулами для расчета прочности бетона и необходимо учитывать особенности свойств легких бетонов и влияние на них качества заполнителя. При изготовлении легкобетонных изделий и конструкций наибольшее применение находит керамзитобетон, поэтому в лабораторной работе приводится пример подбора состава керамзитобетона.

**Содержание лабораторной работы.** Работа состоит из нескольких заданий. Каждое звено выполняет задание по указанию преподавателя. Задания могут отли-

чаться прочностью и средней плотностью бетона в сухом состоянии, удобоукладываемостью бетонной смеси. При одинаковой прочности бетона переменным фактором может быть марка и вид цемента, крупность гравия, соотношение между песком и гравием и др. Примерные задания для проектирования состава керамзитобетона приводятся ниже.

Задание 1. а) 1-е звено: подобрать состав керамзитобетона с прочностью 7,5 МПа, средней плотностью 900 кг/м<sup>3</sup>; жесткость бетонной смеси 6..7 с (ГОСТ 10181.1—81). Материалы: портландцемент марки 400; керамзитовый гравий —  $D_{\text{наиб}}=20$  мм; песок — керамзитовый, доля песка  $r$  в смеси заполнителя равна 0,35; б) 2-е звено выполняет то же, что и звено 1, но уменьшается доля песка в смеси заполнителя  $r=0,3$ ; в) 3-е звено выполняет работу, аналогичную звену 1, но увеличивается доля песка в смеси заполнителя  $r=0,4$ .

Задание 2. а) 4-е звено: подобрать состав конструктивного керамзитобетона с прочностью 20 МПа, средней плотностью 1600 кг/м<sup>3</sup>; жесткость бетонной смеси 6..7 с. Материалы: портландцемент марки 400; керамзитовый гравий —  $D_{\text{наиб}}=20$  мм; песок — кварцевый; б) 5-е звено выполняет ту же работу, что звено 4, но использует портландцемент марки 500; в) 6-е звено выполняет ту же работу, что звено 4, но жесткость бетонной смеси принимает 15 с.

**Указание по проведению лабораторной работы.** В основу проектирования состава легких бетонов положено экспериментальное построение зависимостей  $R_b = f(\rho_b)$  и  $\rho_b = f(\rho_c)$  для данных конкретных условий (исходные материалы, активность цемента, подвижность смеси и др.). Для построения этих зависимостей готовят три опытных замеса равноподвижных бетонных смесей с различными расходами цемента.

Проектирование состава легких бетонов на пористых заполнителях по расчетно-экспериментальному методу складывается из трех последовательно выполняемых этапов: 1) предварительно назначается (рассчитывается) ориентировочный расход составляющих материалов на 1 м<sup>3</sup> бетона и на приготовление опытного замеса объемом  $V$  (л) для трех составов бетона, отличающихся расходом цемента, например один замес с расходом цемента, выбранным по табличным данным, и два других, отличающихся от принятого значения на  $\pm 20..25\%$ ; 2) в процессе приготовления пробных замесов уточняются составы бетона, изготавливаются конт-

рольные образцы, по которым и определяют показатели прочности при сжатии и среднюю плотность бетона в сухом состоянии и др.; 3) по полученным результатам испытаний строят кривые зависимости прочности и средней плотности, а также водопотребности бетонной смеси от расхода цемента и определяют искомый состав бетона.

1 этап. Для предварительного назначения ориентировочного расхода составляющих материалов на 1 м<sup>3</sup> и на опытные замесы бетонной смеси объемом V (л) производятся следующие расчеты.

1. Назначается ориентировочный расход цемента в зависимости от требуемой прочности легкого бетона, от марки керамзита и средней плотности керамзитобетона в соответствии с рекомендациями табл. 2.48.

Таблица 2.48. Ориентировочный расход цемента (марки 400) для керамзитобетона плотного строения различных классов (жесткость бетонной смеси Ж=25...30 с по ГОСТ 10181-62 или 6...7 с по ГОСТ 10181.1-81)

Марка керамзита	Расход цемента, кг/м <sup>3</sup> , керамзитобетона класса:								
	В3,5	В5	В7,5	В10	В15	В22,5			
350...400	220	230	270						
	950	950	1100	—	—	—	—	—	—
450...500	210	220	250	270	300	340	400		
	1050	1050	1100	1700	1400	1800	1500	—	—
550...600	200	210	230	250	280	320	380	470	500
	1150	1150	1200	1800	1400	1800	1500	1800	1700
700		200	220	240	270	310	360	440	470
	—	1250	1250	1800	1400	1800	1500	1800	1700
800				230	250	300	340	480	460
	—	—	—	1800	1500	1800	1500	1800	1600

Примечание. Предварительно определяется, к какому классу исходя из заданной прочности относится керамзитобетон, а также к какой марке по насыпной плотности относится применяемый для приготовления легкого бетона керамзит и соответствует ли его прочность при сдавливании в цилиндре этой марке. Над чертой — расход цемента; под чертой — средняя плотность бетона в высушенном состоянии. При использовании цемента марки 300 норма его расхода для бетонов класса В3,5; В5; В7,5; В10; В15 соответственно повышается на 5, 7, 10, 15 и 20%. При использовании цемента марки 500 его расход понижается для бетонов класса В7,5; В15; В20; В22,5 соответственно на 10, 12, 14, 16%. При повышении подвижности бетонной смеси до 2,5 и 8 см расход цемента соответственно повышается на 7, 15, 20%, а при повышении жесткости смеси до 40...60 с расход цемента снижается на 10%.

чатся прочностью и средней плотностью бетона в сухом состоянии, удобоукладываемостью бетонной смеси. При одинаковой прочности бетона переменным фактором может быть марка и вид цемента, крупность гравия, соотношение между песком и гравием и др. Примерные задания для проектирования состава керамзитобетона приводятся ниже.

**Задание 1.** а) 1-е звено: подобрать состав керамзитобетона с прочностью 7,5 МПа, средней плотностью 900 кг/м<sup>3</sup>; жесткость бетонной смеси 6...7 с (ГОСТ 10181.1—81). Материалы: портландцемент марки 400; керамзитовый гравий —  $D_{\text{наиб}}=20$  мм; песок — керамзитовый, доля песка  $r$  в смеси заполнителя равна 0,35; б) 2-е звено выполняет то же, что и звено 1, но уменьшается доля песка в смеси заполнителя  $r=0,3$ ; в) 3-е звено выполняет работу, аналогичную звену 1, но увеличивается доля песка в смеси заполнителя  $r=0,4$ .

**Задание 2.** а) 4-е звено: подобрать состав конструктивного керамзитобетона с прочностью 20 МПа, средней плотностью 1600 кг/м<sup>3</sup>; жесткость бетонной смеси 6...7 с. Материалы: портландцемент марки 400; керамзитовый гравий —  $D_{\text{наиб}}=20$  мм; песок — кварцевый; б) 5-е звено выполняет ту же работу, что звено 4, но использует портландцемент марки 500; в) 6-е звено выполняет ту же работу, что звено 4, но жесткость бетонной смеси принимает 15 с.

**Указание по проведению лабораторной работы.** В основу проектирования состава легких бетонов положено экспериментальное построение зависимостей  $R_b = f(\rho_c)$  и  $\rho_b = f(\rho_c)$  для данных конкретных условий (исходные материалы, активность цемента, подвижность смеси и др.). Для построения этих зависимостей готовят три опытных замеса равноподвижных бетонных смесей с различными расходами цемента.

Проектирование состава легких бетонов на пористых заполнителях по расчетно-экспериментальному методу слагается из трех последовательно выполняемых этапов: 1) предварительно назначается (рассчитывается) ориентировочный расход составляющих материалов на 1 м<sup>3</sup> бетона и на приготовление опытного замеса объемом  $V$  (л) для трех составов бетона, отличающихся расходом цемента, например один замес с расходом цемента, выбранным по табличным данным, и два других, отличающихся от принятого значения на  $\pm 20...25\%$ ; 2) в процессе приготовления пробных замесов уточняются составы бетона, изготавливаются конт-

рольные образцы, по которым и определяют показатели прочности при сжатии и среднюю плотность бетона в сухом состоянии и др.; 3) по полученным результатам испытаний строят кривые зависимости прочности и средней плотности, а также водопотребности бетонной смеси от расхода цемента и определяют искомый состав бетона.

**I этап.** Для предварительного назначения ориентировочного расхода составляющих материалов на 1 м<sup>3</sup> и на опытные замесы бетонной смеси объемом V (л) производятся следующие расчеты.

1. Назначается ориентировочный расход цемента в зависимости от требуемой прочности легкого бетона, от марки керамзита и средней плотности керамзитобетона в соответствии с рекомендациями табл. 2.48.

**Таблица 2.48.** Ориентировочный расход цемента (марки 400) для керамзитобетона плотного строения различных классов (жесткость бетонной смеси Ж=25 ... 30 с по ГОСТ 10181—62 или 6 ... 7 с по ГОСТ 10181.1—81)

Марка керамзита	Расход цемента, кг/м <sup>3</sup> , керамзитобетона класса:							
	B3,5	B5	B7,5	B10	B15	B22,5		
350...400	220	230	270	—	—	—		
	950	950	1100	—	—	—		
450...500	210	220	250	270	300	340	400	
	1050	1050	1100	1700	1400	1800	1500	—
550...600	200	210	230	250	280	320	380	470
	1150	1150	1200	1800	1400	1800	1500	1800
700	—	200	220	240	270	310	360	440
	—	1250	1250	1800	1400	1800	1500	1800
800	—	—	—	230	250	300	340	480
	—	—	—	1800	1500	1800	1500	1800
								1700
								1600

**Примечание.** Предварительно определяется, к какому классу исходя из заданной прочности относится керамзитобетон, а также к какой марке по насыпной плотности относится применяемый для приготовления легкого бетона керамзит и соответствует ли его прочность при сдавливании в цилиндре этой марке. Над чертой — расход цемента; под чертой — средняя плотность бетона в высушенном состоянии. При использовании цемента марки 300 норма его расхода для бетонов класса B3,5; B5; B7,5; B10; B15 соответственно повышается на 5, 7, 10, 15 и 20%. При использовании цемента марки 500 его расход понижается для бетонов класса B7,5; B15; B20; B22,5 соответственно на 10, 12, 14, 16%. При повышении подвижности бетонной смеси до 2,5 и 8 см расход цемента соответственно повышается на 7, 15, 20%, а при повышении жесткости смеси до 40 ... 60 с расход цемента снижается на 10%.

Таблица 2.49. Ориентировочный расход воды на приготовление керамзитобетонной смеси плотного строения

Показатель удобоукладываемости смеси		Расход воды, л/м <sup>3</sup> , керамзитобетона на песке				
		кварцевом		керамзитовом		
осадка конуса, см	жесткость, с	при насыпной плотности керамзитового гравия				
		по ГОСТ 10181—81		300	500	800
—	22...25	175...190	165...180	155...170	210...225	200...215
—	15...20	185...200	175...190	165...180	225...240	215...235
—	7...13	195...210	185...200	175...190	250...270	240...260
—	4...7	205...220	195...210	185...200	275...300	265...290
3...5	—	215...230	205...220	195...210	300...325	290...315
6...8	—	225...240	215...230	205...220	325...350	315...340
9...12	—	235...250	225...240	215...230	350...375	340...360

Примечание. Таблица рассчитана на сухой керамзитовый гравий с  $D_{\text{наиб}}=20$  мм и на песок средней крупности. При  $D_{\text{наиб}}=10$  мм расход воды увеличивается на 20 л на 1 м<sup>3</sup>, при  $D_{\text{наиб}}=40$  — уменьшается на 15 л. При использовании мелкого песка или зоны уноса расход воды увеличивается на 10 л/м<sup>3</sup> бетона. Данные относятся к керамзитобетону, содержащему 35...45% песка от общего объема смеси заполнителей. При меньшем или большем содержании песка расход воды соответственно уменьшается или увеличивается на 1...1,5 л на каждый процент изменения содержания песка. В случае применения пуццолановых или шлакопортландских цементов расход воды увеличивается на 15...20 л/м<sup>3</sup> бетона.

2. Назначается ориентировочный расход воды в соответствии с заданным показателем подвижности или жесткости смеси по табл. 2.49 в зависимости от вида песка и насыпной плотности керамзитового гравия.

3. Рассчитывается ориентировочный расход крупного и мелкого заполнителя, кг на 1 м<sup>3</sup> бетонной смеси, исходя из заданной средней плотности бетона в сухом состоянии по формуле

$$Z_0 = \rho_6 - 1,15Ц, \quad (2.54)$$

где  $\rho_6$  — заданная плотность сухого бетона, кг/м<sup>3</sup>; 1,15Ц — масса цементного камня в бетоне с учетом химически связанной гидратной воды в нем, кг.

Затем определяют расход гравия и песка по массе, кг на 1 м<sup>3</sup>:

$$\Pi = \frac{3\rho^n}{\rho^n + (1-r)\rho^r}, \quad (2.55)$$

где  $\rho^n$ ,  $\rho^r$  — насыпная плотность соответственно фракционированного песка и гравия;  $r$  — доля песка в смеси заполнителей (выбирают по данным табл. 2.50, суммируя зерновой состав фракций до 5 мм).

Т а б л и ц а 2.50. Ориентировочные зерновые составы смеси фракционированных заполнителей для легкого бетона на керамзитовом гравии

Размер зерна, мм	Зерновой состав заполнителя, % от суммы объемов отдельных фракций смеси для бетона				
	конструктивно-теплоизоляционного			конструкционного	
	при наибольшей крупности зерен, мм				
	10	20	40	10	20
До 1,25	25	20	15	25	20
1,25 ... 2,5	15	15	10	20	15
2,5 ... 5	10	10	10	10	15
5 ... 10	50	25	15	45	20
10 ... 20	—	30	20	—	30
20 ... 40	—	—	30	—	—

Примечание. При переходе от гравия к щебню содержание песчаных фракций увеличивается на 5...7% и соответственно уменьшается содержание фракций крупного заполнителя.

Расход гравия (кг)

$$Г = З - П. \quad (2.56)$$

Ориентировочный расход крупного заполнителя для конструктивно-теплоизоляционных бетонов в объемном исчислении может быть равным примерно  $0,90 \text{ м}^3$  на  $1 \text{ м}^3$  бетона. Для конструкционного керамзитобетона этот расход может быть определен в зависимости от марки керамзита (по насыпной плотности) и класса керамзитобетона по табл. 2.51.

Зная общий расход песка и гравия, можно рассчитать их расход по отдельным фракциям, пользуясь рекомендациями оптимальных зерновых составов смеси заполнителей в соответствии с табл. 2.50. Для расчета расхода каждой фракции заполнителей по массе вначале необходимо определить соотношение фракций по массе. Для этого перемножают объемные доли соотношений фракций заполнителей из табл. 2.50 на значение соответствующей насыпной плотности каждой фракции, определенную до начала расчета. Затем рассчитывают расход каждой фракции заполнителей на  $1 \text{ м}^3$  бетонной смеси по массе (кг), исходя из найденных выше расходов песка и гравия по формулам (2.55) и (2.56). Определив расход материалов на  $1 \text{ м}^3$  бетонной смеси при принятом значении расхода цемента (см. табл.

Таблица 2.51. Ориентировочный расход керамзитового гравия для конструкционного керамзитобетона

Класс керамзитобетона	Марка керамзитового гравия	Расход керамзита, м <sup>3</sup> на м <sup>3</sup> бетона, при плотности керамзитобетона, кг/м <sup>3</sup>				
		1400	1500	1600	1700	1800
В10	400	0,70	0,64	0,54	—	—
	500	0,74	0,67	0,57	—	—
	600	0,80	0,74	0,67	0,56	—
	700	0,84	0,77	0,70	0,60	—
В15	500	0,77	0,70	0,58	0,50	—
	600	0,83	0,77	0,68	0,58	—
	700	0,85	0,80	0,72	0,60	0,50
	800	0,88	0,83	0,75	0,67	0,53
В20	500	—	0,71	0,59	0,57	—
	600	0,84	0,78	0,69	0,59	0,50
	700	0,86	0,82	0,73	0,62	0,52
	800	0,89	0,84	0,77	0,68	0,54
В22,5	600	—	0,80	0,70	0,60	0,50
	700	—	0,84	0,75	0,67	0,53
	800	—	0,86	0,80	0,70	0,56

2.48), аналогично рассчитывают расходы материалов для двух других составов при расходе цемента  $\pm 20 \dots 25\%$  против табличного.

Затем рассчитывают ориентировочные расходы материалов на три опытных замеса объемом  $V$  (л).

II этап. 1. Готовят опытные замесы с корректированием содержания воды в каждом из них до получения заданной подвижности или жесткости бетонной смеси, исходя из положения, что каждому составу бетонной смеси при принятом режиме уплотнения соответствует оптимальный расход воды, обеспечивающий наибольшую среднюю плотность при сохранении однородности и наибольшую прочность. Для каждого опытного замеса изготавливают 3...4 серии бетонной смеси с разным расходом воды (объем замеса 1,5...2 л), отличающиеся на  $\pm 10 \dots 20\%$  от табличного значения. При этом бетонная смесь должна обладать связностью, иметь характерный блеск и комковаться при сжатии в руке. Отсутствие блеска и связности указывает на недоста-

ток воды. Отделение цементного молока при перемешивании является признаком избытка воды в смеси.

Для каждого состава при разном расходе воды определяют среднюю плотность бетонной смеси (в сосуде вместимостью 1 л), вибрируя ее в течение заданно-

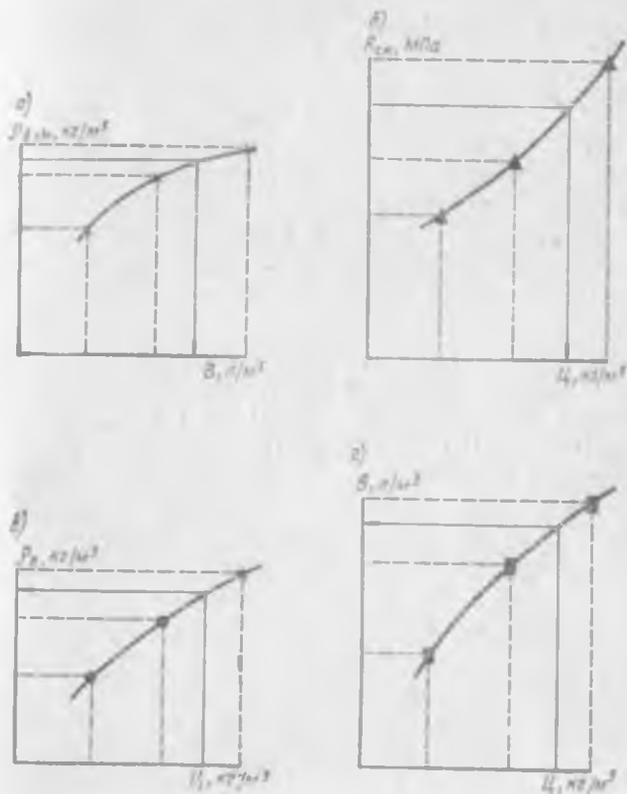


Рис. 2.10. Пример построения графических зависимостей при подборе состава керамзитобетона:

*a* — определение оптимального расхода воды; *б* — зависимость прочности керамзитобетона от расхода цемента; *в* — зависимость средней плотности керамзитобетона от расхода цемента; *г* — определение водосодержания бетонной смеси по установленному расходу цемента

го времени уплотнения. По результатам определения плотности смеси строят график  $\rho_{б.см} = f(B)$  при постоянном времени уплотнения (рис. 2.10) и уточняют количество воды, обеспечивающее получение заданной средней плотности бетонной смеси ( $\text{кг/м}^3$ ):

$$\rho_{б.см} = \rho_б + (B - 0,15Ц). \quad (2.57)$$

2. Для каждого замеса исходя из полученной средней плотности бетонной смеси в уплотненном состоянии определяется фактический расход материалов на  $1 \text{ м}^3$  бетона по методике, изложенной в § 1.3.

3. Из бетонной смеси каждого замеса изготавливают образцы-кубы размером  $100 \times 100 \times 100$  мм с их последующим твердением в нормальных температурных условиях или с тепловой обработкой по принятому режиму; образцы испытывают в установленный срок для определения средней плотности бетона в высушенном состоянии и прочности бетона при сжатии.

**III этап.** На основании полученных результатов испытаний производят построение зависимостей прочности и средней плотности бетона от расхода цемента на  $\text{м}^3$  бетона (рис. 2.10, б, в), а также зависимость содержания воды в бетонной смеси от расхода цемента при заданном показателе подвижности или жесткости (рис. 2.10, г).

Назначение искомого состава, удовлетворяющего требованиям, указанным в задании, делается на основе полученных зависимостей  $R_b = f(C)$ ;  $\rho_b = f(C)$  и  $B = f(C)$  (рис. 2.10) методом графической интерполяции. Сначала определяется по кривой (рис. 2.10, б) необходимый расход цемента, обеспечивающий заданную прочность бетона; по найденному расходу цемента (рис. 2.10, в) находят соответствующие ему среднюю плотность бетона (в сухом состоянии) и затем (рис. 2.10, г) уточняют необходимое водосодержание бетонной смеси. Расход заполнителей определяется из фактической (интерполированной) средней плотности уплотненной бетонной смеси. Далее, в соответствии с принятым зерновым составом заполнителей, рассчитывают расход каждой фракции для мелкого и крупного заполнителей.

В тех случаях, когда оптимальное содержание заполнителей уточняется экспериментальным способом, необходимо сделать еще две серии аналогичных опытных замесов (по три замеса в каждой серии соответственно трем принятым расходам цемента) при двух значениях  $\gamma$  — с увеличенным и уменьшенным на 10% от исходного содержания песка в первой серии. В этом случае (при девяти опытных замесах) вместо одной кривой на каждом графике (см. рис. 2.10, б, в, г) будет по три кривых для каждого значения  $\gamma$ . Оптимальное содержание заполнителей должно обеспечить заданные показатели по удобоукладываемости смеси,

средней плотности и прочности бетона при сжатии при наименьшем расходе цемента.

Результаты расчетов и испытаний каждого звена заносят в табл. 2.52.

Т а б л и ц а 2.52. Результаты проектирования состава керамзитобетона

№ задания	Заданная прочность бетона, МПа	Средняя плотность бетона, кг/м <sup>3</sup>	Жесткость бетонной смеси, с	Марка цемента	Фактическая средняя плотность, кг/м <sup>3</sup>		Фактический расход материалов, кг/м <sup>3</sup>				
					бетонной смеси	бетона	цемента	песка	гравия	воды	
1	7,5	900	6...7	400							
2	7,5	900	6...7	400							
3	7,5	900	6...7	400							
4	20,0	1600	6...7	400							
5	20,0	1600	6...7	500							
6	20,0	1600	15	400							

По результатам работы трех звеньев делается сравнительная оценка эффективности подобранных составов керамзитобетона, с учетом стоимости материалов на 1 м<sup>3</sup> бетона.

Проектирование состава керамзитобетона может быть также выполнено с применением планирования эксперимента и с использованием математико-статистических методов по аналогии с проектированием состава тяжелого бетона в лабораторной работе № 6.

### 2.6.2. Лабораторная работа № 9. Проектирование состава высокопрочного легкого бетона на пористых заполнителях и исследование основных факторов, влияющих на его состав

**Цель работы.** Освоить методику проектирования состава высокопрочного легкого бетона на пористых заполнителях, исследовать основные технологические факторы, влияющие на получение бетона заданных параметров.

**Введение.** Одним из путей повышения эффективности применения сборного железобетона и снижения материалоемкости изделий является изготовление конст-

рукций из легких бетонов класса В22,5...В40. Проектирование состава высокопрочного легкого бетона производится расчетно-экспериментальным путем с использованием при определении предварительного состава зависимостей и рекомендаций, учитывающих влияние на свойства бетонной смеси и бетона цемента, заполнителей и других факторов [3, 6 и др.].

Эффективными заполнителями для высокопрочных легких бетонов являются керамзитовый гравий и щебень класса А с насыпной плотностью 700...800 кг/м<sup>3</sup> и прочностью не ниже 4...7 МПа (при стандартном испытании сдавливанием в цилиндре). При проектировании состава бетона необходимо обеспечить получение более высокой прочности растворной составляющей, что достигается применением цементов марок 500, 600 и высококачественных природных кварцевых и полевошпатных песков. С повышением прочности бетона относительное объемное содержание растворной составляющей в составе бетона должно возрастать, что обуславливает повышенную среднюю плотность высокопрочных легких бетонов (1700...1900 кг/м<sup>3</sup>).

**Содержание лабораторной работы.** Лабораторная работа состоит из нескольких заданий. Каждая бригада выполняет три задания по указанию преподавателя. Задания могут отличаться прочностью и средней плотностью бетона, жесткостью бетонной смеси. При одинаковой прочности бетона переменным фактором может быть марка цемента, вид и крупность заполнителей, вид и количество химических добавок и др. Примерные задания для проектирования состава высокопрочного легкого бетона приводятся ниже.

Задание 1. а) 1-е звено: подобрать состав легкого бетона с прочностью 30 МПа и средней плотностью в сухом состоянии 1700 кг/м<sup>3</sup>; жесткость бетонной смеси 4...7 с. Материалы: портландцемент марки 500; керамзитовый гравий —  $D_{\text{наиб}} = 20$  мм, соотношение между фракциями керамзита — 5...10 и 10...20, 40:60 (по массе), марка 700, прочность, определенная сдавливанием в цилиндре, 5,1 МПа, плотность зерен керамзита в цементном тесте — 1,23 кг/л, пустотность 0,42; песок кварцевый плотностью 2,65 г/см<sup>3</sup> и водопотребностью 6%; б) 2-е звено: выполняет ту же работу, что и звено 1, но применяет песок с водопотребностью 8%; в) 3-е звено: выполняет ту же работу, что и 1-е звено, но применяет еще более мелкий песок с водопотребностью 10%.

Задание 2. а) 4-е звено: подобрать состав легкого бетона прочностью 27,5 МПа и средней плотностью в сухом состоянии 1800 кг/м<sup>3</sup>, подвижностью 1...2 см. Материалы: портландцемент марки 500; керамзитовый гравий —  $D_{\text{н\text{ам}б}} = 10$  мм марки 700; прочность, определенная сдавливанием в цилиндре, 5,4 МПа; плотность зерен керамзита в цементном тесте 1,26 кг/л; пустотность 0,46; песок кварцевый плотностью 2,65 г/см<sup>3</sup> и водопотребностью 6%; б) 5-е звено: выполняет ту же работу, что 4-е звено, но подбирается равноподвижная бетонная смесь с добавкой суперпластификатора; в) 6-е звено: выполняет ту же работу, что, звено 4, но применяется более жесткая бетонная смесь с жесткостью 20 с.

Указания по проведению лабораторной работы. Проектирование состава конструкционных легких бетонов производится расчетно-экспериментальным путем с построением зависимости  $R_0 = f(\text{Ц})$  и  $\rho_0 = f(\text{Ц})$  для данных конкретных условий по аналогии с лабораторной работой № 8. Для построения этих зависимостей каждое звено готовит три опытных замеса равноподвижных бетонных смесей с различными расходами цемента.

Для получения составов легкого бетона при минимальном расходе цемента необходимо правильно выбирать материалы для бетона. Марку цемента рекомендуется назначать в зависимости от класса бетона в соответствии с табл. 2.53.

Т а б л и ц а 2.53. Марки цементов, применяемых для приготовления легких бетонов

Класс легкого бетона	Марки цементов	
	рекомендуемые	допускаемые
B22,5	500	400, 600
B27,5	500	400, 600
B30	500	400, 600
B40	600	500

Минимальная прочность крупного заполнителя должна быть не менее, чем указано в табл. 2.54, а насыпная плотность не более, чем указано в табл. 2.55.

Таблица 2.54. Минимальная прочность крупных пористых заполнителей в зависимости от заданной марки бетона

Заданный класс бетона по прочности на сжатие	Марка крупного заполнителя по прочности на сжатие	Прочность на сжатие заполнителей при сдавливании в цилиндре, МПа		
		пористого гравия	повнестого щебня, кроме аглопоритового	аглопоритового щебня
B22,5	150	3,5	1,8	1,0
B27,5	200	4,5	2,2	1,2
B30	250	5,5	2,7	1,4
B40	300	6,5	3,3	1,6

Таблица 2.55. Максимальная марка по насыпной плотности крупных заполнителей в зависимости от заданной средней плотности бетона, кг/м<sup>3</sup>

Заданная средняя плотность бетона в высушенном состоянии, кг/м <sup>3</sup>	Пористый гравий	Пористый щебень
1600	700	600
1700	800	700
1800	900	800

Проектирование состава конструкционного легкого бетона, складывается из трех этапов: I. Предварительно рассчитывают ориентировочный расход составляющих материалов на 1 м<sup>3</sup> бетона и на приготовление опытного замеса объемом  $V_n$  для трех составов бетона, отличающихся расходом цемента на 10..20% меньше и больше, чем в исходном составе. II. При приготовлении пробных замесов уточняют составы, изготавливают контрольные образцы бетона, по которым и определяют показатели прочности при сжатии и среднюю плотность бетона. III. По полученным результатам испытаний строят график  $R_0 = f(\rho)$  и по нему принимают действительное значение расхода цемента и уточняют расходы других материалов.

II этап. Предварительный состав бетонов устанавливают в следующем порядке.

1. Определяют расход цемента в зависимости от заданной прочности (бетона), марки цемента и крупного заполнителя (табл. 2.56 и 2.57).

Таблица 2.56. Ориентировочный расход цемента для расчета состава бетонов на пористых заполнителях с предельной крупностью 20 мм и плотном песке, с жесткостью бетонной смеси 5 ... 6 с

Класс бетона	Рекомендуемая марка цемента	Марка пористого заполнителя по прочности зерна			
		150	200	250	300
B22,5	500	420	390	360	330
B27,5	500	—	450	410	380
B30	500	—	—	480	450
B40	600	—	—	570	540

Таблица 2.57. Коэффициенты изменения расходов цемента при изменении его марки, вида песка, предельной крупности заполнителя и удобоукладываемости бетонной смеси

Характеристика материалов	Класс бетона			
	B22,5	B27,5	B30	B40
Цемент марки:				
400	1,15	1,2	1,25	—
500	1	1	1	1,1
600	0,9	0,88	0,85	1
Песок:				
плотный	1	1	1	1
пористый	1,1	1,1	1,1	1,1
Наибольшая крупность заполнителя, мм				
40	0,93	0,95	0,95	0,95
20	1	1	1	1
10	1,07	1,05	1,05	1,05
Жесткость смеси, с:				
5 ... 6	1	1	1	1
6 ... 13	0,9	0,9	0,9	0,9
13 ... 20	0,85	0,85	0,85	0,85
Подвижность смеси, см:				
1 ... 2	1,07	1,07	1,07	1,07
2 ... 5	1,1	1,1	1,1	1,1
8 ... 12	1,25	1,25	—	—

2. Устанавливают начальный расход воды в зависимости от заданной жесткости бетонной смеси, наибольшей крупности и вида крупного заполнителя (табл. 2.58).

3. Определяют объемную концентрацию крупного заполнителя в зависимости от расхода цемента и воды, плотности зерен крупного заполнителя и водопотребности песка (табл. 2.59). Объемная концентрация круп-

Т а б л и ц а 2.54. Минимальная прочность крупных пористых заполнителей в зависимости от заданной марки бетона

Заданный класс бетона по прочности на сжатие	Марка крупного заполнителя по прочности на сжатие	Прочность на сжатие заполнителей при сдаливании в цилиндре, МПа		
		пористого гравия	пористого щебня, кроме аглопоритового	аглопоритового щебня
B22,5	150	3,5	1,8	1,0
B27,5	200	4,5	2,2	1,2
B30	250	5,5	2,7	1,4
B40	300	6,5	3,3	1,6

Т а б л и ц а 2.55. Максимальная марка по насыпной плотности крупных заполнителей в зависимости от заданной средней плотности бетона, кг/м<sup>3</sup>

Заданная средняя плотность бетона в высушенном состоянии, кг/м <sup>3</sup>	Пористый гравий	Пористый щебень
1600	700	600
1700	800	700
1800	900	800

Проектирование состава конструкционного легкого бетона, складывается из трех этапов: I. Предварительно рассчитывают ориентировочный расход составляющих материалов на 1 м<sup>3</sup> бетона и на приготовление опытного замеса объемом  $V_d$  для трех составов бетона, отличающихся расходом цемента на 10...20% меньше и больше, чем в исходном составе. II. При приготовлении пробных замесов уточняют составы, изготавливают контрольные образцы бетона, по которым и определяют показатели прочности при сжатии и среднюю плотность бетона. III. По полученным результатам испытаний строят график  $R_0 = f(\rho)$  и по нему принимают действительное значение расхода цемента и уточняют расходы других материалов.

II этап. Предварительный состав бетонов устанавливают в следующем порядке.

1. Определяют расход цемента в зависимости от заданной прочности (бетона), марки цемента и крупного заполнителя (табл. 2.56 и 2.57).

Таблица 2.56. Ориентировочный расход цемента для расчета состава бетонов на пористых заполнителях с предельной крупностью 20 мм и плотном песке, с жесткостью бетонной смеси 5...6 с

Класс бетона	Рекомендуемая марка цемента	Марка пористого заполнителя по прочности зерна			
		150	200	250	300
B22,5	500	420	390	360	330
B27,5	500	—	450	410	380
B30	500	—	—	480	450
B40	600	—	—	570	540

Таблица 2.57. Коэффициенты изменения расходов цемента при изменении его марки, вида песка, предельной крупности заполнителя и удобоукладываемости бетонной смеси

Характеристика материалов	Класс бетона			
	B22,5	B27,5	B30	B40
Цемент марки:				
400	1,15	1,2	1,25	—
500	1	1	1	1,1
600	0,9	0,88	0,85	1
Песок:				
плотный	1	1	1	1
пористый	1,1	1,1	1,1	1,1
Наибольшая крупность заполнителя, мм				
40	0,93	0,95	0,95	0,95
20	1	1	1	1
10	1,07	1,05	1,05	1,05
Жесткость смеси, с:				
5...6	1	1	1	1
6...13	0,9	0,9	0,9	0,9
13...20	0,85	0,85	0,85	0,85
Подвижность смеси, см:				
1...2	1,07	1,07	1,07	1,07
2...5	1,1	1,1	1,1	1,1
8...12	1,25	1,25	—	—

2. Устанавливают начальный расход воды в зависимости от заданной жесткости бетонной смеси, наибольшей крупности и вида крупного заполнителя (табл. 2.58).

3. Определяют объемную концентрацию крупного заполнителя в зависимости от расхода цемента и воды, плотности зерен крупного заполнителя и водопотребности песка (табл. 2.59). Объемная концентрация круп-

2. Для каждого замеса определяют фактический расход материалов на  $1 \text{ м}^3$  бетона по методике, изложенной в § 1.3.

3. Из бетонной смеси каждого замеса изготавливают образцы-кубы размером  $100 \times 100 \times 100 \text{ мм}$ , которые твердеют в нормальных температурных условиях или с тепловой обработкой по принятому режиму. Контрольные образцы испытывают в установленные сроки, определяя прочность бетона при сжатии и среднюю плотность бетона. Если на принятых материалах нельзя получить заданную среднюю плотность бетона при допустимых значениях  $\phi$ , то диапазон варьирования расхода цемента следует уменьшить так, чтобы объемная концентрация крупного заполнителя оказалась в допустимых пределах или принять другие заполнители.

III этап. По результатам испытаний производят построение зависимости прочности и средней плотности бетона от расхода цемента на  $1 \text{ м}^3$  бетона (по аналогии с рис. 2.10, б и в). По графику находят минимальное значение расхода цемента, обеспечивающее получение заданной прочности и средней плотности бетона и затем уточняют расходы других материалов.

Результаты испытаний и полученных расчетов каждого звена заносят в сводную табл. 2.60.

Т а б л и ц а 2.60. Результаты проектирования состава высокопрочного легкого бетона

№ задания	Заданная прочность бетона, МПа	Средняя плотность бетона, $\text{кг/м}^3$	Жесткость бетонной смеси, с	Марка цемента	Наибольшая крупность гравия $D_{\text{max}}$	Водопотребность песка, %	Фактическая средняя плотность, $\text{кг/м}^3$		Фактический расход материалов, $\text{кг/м}^3$								
							бетонной смеси	бетона	цемента	песка	гравия	воды					

По результатам работы трех звеньев делают сравнительную оценку эффективности подобранных составов бетона с учетом стоимости компонентов на  $1 \text{ м}^3$  бетона.

Проектирование и выбор состава конструкционного легкого бетона может быть выполнено с применением планирования эксперимента и с использованием математико-статистических методов по аналогии с лабораторной работой № 6.

### *2.6.3. Лабораторная работа № 10. Проектирование состава поризованного легкого бетона на пористых заполнителях и исследование основных факторов, влияющих на его состав*

**Цель работы.** Освоить методику проектирования состава поризованного легкого бетона на пористых заполнителях, исследовать основные технологические факторы, влияющие на получение бетона заданных параметров.

**Введение.** Ограждающие стеновые конструкции из легких бетонов часто не удовлетворяют требованиям по средней плотности бетона, превышение которой сверх требуемой ухудшает теплоизоляционные свойства стеновых конструкций и увеличивает теплотери.

Поризация легкого бетона на пористых заполнителях позволяет уменьшить среднюю плотность бетона, повысить связность и удобоукладываемость бетонной смеси, полностью или частично исключить из состава смеси песок, снизить водопотребность бетонной смеси, использовать более тяжелый крупный заполнитель. Легкие бетоны поризуют воздухововлекающими добавками или с помощью пено- или газообразователей. Прочность легких бетонов с поризованным цементным камнем определяется прочностью цементного камня и прочностью его сцепления с заполнителем.

Проектирование поризованного легкого бетона осуществляется по тому же принципу, что и легкого плотного бетона, с той разницей, что при расчете расхода составляющих материалов на пробные замесы по методу абсолютных объемов учитывается объем вовлеченного воздуха [2, 3].

**Содержание лабораторной работы.** Лабораторная работа состоит из нескольких заданий. Каждая бригада выполняет три задания по указанию преподавателя. Задания могут отличаться прочностью и средней плотностью бетона, удобоукладываемостью бетонной смеси. При одинаковой прочности бетона переменным фактором может быть расход и вид крупного заполнителя, вид воздухововлекающих, пено- или газообразующих добавок и др.

Примерные задания для проектирования состава поризованных воздухововлекающими добавками легких бетонов приводятся ниже.

Задание 1. а) 1-е звено: подобрать состав поризованного керамзитобетона с прочностью 5,0 МПа (отпускная прочность 4 МПа) со средней плотностью 900 кг/м<sup>3</sup> в сухом состоянии. Жесткость смеси 4...8 с. Материалы: портландцемент марки 400; керамзитовый гравий с предельной крупностью 20 мм и насыпной плотностью 480 кг/м<sup>3</sup>; плотность зерен гравия в цементном тесте 0,95 кг/л; мелкий заполнитель — кварцевый песок с модулем крупности 2,0 и плотностью 2,63 г/см<sup>3</sup>; воздухововлекающая добавка — СНВ.

б) 2-е звено выполняет ту же работу, что и 1-е, но расход воздухововлекающей добавки принимается на 25% больше.

в) 3-е звено выполняет ту же работу, что и 1-е, но расход воздухововлекающей добавки принимается на 25% меньше.

Задание 2. Это задание аналогично заданию 1, но вместо кварцевого песка принимается дробленый керамзитовый песок с насыпной плотностью 800 кг/м<sup>3</sup> и керамзитовый гравий фракций 5...10 и 10...20 мм, плотность зерен гравия в цементном тесте 0,9 кг/л.

Указания по проведению лабораторной работы. Состав поризованного керамзитобетона проектируют расчетно-экспериментальным способом с построением зависимости прочности и средней плотности легкого бетона от расходов цемента и воздухововлекающей добавки. Для этого каждое звено готовит три опытных замеса равноподвижных бетонных смесей с различными расходами цемента и с одним расходом добавки. Проектирование состава поризованного легкого бетона начинают с выбора материалов, позволяющих получить бетон с заданной прочностью и требуемой средней плотностью бетонной смеси.

При применении дробленых пористых песков рекомендуется использовать крупный заполнитель двух фракций — 10...20 и 20...40 мм. В случае применения кварцевого песка желательно использовать крупный заполнитель фракций 5...20 мм.

Зерновой состав дробленого пористого песка в бетонах с воздухововлекающими добавками рекомендуется:

Фракция, мм . . .	5...10	1,2...5	0,3...1,2	< 0,3
Соотношение по массе, % . . .	до 5	~ 30	~ 35	~ 0,3

При выборе крупного пористого заполнителя можно использовать данные, приведенные в табл. 2.61

Таблица 2.61. Рекомендуемые соотношения между марками крупных пористых заполнителей, прочностью и средней плотностью бетона

Класс бетона	Минимальная средняя плотность поризованного бетона в сухом состоянии, кг/м <sup>3</sup> , при марке крупного заполнителя							
	200	300	400	500	600	700	800	1000
B2,5	<u>700</u>	<u>800</u>	<u>900</u>	—	—	—	—	—
	—	—	950	1000	1100	—	—	—
B3,5	—	<u>800</u>	<u>850</u>	<u>900</u>	<u>1000</u>	<u>1100</u>	—	—
	—	—	—	1050	1150	1200	1250	—
B5	—	<u>850</u>	<u>900</u>	<u>950</u>	<u>1050</u>	<u>1150</u>	—	—
	—	—	—	1100	1200	1300	1350	1450
B7,5	—	—	<u>1000</u>	<u>1050</u>	<u>1100</u>	<u>1200</u>	—	—
	—	—	—	—	1250	1350	1450	1550

Примечания: 1. Над чертой приведены показатели средней плотности поризованного бетона на пористом гравии, под чертой — на пористом щебне. 2. Значения средней плотности указаны для бетонов на дробленом керамзитовом песке или без песка; при использовании шлакового песка указанные величины средней плотности следует увеличить примерно на 100 кг/м<sup>3</sup>, кварцевого песка — на 150 кг/м<sup>3</sup>.

После выбора материалов и определения их основных характеристик расчетно-экспериментальным способом подбирают исходный состав поризованного легкого бетона с заданными свойствами в такой последовательности:

1. Расход цемента назначают по данным табл. 2.62.
2. Расход воды ориентировочно определяют по табл. 2.63.
3. Расход крупного заполнителя определяют по формуле (2.58).
4. Расход песка определяют по формуле (2.59).
5. Ориентировочный объем вовлеченного воздуха для получения поризованного бетона слитной структуры находят расчетным путем:

$$V_{\text{в}} = \frac{1}{10} \left[ 1000 - \left( \frac{Ц}{\rho_{\text{к}}} + \frac{К}{\rho_{\text{к}}} + \frac{П}{\rho_{\text{п}}} + В \right) \right]. \quad (2.64)$$

Таблица 2.62. Ориентировочный расход цемента марки 400 в бетонах, поризованных воздухововлекающими добавками

Класс бетона	Расход цемента, кг/м <sup>3</sup> бетона, при марке пористого гравия или щебня, кг/м <sup>3</sup>									
	200	300	400	500	600	700	800	1000		
B2,5	230 ... 260	220 ... 230	210 ... 220 230 ... 260	— 210 ... 240	— 190 ... 220	—	—	—	—	
B3,5		230 ... 250	220 ... 230	210 ... 220 230 ... 250	200 ... 210 210 ... 240	—	—	—	—	
B5		250 ... 280	230 ... 250	220 ... 230 250 ... 290	210 ... 220 230 ... 260	200 ... 210	—	—	—	
B7,5			250 ... 280	230 ... 250	220 ... 230 250 ... 290	210 ... 220	—	—	—	

Примечания: 1. Над чертой — на пористом гравии, под чертой — на пористом щебне. 2. Наибольший — для бетонов на шлаковом и кварцевом песке, наименьший — на дробленном керамзитовом песке.

Таблица 2.63. Ориентировочный расход воды, принимаемый для изготовления легкого бетона с воздухововлекающими добавками

Крупный заполнитель	Вид песка	Ориентировочный расход воды, л/м <sup>3</sup> , при			
		осадке конуса, см		жесткости, с	
		до 5	5...10	до 7...8	8...15
Гравий (керамзит)	Дробленый керамзитовый	210 ... 240	240 ... 260	200 ... 230	170 ... 200
	Шлаковый	190 ... 220	220 ... 240	180 ... 210	150 ... 170
	Кварцевый	170 ... 190	200 ... 220	160 ... 190	150 ... 170
Щебень	Дробленый пористый (из щебня)	240 ... 270	270 ... 300	230 ... 270	200 ... 230

Примечания: 1. Расход воды указан с учетом воды, необходимой для приготовления рабочих составов порообразователей. 2. Расход воды указан для бетонов с содержанием: крупного заполнителя 0,9...1 м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup>; дробленого пористого песка около 0,3 м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup>; кварцевого песка 0,15...0,2 м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup>. При меньшем или большем расходе заполнителей расход воды соответственно изменяется на ±10%.

По этим данным 1-е звено принимает ориентировочный расход воздухововлекаемой добавки (табл. 2.64), а 2-е и 3-е звенья принимают расход добавки соответственно на 25% больше и меньше.

Таблица 2.64. Ориентировочный расход воздухововлекающих добавок для приготовления поризованных легких бетонов (% от массы цемента)

Микропенообразователь	Требуемый объем вовлеченного воздуха, %	Песок		
		дробленый керамзитовый	кварцевый	шлаковый
ЦНИИС—1 или абнетат натрия (СНВ)	4...8	0,02...0,1	0,04...0,15	0,05...0,15
	8...12	0,05...0,15	0,1...0,2	—
Гидролизованная кровь (ПО—6)	4...8	0,3...1	0,5...1,5	1...2
	8...12	0,5...1,5	1...2,5	—

6. Определив расход материалов на 1 м<sup>3</sup> бетонной смеси при принятом расходе цемента, каждое звено аналогично рассчитывает расход материалов для двух

других составов при расходе цемента  $\pm 20\%$  против принятого. Затем рассчитывают расход материалов на три опытных замеса объемом  $V_d$ .

7. Изготавливают опытные замесы и корректируют расход воды по заданным значениям подвижности бетонной смеси. Определяют среднюю плотность бетонной смеси.

8. Определяют фактический расход материалов на  $1 \text{ м}^3$  бетона по методике, изложенной в § 1.3.

9. Из бетонной смеси каждого замеса изготавливают образцы-кубы размером  $100 \times 100 \times 100 \text{ мм}$ , которые твердеют по принятому режиму. Образцы испытывают в установленные сроки, определяя прочность бетона при сжатии и среднюю плотность бетона.

10. Результаты испытаний и полученных расчетов каждое звено заносит в табл. 2.65.

11. По результатам испытаний образцов трех звеньев строят график (рис. 2.11) зависимости прочности и средней плотности бетона от расхода цемента при принятом расходе добавки и определяют оптимальный состав.

Учитывая возможные колебания основных показателей поризованного бетона в производственных условиях, рекомендуется принимать расчетную среднюю плотность бетона на 2...5% ниже, а прочность на 10...20% выше, чем требуется по заданию.

Результаты подбора состава бетона заносят в сводную табл. 2.66 и делают выводы об эффективности подобранных составов для одного класса бетона.

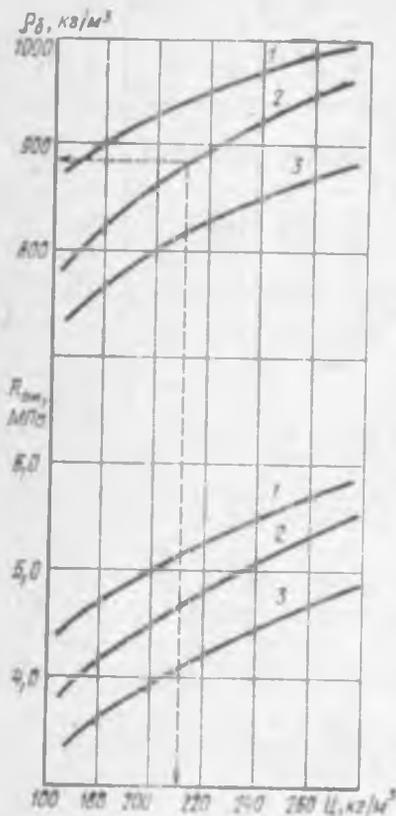


Рис. 2.11. Зависимость прочности и средней плотности керамзитобетона от расхода цемента и количества воздухововлекающей добавки:

1 — добавка 0,1%; 2 — то же, 0,15%;  
3 — то же, 0,2%

Т а б л и ц а 2.65. Результаты испытаний подбора поризованного бетона марки с прочностью 5 МПа, средней плотностью 900 кг/м<sup>3</sup>, жесткостью бетонной смеси 4...8 с

№ задания, замес	Принятый расход цемента, кг/м <sup>3</sup>	Средняя плотность, кг/м <sup>3</sup>			Предел прочности при сжатии, МПа		Фактический расход материалов, кг/м <sup>3</sup>							
		бетона			после твердения	в сухом состоянии	после твердения	в сухом состоянии	цемента	песка	керамзита	воды	добавки	
		бетонной смеси	после твердения	в сухом состоянии										

Т а б л и ц а 2.66. Результаты проектирования состава поризованного легкого бетона

№ задания	Задаваемая прочность бетона, МПа	Средняя плотность бетона, кг/м <sup>3</sup>	Жесткость бетонной смеси, с	Переменный фактор	Фактическая средняя плотность, кг/м <sup>3</sup>		Фактический расход материалов, кг/м <sup>3</sup>							
					бетонной смеси	бетона в сухом состоянии	цемента	песка	гравия	воды	добавки			
												бетонной смеси	бетона в сухом состоянии	

Проектирование и выбор состава поризованных легких бетонов может быть выполнено с применением планирования эксперимента и с использованием математико-статистических методов по аналогии с лабораторной работой № 6.

### 2.7. Лабораторная работа № 11. Подбор состава тяжелого бетона с использованием структурных характеристик

Цель работы. Освоить методику подбора состава тяжелого бетона с использованием структурных характеристик бетона и номограмм и исследовать факторы, влияющие на состав бетона\*.

\* По этой методике можно подбирать состав легких бетонов на пористых заполнителях с определением структурных характеристик по номограммам, построенным для легких бетонов.

**Введение.** Проектирование состава обычных видов бетонов производится часто с использованием эмпирических формул, связывающих прочность бетона со свойствами вяжущего, заполнителя и водоцементным отношением. Эти зависимости не учитывают влияние всех факторов, особенно качество заполнителей и количество цементного теста, на удобоукладываемость и прочность бетона. Разное качество заполнителя обычно трудно оценить одним усредненным коэффициентом, что приводит к значительным изменениям прочности бетона. Использование цементно-водного (водоцементного) отношения в качестве основного фактора, определяющего прочность бетона, может быть недостаточным даже для бетонов на одних и тех же материалах, так как изменение объемного содержания цементного теста при постоянном цементно-водном отношении приводит к изменению удобоукладываемости и прочности. Кроме того, зерна заполнителей смачиваются водой затворения, и структура цементного камня формируется при цементно-водном отношении, отличным от исходного.

Следовательно, при проектировании состава бетона необходимо применять такие зависимости, которые бы использовали показатели, более точно учитывающие влияние качества и количества цементного камня и характеристик исходных материалов на свойства бетонной смеси и бетона. В качестве таких показателей могут быть приняты две структурные характеристики бетона: 1) истинное водоцементное отношение ( $W$ ), под которым подразумевается такое значение водовяжущего отношения теста в бетоне, при котором бетонная смесь будет иметь такую же подвижность, сроки охватывания и период формирования структуры, как и чистое тесто; 2) объемная концентрация цементного камня в бетоне ( $C$ ), выраженная в долях от объема материалов.

Истинное водоцементное отношение, характеризующее водосодержание цементного камня в бетоне, совместно со степенью гидратации, определяет объем и характер пор, количество и «качество» новообразований и содержание зерен непрореагировавшего цемента в цементном камне. Структурные характеристики неразрывно связаны с водопотребностью заполнителя, которая определяется по методике, приведенной в лабораторной работе 1.

Истинное водоцементное отношение

$$W = (B - K_n P - K_{щ} Ш) / Ц, \quad (2.65)$$

где  $B$ ,  $Ц$ ,  $P$ ,  $Ш$  — расход воды, цемента, песка, щебня,  $\text{кг}/\text{м}^3$ ;  $K_n$ ,  $K_{щ}$  — водопотребность песка, щебня в относительных единицах.

Значение объемной концентрации цементного камня в бетоне

$$C = \frac{Ц}{1000} \left( W + \frac{1}{\rho_c} \right), \quad (2.66)$$

где  $Ц$  — расход цемента,  $\text{кг}/\text{м}^3$ ;  $\rho_c$  — плотность цемента,  $\text{г}/\text{см}^3$ .

Структурные характеристики  $C$  и  $W$ , являясь исходными параметрами при определении состава бетона, позволяют применять математические модели, описывающие зависимость свойств бетонной смеси и бетона в оптимизационных задачах по проектированию состава бетона.

Для оптимизации состава бетона достаточно использование двух математических моделей: удобоукладываемости бетонной смеси и прочности бетона. Применение многофакторных моделей позволяет наряду со структурными характеристиками включать количественные показатели исходных материалов (цемента и заполнителей), которые определяют свойства бетонной смеси и бетона не в меньшей степени, чем характеристики строения.

Показателями, характеризующими влияние цемента на удобоукладываемость бетонной смеси и прочность бетона, являются нормальная густота и марка цемента  $R_c$ . Показателями, характеризующими влияние заполнителей, являются водопотребность мелкого  $K_n$  и крупного  $K_{щ}$  заполнителей и относительная марка заполнителя  $R_{отн}$  [3], которая устанавливается по результатам его испытания непосредственно в бетоне с заданными значениями структурных характеристик. Методика определения  $R_{отн}$  основана на сравнении прочностных показателей двух бетонов: эталонного, за который принимается бетон фиксированной структуры на эталонных материалах, и сравниваемого. Оба бетона характеризуются одинаковым качеством и количеством цементного камня, т. е. равными значениями структурных характеристик.

Значения относительных марок характеристик заполнителей, определенные в бетоне контрольной структуры, приведены в табл. 2.67.

Т а б л и ц а 2.67. Относительные марки заполнителей

Вид заполнителей	Плотность $\rho$ , т/м <sup>3</sup>	$R_{отн}$
Песок стандартный кварцевый	2,63	1,0
Щебень гранитный	2,60	1,08
Щебень карбонатный	2,10	0,82
Песок строительный	2,63	0,96
Гравий речной	2,56	0,96
Щебень из гравия	2,56	1,03
Керамзитовый гравий	1,00	0,56

В результате планирования эксперимента и математической обработки полученных данных были разработаны многофакторные квадратичные модели, выражающие зависимость подвижности бетонной смеси и прочности бетона нормального твердения в возрасте 28 сут от вышеуказанных факторов. При подстановке в уравнения числовых значений характеристик исходных материалов  $R_c$ ,  $\Gamma$ ,  $K_n$ ,  $K_{щ}$ ,  $R_{отн}$  уравнения превращаются в двухфакторные: подвижности бетонной смеси  $OK=f_1(C, W)$ , прочности бетона  $R_{28}=f_2(C, W)$ .

Совместное решение данной системы уравнений приводит к полному нелинейному уравнению четвертой степени, решение которого производится по стандартной программе на электронно-счетных машинах типа «Наири» либо графическим способом.

Специальные номограммы, построенные с помощью ЭВМ (рис. 2.12, 2.13), позволяют достаточно просто определить структурные характеристики и затем рассчитать состав бетона.

**Содержание лабораторной работы.** Работа состоит из нескольких заданий, каждое из которых выполняется бригадой, состоящей из двух звеньев. Задания могут быть примерно такие же, как в лабораторной работе № 5, с целью сравнения полученных результатов при подборе бетона разными методами. Работа рассчитана на 4 ч.

Задание 1. а) 1-е звено должно подобрать состав тяжелого бетона с прочностью 30 МПа из бетонной смеси подвижностью — 5 см, с определением структурных характеристик по номограммам. Материалы: портландцемент марки 400, с нормальной плотностью  $\Gamma=26\%$ ; песок средней крупности, водопотребностью  $K_n=8\%$ , плотностью  $\rho=2,63$  г/см<sup>3</sup>; щебень гранитный с наибольшей крупностью  $D_{наиб}=20$  мм, истинной плот-

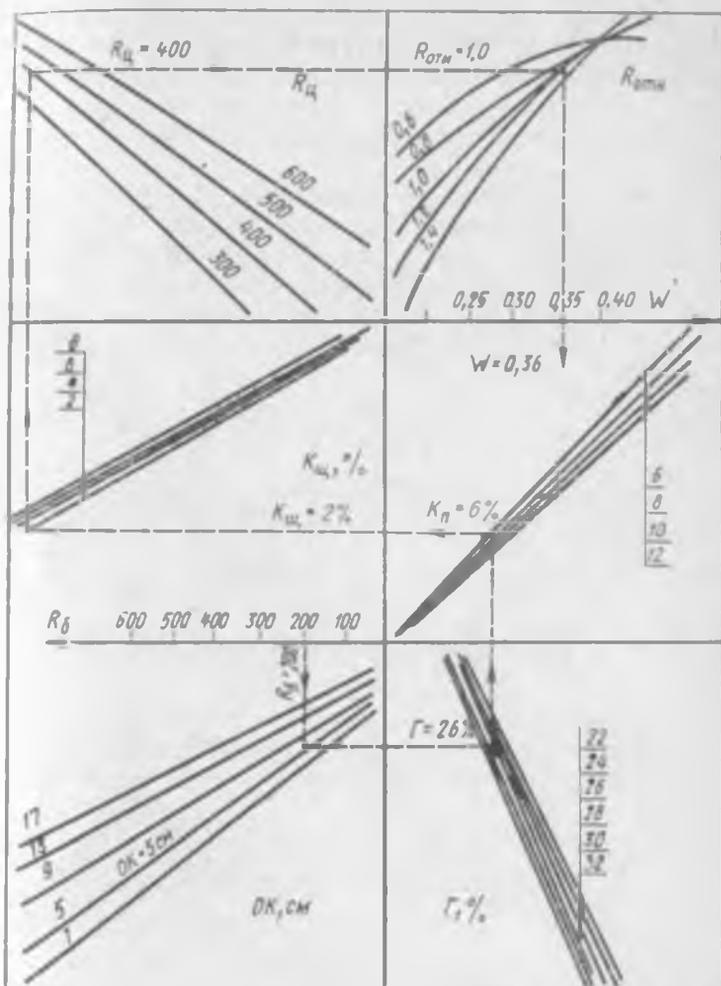


Рис. 2.12. Номограмма «прочность бетона — подвижность — истинное водоцементное отношение» ( $R_{б}$ —OK— $W$ )

ностью  $\rho = 2,6 \text{ г/см}^3$ , насыпной плотностью  $\rho_{\text{ш}}^0 = 1450 \text{ кг/м}^3$ , водопотребностью  $K_{\text{ш}} = 2\%$ , относительная марка заполнителя — 1,08; б) 2-е звено выполняет ту же работу, что и звено 1, но дополнительно исследует влияние подвижности бетонной смеси на состав бетона той же прочности путем параллельного подбора состава бетона с осадкой конуса 1 см.

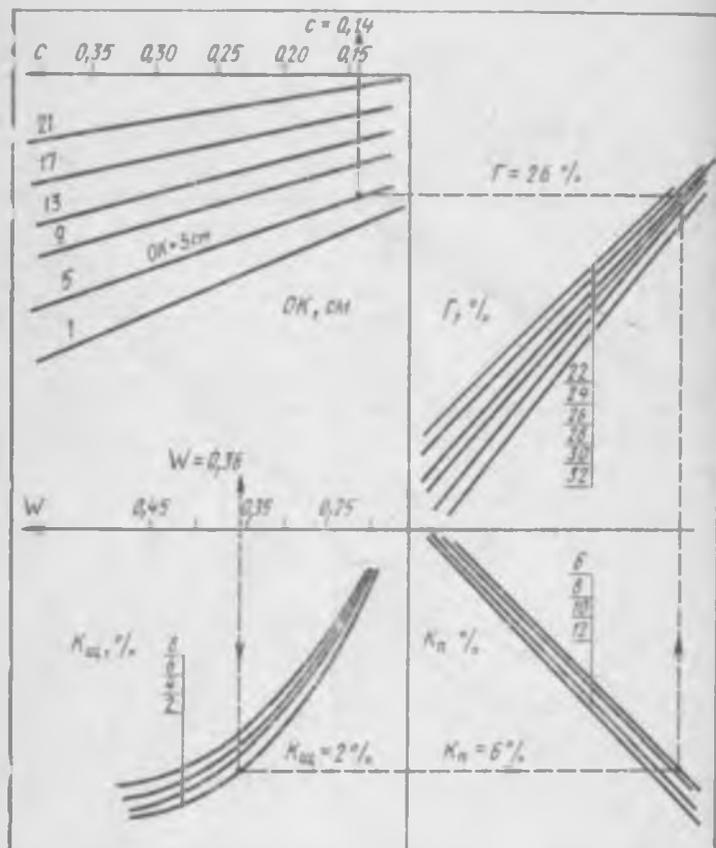


Рис. 2.13. Номограмма «истинное водоцементное отношение — подвижность — объемная концентрация цементного камня в бетоне» ( $W-OK-C$ )

Задание 2. а) 1-е звено должно подобрать состав тяжелого бетона с прочностью 20 МПа из бетонной смеси подвижностью 5 см. Материалы те же, что и в задании 1; б) 2-е звено, то же, что и 1-е звено, но дополнительно исследует влияние крупности песка на состав бетона путем параллельного подбора состава

бетона на мелком песке с водопотребностью  $K_n = 12\%$ .

**Указания по проведению лабораторной работы.** Каждое звено осуществляет подбор состава тяжелого бетона, исходя из конкретных условий задания по следующей схеме.

1. Пользуясь номограммой  $R_{28}—OK—W$  (см. рис. 2.12), определяют истинное водоцементное отношение  $W$  по заданной прочности бетона, подвижности бетонной смеси с учетом показателей свойств исходных материалов.

2. Пользуясь номограммой  $W—OK—C$  (см. рис. 2.13), определяют оптимальное значение объемной концентрации цементного теста  $C$  по установленному  $W$  с учетом показателей свойств исходных материалов и подвижности бетонной смеси.

3. Вычисляют расход цемента ( $\text{кг}/\text{м}^3$ ):

$$\text{Ц} = \frac{1000C}{1/\rho_{\text{ц}} + W}, \quad (2.67)$$

где  $\rho_{\text{ц}}$  — плотность цемента,  $\text{т}/\text{м}^3$ .

4. Определяют расход крупного заполнителя ( $\text{кг}/\text{м}^3$ )

$$\text{Щ} = 1000 \left/ \left( \frac{V_{\text{ш}}}{\rho_{\text{ш}}} \alpha + \frac{1}{\rho_{\text{ш}}} \right) \right., \quad (2.68)$$

где  $\alpha$  — коэффициент раздвижки зерен;

$$\alpha = 1 + 2C. \quad (2.69)$$

5. Находят объемную концентрацию песка  $S_n$  и расход песка ( $\text{кг}/\text{м}^3$ )

$$S_n = 1000 - \text{Ц}/\rho_{\text{ц}} - \text{Ц}W - \text{Щ}/\rho_{\text{ш}} - K_{\text{ш}}\text{Щ}; \quad (2.70)$$

$$\text{П} = S_n \rho_{\text{п}} / (1 + K_{\text{п}} \rho_{\text{п}}). \quad (2.71)$$

6. Рассчитывают количество воды затворения ( $\text{л}/\text{м}^3$ )

$$W = \text{Ц} + K_n \text{П} + K_{\text{ш}} \text{Щ}. \quad (2.72)$$

7. По найденным значениям расхода всех составляющих материалов на  $1 \text{ м}^3$  бетонной смеси рассчитывают расход компонентов на пробный замес принятого объема.

8. Из пробных замесов каждое звено изготавливает образцы-кубы размером  $100 \times 100 \times 100$  мм в количестве не менее 3 шт., определяет среднюю плотность свежесформованного бетона и рассчитывает фактический расход материалов на  $1 \text{ м}^3$  бетона. Если при изготов-

лении замесов подвижность смеси отличается от заданной, то корректируют подвижность бетонной смеси по методике, приведенной в § 1.3.

9. После твердения в нормальных условиях образцы испытывают в возрасте 28 сут. Результаты расчетов и испытаний, выполненных двумя звеньями каждой бригады, заносят в табл. 2.68.

Т а б л и ц а 2.68. Результаты подбора состава бетона с прочностью 30 МПа

№ бригады	№ опыта	Переменный фактор (подвижность смеси, см)	Средняя плотность бетонной смеси, кг/м <sup>3</sup>	Истинное водоцементное отношение, W	Концентрация цементного камня, С	Расход материалов на 1 м <sup>3</sup> бетона, кг				Предел прочности при сжатии через 28 сут. нормального твердения, МПа
						цемента	воды	песка	щебня	
1	1	5								
	2	1								

и т. д.

10. На основании полученных результатов испытаний двух звеньев проводят критический анализ данного способа подбора состава тяжелого бетона по сравнению с другим способом, например по лабораторной работе № 5, и анализируют влияние исследуемых факторов на расход цемента.

**Пример** выполнения подбора состава тяжелого бетона с определением структурных характеристик по номограммам.

**Задание.** Определить состав бетона с прочностью 20 МПа из бетонной смеси с подвижностью 5 см. Материалы: портландцемент М400, с нормальной плотностью  $\Gamma=26\%$ ; песок кварцевый, крупный, водопотребностью  $K_n=6\%$ , плотностью  $\rho_n=2,63$  г/см<sup>3</sup>; щебень гранитный с наибольшей крупностью  $D_{\text{наиб}}=20$  мм, истинной плотностью  $\rho_{\text{щ}}=2,6$  г/см<sup>3</sup>, насыпной плотностью  $\rho_{\text{щ}}^0=1500$  кг/м<sup>3</sup>, водопотребностью  $K_{\text{щ}}=2\%$ , относительной маркой заполнителя  $R_{\text{отн}}=1,0$ .

**Определение** состава бетона. 1. Пользуясь номограммой  $R_{28}-OK-W$  (рис. 2.12), определяют истинное водоцементное отношение для бетона с прочностью 20 МПа, изготовляемого из бетонной смеси

подвижностью 5 см с учетом показателей свойств ходных материалов. Порядок определения  $W$  пока пунктирной линией. Для  $R_{28}=20$  МПа и  $OK=5$   $W=0,36$ .

2. По номограмме  $W-OK-C$  (см. рис. 2.13) аналогично находят значение объемной концентрации цементного камня. Для  $W=0,36$   $C=0,14$ . Таким образом оптимальные значения структурных характеристик, удовлетворяющие одновременно требованиям подвижности бетонной смеси и прочности бетона,  $W=0,36$  и  $C=0,14$ .

3. Определяют расход цемента на 1 м<sup>3</sup> бетона:

$$\Pi = 1000C / (1/\rho_{\text{ц}} + W) = 1000 \cdot 0,14 / (1/3,1 + 0,36) = 210 \text{ кг/м}^3.$$

4. Определяют расход щебня на 1 м<sup>3</sup> бетона:

$$\begin{aligned} \text{Щ} &= 1000 / \left( \frac{V_{\text{щ}}}{\rho_{\text{щ}}} \alpha + \frac{1}{\rho_{\text{щ}}} \right) = 1000 / \left( \frac{0,42}{1,28} 1,5 + \frac{1}{2,6} \right) = \\ &= 1340 \text{ кг/м}^3, \end{aligned}$$

где  $V_{\text{щ}} = 1 - \rho_{\text{щ}}^0 / \rho_{\text{щ}} = 1 - 1,5/2,6 = 0,42$ ;  $\alpha = 1 + 2C = 1 + 2 \times 0,14 = 1,28$ .

5. Определяют объемную концентрацию песка:

$$\begin{aligned} S_{\text{п}} &= 1000 - \frac{\Pi}{\rho_{\text{ц}}} - \Pi W - \frac{\text{Щ}}{\rho_{\text{щ}}} - K_{\text{ш}} \text{Щ} = 1000 - \frac{210}{3,1} - \\ &- 210 \cdot 0,36 - \frac{1340}{2,6} - 0,02 \cdot 1340 = 314 \text{ л/м}^3. \end{aligned}$$

6. Определяют расход песка на 1 м<sup>3</sup> бетона:

$$\text{П} = S_{\text{п}} \rho_{\text{п}} / (1 + K_{\text{ш}} \rho_{\text{п}}) = 314 \cdot 2,63 / (1 + 0,06 \cdot 2,63) = 710 \text{ кг/м}^3.$$

7. Определяют количество воды затворения на 1 м<sup>3</sup> бетона:

$$\begin{aligned} V &= W\Pi + K_{\text{ц}}\text{П} + K_{\text{щ}}\text{Щ} = 0,36 \cdot 210 + 0,06 \cdot 710 + 0,02 \cdot 1340 = \\ &= 146 \text{ л/м}^3. \end{aligned}$$

Далее определяют расход материалов на пробный замес и выполняют работу по методике, изложенной в данной лабораторной работе.

## *2.8. Лабораторная работа № 12. Проектирование состава бетона автоклавного твердения и исследование основных факторов, влияющих на состав и экономичность бетона*

Цель работы. Освоить методику проектирования состава автоклавного бетона и исследовать основные технологические факторы, влияющие на состав и свойства бетона автоклавного твердения.

Введение. К бетонам автоклавного твердения относятся бетоны, получаемые на основе смешанных вяжущих и различных минеральных заполнителей. Основным цементирующим веществом таких бетонов являются гидросиликаты кальция разной основности.

Наибольшее распространение получили мелкозернистые силикатные бетоны, заполнителем которых является кварцевый песок. Песок обладает более высокой удельной поверхностью и, следовательно, лучшей реакционной способностью, а также имеет меньшую стоимость, чем крупный заполнитель. Силикатные бетоны по сравнению с тяжелыми цементными бетонами отличаются более однородным строением и высокой монолитностью структуры, благодаря большей площади контактов и химической природе связи между известково-кремнеземистым вяжущим и основной массой мелкозернистого заполнителя, что и определяет хорошие технические свойства силикатных мелкозернистых бетонов. Твердение силикатных бетонов возможно только в условиях автоклавной обработки при давлении насыщенного водяного пара 0,9...1,6 МПа и температуры 174...203 °С. В этих условиях происходит химическое взаимодействие между гидроксидом кальция и кремнеземом с образованием гидросиликатов кальция, которые являются основным цементирующим веществом.

Бетонные смеси на основе известково-песчаного вяжущего можно готовить двумя способами: 1) с сохранением эффекта гидратационного схватывания оксида кальция в бетонной смеси с использованием молотой негашеной извести; 2) с полной гидратацией оксида кальция в бетонной смеси без эффекта схватывания (гидратная схема).

Бетоны и изделия, приготовленные по первому способу, характеризуются повышенными физико-механическими свойствами и большей стойкостью к воздействию атмосферы и агрессивных сред. Поэтому второй способ

применяется в основном лишь для изготовления внутренних конструкций.

Сложность процессов, протекающих при автоклавной обработке, влияние на процессы твердения и структурообразования бетонов многих факторов (химического и минералогического состава вяжущих и заполнителей, их удельной поверхности и ее характера, режима автоклавной обработки и т. д.) не позволяют определять состав автоклавного бетона расчетом. Состав силикатного бетона определяют расчетно-экспериментальным путем, используя известные средние зависимости для установления состава бетона для пробных замесов и последующего уточнения по результатам испытаний.

Определение состава силикатного бетона можно производить по методике, разработанной ВНИИСТРОМом [4]. Исходными данными для назначения состава бетона являются: требуемая марка бетона и удобоукладываемость смеси, характеристики исходных материалов и режим автоклавной обработки. С целью выбора рационального состава бетона с меньшим расходом цементирующего вещества целесообразно при подборе состава бетона варьировать составом вяжущего, отличающимся соотношением  $\text{CaO} : \text{SiO}_2$ .

Для бетонов с прочностью 15...50 МПа рекомендуется использовать вяжущее с содержанием активной  $\text{CaO}$  ( $35 \pm 3$ )% и молотый песок с тонкостью измельчения по удельной поверхности 1000...2000  $\text{см}^2/\text{г}$ .

**Содержание лабораторной работы.** Работа состоит из нескольких заданий, каждое из которых выполняется одним звеном. Работа рассчитана на 3...4 ч. Примерные задания для проектирования состава силикатного бетона приводятся ниже.

**Задание 1.** Для изготовления панелей внутренних стен подобрать состав силикатного бетона с прочностью 20 МПа с жесткостью смеси 30 с. Материалы: известь молотая, содержание активной  $\text{CaO} = 80\%$ ; песок — кварцевый,  $M_{кр} = 2,2$ , содержание отмучиваемых примесей 2,3%; песок — молотый,  $S_{уд} = 1000 \text{ см}^2/\text{г}$ . Вяжущее состоит из 50% извести и 50% молотого песка, т. е. содержание активной  $\text{CaO}$  составляет 40%. Содержание активной  $\text{CaO}$  в бетонной смеси равно 4,0; 5,5; 7,0%. Режим автоклавной обработки: 3+4+4+3 ч.

**Задание 2.** Аналогично заданию 1, но изменяется только расход вяжущего, содержание активной  $\text{CaO}$  в бетонной смеси равно 6,0; 7,5; 9%.

Задание 3. Аналогично заданию 1, но изменяется состав вяжущего, оно состоит из 40% извести и 60% молотого песка, т. е. содержание активной CaO составляет 32%.

Задание 4. Аналогично заданию 1, но изменяется жесткость смеси, равная 60 с.

Задание 5. Аналогично заданию 1, но применяется менее активная известь, содержание активной CaO = 70%.

Задание 6. Аналогично заданию 1, но изменяется тонкость помола песка,  $S_{уд} = 1300 \text{ см}^2/\text{г}$ .

**Указания по проведению лабораторной работы.** В основу проектирования состава силикатного бетона положено экспериментальное построение зависимости между прочностью бетона и вяжуще-водным отношением  $R = f(\text{Вяз}/\text{В})$ .

Подбор силикатного бетона по расчетно-экспериментальному методу складывается из следующих этапов: I. Предварительно рассчитывают расход материалов на замес объемом 4 л для трех составов бетонов. II. В процессе приготовления пробных замесов корректируется содержание воды в зависимости от жесткости смеси, которая определяется в приборе ВНИИСТРОМа для определения жесткости смеси см. § 1.3. При отсутствии этого прибора жесткость смеси может определяться и по стандартным методикам, изложенным в § 1.3. В этом случае объем замеса равен 7 л. При приготовлении замесов уточняют составы, изготавливают по три образца-куба размером  $100 \times 100 \times 100 \text{ мм}$ , рассчитывают среднюю плотность смеси, а после автоклавной обработки по заданному режиму определяют показатели прочности бетона при сжатии и среднюю плотность бетона. III. По результатам испытаний строят кривые зависимости прочности и расхода вяжущего от вяжуще-водного отношения и определяют искомый состав бетона.

I этап. При расчете компонентов бетонной смеси на замес можно исходить из того, что суммарное количество вяжущего и песка — заполнителя на 1 л смеси составит 2,0 кг. Тогда для изготовления замеса объемом  $V$  (л) потребуются

$$\text{Вяз} + \text{П} = 2V, \quad (2.73)$$

где Вяз, П — расход вяжущего и песка на один замес, кг.

$$\text{Вяз} = A_6 2V / A_n, \quad (2.74)$$

где  $A_6$  — принятое содержание активной CaO в бетоне, %;  $A_n$  — содержание активной CaO в используемом вяжущем, %;

$$\text{П} = 2V - \text{Вяз}. \quad (2.75)$$

Ориентировочное содержание воды в бетонной смеси, уплотняемой вибрированием, в зависимости от свойств материалов и консистенции бетонной смеси изменяется в пределах 8...12% от массы сухих компонентов, что и принимается для предварительного расчета. Результаты расчетов заносят в табл. 2.69.

Таблица 2.69. Расход компонентов на замес, кг

Компоненты	1-й замес	2-й замес	3-й замес
Вяжущее			
Песок			
Вода			

II этап. 1. Готовят пробные замесы с корректированием содержания воды в каждом из них. Для каждого состава при 3...4-разовом добавлении воды начиная с минимального расхода определяют изменение средней плотности бетонной смеси при заданном времени уплотнения. Количество воды, при котором достигается максимальная средняя плотность смеси, принимают за оптимальное. Наибольшую среднюю плотность смеси определяют на приборе жесткости смеси (см. § 1.3) по прекращению перемещения стрелки-указателя прибора за время, равное заданной жесткости смеси. При отсутствии прибора изменение плотности смеси при вибрировании можно определять в сосуде объемом 1 л. Результаты определения оптимального количества воды заносят в табл. 2.70.

2. Для каждого замеса исходя из полученной плотности смеси определяют фактический расход материалов на  $1 \text{ м}^3$  бетона по методике, изложенной в § 1.3.

3. Из бетонной смеси каждого замеса изготавливают образцы и их подвергают автоклавной обработке. Через сутки после окончания автоклавной обработки образцы освобождают из формы, взвешивают и определяют

Таблица 2.70. Влияние расхода воды на изменение средней плотности бетонной смеси заданной жесткости

Наименование	1-й замес			2-й замес			3-й замес		
	№ пробы								
	1	2	3	1	2	3	1	2	3
<b>Вода:</b>									
а) от массы (Вяж + П), %									
б) в л на замес									
<b>Средняя плотность бетонной смеси:</b>									
а) в кг/л									
б) по перемещению стрелки прибора для определения жесткости, мм									

ют среднюю плотность отвердевшего бетона и предел прочности при сжатии. Результаты расчетов каждого звена заносятся в табл. 2.71.

Таблица 2.71. Результаты опытов по подбору состава бетона

№ замеса	Содержание активной СаО%		Влажность бетонной смеси, %	Вязуче-водное отношение	Расход материалов, кг/м³ бетонной смеси			Средняя плотность, кг/м³		Предел прочности при сжатии, МПа
	в вяжущем	в бетонной смеси			вяжущее	песок	вода	бетонной смеси	бетона	
1					—	—	—			
					и т. д.					

Примечание. Над чертой — расход материалов на замес, под чертой — на 1 м³ бетона.

III этап. По результатам испытаний, приведенных в табл. 2.71, строят кривые зависимости предела прочности при сжатии и расхода вяжущего от вязуче-водного отношения. Пример построения этих зависимостей приведен на рис. 2.14. По рис. 2.14 определяют для заданной прочности бетона вязуче-водное отношение,

расход вяжущего и среднюю плотность бетонной смеси. Затем рассчитывают расход воды и песка-заполнителя (л/м³ и кг/м³) соответственно по формулам:

$$V = \text{Вяж} / (\text{Вяж} / B), \quad (2.76)$$

$$P = \rho_{см} - (\text{Вяж} + V). \quad (2.77)$$

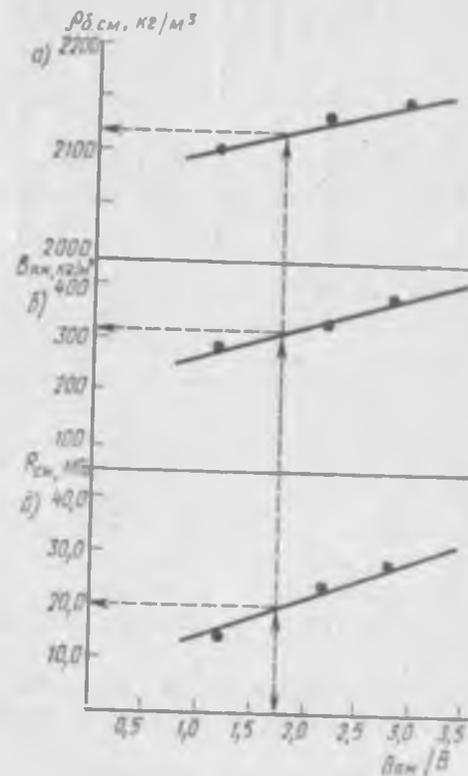


Рис. 2.14. Влияние вязуче-водного отношения на:

а — среднюю плотность бетонной смеси; б — расход вяжущего; в — прочность бетона

Содержание активной СаО в бетоне, %

$$A_0 = \text{Вяж} I A_0 / [(\text{Вяж} + П) 100], \quad (2.78)$$

где  $I$  — количество извести в составе вяжущего, %.

Результаты подбора состава силикатного бетона всех звеньев заносят в сводную табл. 2.72 и делают сравнительную оценку эффективности подобранных составов бетона одной прочности.

Таблица 2.72. Результаты подбора состава силикатного бетона

№ задания	Прочность бетона, МПа	Жесткость бетонной смеси, с	Состав вяжущего И : П <sub>ш</sub>	Содержание активной Сао, %			Тонкость помола песка, см/г	Средняя плотность бетона, кг/м <sup>3</sup>	Расход материалов, кг/м <sup>3</sup>					
				в вяжущем	в извести	в бетонной смеси			вяжущее	в том числе		песок	вода	
										И	П <sub>ш</sub>			

В отчете каждый студент приводит все расчеты, результаты испытаний и выводы по ним. Проектирование состава силикатного бетона может быть выполнено также с применением планирования эксперимента и использованием математико-статистических методов по аналогии с проектированием состава тяжелого бетона в лабораторной работе № 6.

### ГЛАВА 3

#### МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ К ЛАБОРАТОРНЫМ РАБОТАМ ПО РАЗДЕЛУ КУРСА «ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ И СПОСОБЫ ИЗГОТОВЛЕНИЯ БЕТОННЫХ И ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ИЗДЕЛИЙ»

Изготовление бетонных и железобетонных изделий включает следующие основные процессы: приемка и хранение вяжущих веществ, заполнителей и арматуры; приготовление бетонной смеси, включая и подготовку составляющих; изготовление различных арматурных элементов; формование изделий, включая их армирование; твердение бетона; отделка изделий; укрупнительная сборка и укомплектование строительных деталей и конструкций с целью повышения степени их заводской готовности.

Основными технологическими переделами процесса изготовления бетонных и железобетонных изделий являются приготовление бетонной смеси, формование, тепловая обработка, а также отделка лицевых поверхностей.

Эти технологические переделы и нашли в основном отражение в данном разделе лабораторного практикума. Так, лабораторная работа № 13 посвящена исследованию эффективности способов переделов

шивания бетонной смеси, а работа № 14 — исследованию режимов виброуплотнения бетонной смеси. Учитывая необходимость еще большего развития предварительно напряженных конструкций с максимальным использованием высококачественных арматурных сталей, в лабораторной работе № 15 проводятся исследования методов предварительного натяжения различной арматуры и контроля напряжения в арматуре.

Одним из главных направлений НТП в области сборного железобетона, по которому должно идти совершенствование технологических процессов, является ускорение твердения бетона. Этому важнейшему технологическому пределу посвящена работа № 16, в которой исследуются различные факторы, влияющие на эффективность тепловлажностной обработки — одного из основных приемов ускорения твердения бетона.

### *3.1. Лабораторная работа № 13. Исследование эффективности способов перемешивания бетонной смеси*

**Цель работы.** Исследовать сравнительную эффективность перемешивания бетонных смесей (подвижных и жестких) на плотных (пористых) заполнителях в разных видах смесителей.

**Введение.** На заводах сборного железобетона при приготовлении бетонных (растворных) смесей в зависимости от их вида и характеристики применяют различные способы перемешивания. Смешивание при свободном падении материалов в смесителе рекомендуется при приготовлении подвижных смесей с крупным заполнителем из плотных пород. В этом случае перемешивание осуществляется в гравитационном смесителе. Перемешивание жестких, мелкозернистых и легкобетонных смесей осуществляются в смесителях принудительного действия. Вибросмешивание эффективно при приготовлении бетонных (растворных) смесей повышенной жесткости.

Первый способ в основном обеспечивает качественное перемешивание составляющих бетонной смеси, второй и третий — повышают также активность вяжущих, усиливают степень их гидратации, увеличивают прочность сцепления цементного камня с заполнителем. Все это улучшает технические свойства бетонов и растворов. Поэтому правильный выбор вида и конструкции смесителя, а также вида смеси, ее состава и характеристик составляющих материалов, является обязательным условием получения качественного и экономичного бетона или раствора.

**Содержание лабораторной работы.** В работе исследуется сравнительная эффективность перемешивания подвижных или жестких бетонных (на плотных и пори-

стых заполнителях) и растворных смесей в различных смесителях. При проведении работы рекомендуется подгруппу студентов разделить на три бригады. Каждая бригада выполняет одно из указанных ниже заданий. Работа рассчитана на 3 ч.

**Задание 1.** Бригада I, состоящая из двух звеньев, проводит опыты с использованием растворных смесей. Состав раствора 1:3 по массе. Материалы: портландцемент М400; кварцевый песок с  $M_{кр}=2,0$ . Подвижность растворной смеси, определенная стандартным способом (см. § 1.3), равна соответственно 8...10 и 1...2 см при выполнении работы звеньями 1 и 2.

**Задание 2.** Бригада II проводит те же опыты, но с использованием в опытах бетонной смеси на плотном заполнителе — известняковом щебне с  $D_{н\text{н}\text{н}\text{б}}=20$  мм. Остальные материалы те же. Подвижность бетонной смеси равна 5...6 см (при выполнении работы звеном 1). Жесткость бетонной смеси равна 5...7 с (при выполнении работы звеном 2).

**Задание 3.** Бригада III проводит те же опыты, но с использованием бетонной смеси на пористом заполнителе. Материалы: портландцемент М400, керамзит с  $D_{н\text{н}\text{н}\text{б}}=20$  мм, песок — керамзитовый. Звено 1 использует бетонную смесь с подвижностью 5 см, а 2-е — с жесткостью 7 с. Средняя плотность бетона в сухом состоянии 1000 кг/м<sup>3</sup>.

**Указания по проведению лабораторной работы.**  
1. Рассчитывается расход материалов для приготовления замесов (растворная смесь рассчитывается исходя из принятой средней плотности растворной смеси, а бетонная смесь на плотных и пористых заполнителях — расчетно-экспериментальным методом)\*. Контрольный (эталонный) замес объемом 2 л перемешивается вручную. Объемы замесов для перемешивания смеси в лопастном смесителе, в бегунах и в вибросмесителе соответственно равны 5,3 и 5 л.

2. Каждое звено prepares замесы. На контрольном замесе уточняют необходимое содержание воды для обеспечения заданной подвижности или жесткости.

3. Перемешивают материалы. Контрольный замес перемешивают вручную, а другие замесы — в лопастном смесителе, в бегунах и в вибросмесителе. Во всех

\* Примерные расходы материалов на замес бетонной смеси на плотных и пористых заполнителях можно взять из лабораторных работ № 5 и 8.

замесах расход воды принимают постоянным. Время перемешивания смеси в каждом смесителе одинаковое — 3...5 мин.

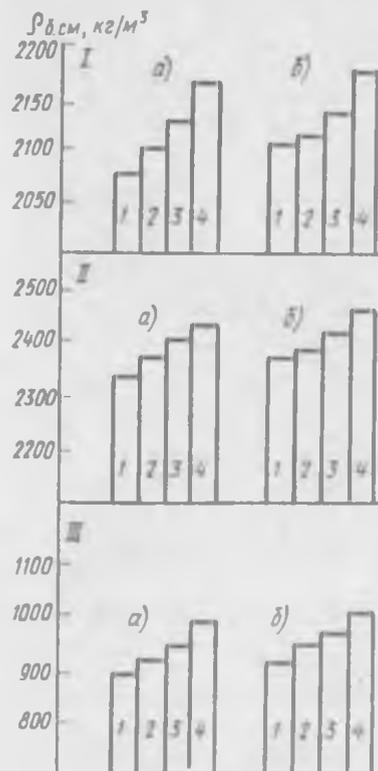


Рис. 3.1. Изменение средней плотности в зависимости от способа перемешивания:

I — растворной; II — на плотных заполнителях; III — на пористых заполнителях; 1 — перемешивание вручную; 2 — то же, в лопастном смесителе; 3 — то же, в бегунах; 4 — виброперемешивание; а — результаты опытов звена 1; б — то же, звена 2

4. При каждом способе перемешивания определяют среднюю плотность растворной (бетонной) смеси, коэффициент выхода, фактический расход составляющих на 1 м<sup>3</sup> раствора (бетона) по методикам, указанным в § 1.3 данного практикума.

5. Из каждого замеса готовят стандартным способом образцы в количестве не менее 3 шт. Образцы подвергаются тепловой обработке (по одинаковому для всех бригад режиму) или твердеют в нормальных условиях в течение 14 сут.

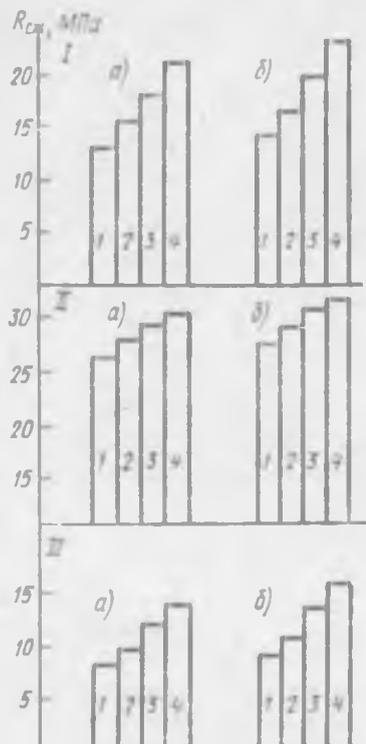


Рис. 3.2. Изменение прочности при сжатии в зависимости от способа перемешивания смеси:

I — растворной; II — на плотных заполнителях; III — на пористых заполнителях; 1 — перемешивание вручную; 2 — то же, в допастном смесителе; 3 — то же, в бегунах; б) — виброперемешивание; а) — результаты опытов звена I; б) — то же, звена 2

6. После испытания образцов определяют прочность бетона при сжатии (МПа) и коэффициент использования цемента:

$$K_{исп.ц} = R/Ц, \quad (3.1)$$

где Ц — фактический расход цемента на 1 м<sup>3</sup> бетона, кг.

Полученные коэффициенты сравнивают с  $K_{исп.ц}$  для контрольного замеса.

В случае, когда число образцов-близнецов, испытанных одновременно (в одном возрасте), больше трех, можно выявить влияние способа перемешивания на однородность прочности раствора. Это является косвенным подтверждением того, что растворная (бетонная) смесь хорошо перемешана.

7. Все данные испытаний и опытов заносят в табл. 3.1. По результатам опытов строят графики эффективности использования смесителей при приготовлении растворной (бетонной) смеси (рис. 3.1 и 3.2).

Таблица 3.1. Результаты опытов

Показатели	Способы перемешивания составляющих											
	ручное			в лопастном смесителе			в бегунах			вибросмешивание		
	№ бригады			№ бригады			№ бригады			№ бригады		
	I	II	III	I	II	III	I	II	III	I	II	III
Коэффициент выхода												
Средняя плотность смеси, кг/м <sup>3</sup>												
Фактический расход цемента на 1 м <sup>3</sup> бетона, кг												
Прочность бетона при сжатии, МПа: $R_b$ после пропаривания $R_b$ после 14 сут нормального твердения												
Эффективность использования цемента $K_{исп.ц} = R/U$	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—

Примечание. Каждый показатель над чертой указывается для смеси, изготовленной звеном 1, под чертой — звеном 2.

В отчете, составленном индивидуально каждым студентом, должны быть приведены частные и общие вы-

воды по результатам экспериментальных исследований всех бригад с обоснованием выбора способа перемешивания в зависимости от вида и характеристик растворной (бетонной) смеси.

### *3.2. Лабораторная работа № 14. Исследование режимов виброуплотнения бетонной смеси*

**Цель работы.** Изучить способы определения интенсивности вибрирования бетонной смеси при ее уплотнении и определить влияние интенсивности вибрирования на свойства бетонной смеси.

**Введение.** Бетонные смеси, применяемые для изготовления изделий, в большинстве случаев подвергаются уплотнению. Частицы бетонной смеси в процессе уплотнения находятся под влиянием силового поля, создаваемого из сил тяжести частиц и внешнего силового воздействия (давление, встряхивание, колебательные движения), оказываемого на эти частицы. Кроме того, частицы находятся под воздействием внутренних сил в системе (силы вязкого и сухого трения, межмолекулярного сцепления, капиллярного давления и др.), величина которых определяет физико-механические свойства бетонной смеси и ее реологические характеристики.

Основным способом механического воздействия на бетонную смесь, с целью ее уплотнения является вибрирование. Качество уплотнения бетонной смеси определяется выбранным режимом виброобработки, ее интенсивностью и продолжительностью, а также соответствием выбранных параметров режима вибрирования свойствам бетонной смеси.

Эффективность вибрирования при формировании изделий оценивается достижением в оптимальные сроки хорошего и равномерного уплотнения. Она косвенно может быть оценена прочностью затвердевшего бетона, которая, как известно, является функцией его плотности.

**Содержание лабораторной работы.** При проведении работы рекомендуется подгруппу студентов разделить на три бригады.

Работа включает несколько заданий, решаемых расчетным и экспериментальным путем. Работа рассчитана на 4 ч.

**Задание 1.** Рассчитать по известным конструктивным параметрам лабораторной виброплощадки ве-

личину ее амплитуды и частоту собственных колебаний в зависимости от массы формуемого бетона.

**Задание 2.** Определить интенсивность вибрирования формуемой смеси. Проверить в натуре амплитуду колебаний виброплощадки, равномерность ее распределения по контуру вибрирующей рамы (вibroстола) при разном объеме (массе) формуемого бетона или при изменении кинетического момента дебалансов. Замерить с помощью тахометра частоту вращения вала вибратора, соответствующую частоте вынужденных колебаний виброплощадки. На основе выполненных замеров определить критерии интенсивности колебаний: по наибольшей скорости колебаний (см·с<sup>-1</sup>)

$$v_{\max} = A\omega = A2\pi f; \quad (3.2)$$

по наибольшему ускорению, сообщаемому частицам смеси (см·с<sup>-2</sup>),

$$W_{\max} = A\omega^2 = A4\pi^2 f^2; \quad (3.3)$$

по интенсивности вибрирования (см<sup>2</sup>·с<sup>-3</sup>)

$$I = A^2\omega^2 = A^28\pi^3 f^3, \quad (3.4)$$

где  $A$  — амплитуда, см;  $\omega$  — угловая скорость, с<sup>-1</sup>;  $f$  — частота колебаний, Гц.

**Задание 3.** Определить влияние интенсивности вибрирования на водопотребность бетонной смеси.

**Указания по проведению лабораторной работы.** В задании 1 для определения величины амплитуды вынужденных колебаний системы с одной степенью свободы можно воспользоваться эмпирической формулой

$$A = \frac{Q}{(F - M)\omega^2 - E}, \quad (3.5)$$

где  $Q$  — возмущающая сила, Н;  $F$  — коэффициент сопротивления;  $M$  — вибрируемая масса (включая массу формы и бетонной смеси), Н·см<sup>-1</sup>·с<sup>2</sup>;  $\omega$  — угловая скорость, рад/с;  $E$  — суммарная жесткость пружин виброплощадки, Н·см<sup>-1</sup>.

Возмущающая сила

$$Q = Pe\omega^2/g, \quad (3.6)$$

где  $Pe$  — кинетический момент дебалансов виброплощадки, Н·см;  $g$  — ускорение силы тяжести, см·с<sup>-2</sup>.

Коэффициент сопротивления  $F$  зависит от колеблющейся массы и частоты колебаний и устанавливается

опытом. Для виброплощадок небольшой грузоподъемности (100...200 кг) коэффициент сопротивления

$$F = KM, \quad (3.7)$$

где  $K = 2,1 - f/10\,000$ ,  $f$  — число колебаний в мин.

Таблица 3.2. Основные параметры виброплощадки

№ бригады	Масса формируемого образца, кг	Кинетический момент виброплощадки $P_e$ , Н·см	Амплитуда колебаний виброплощадки, см		Частота собственных колебаний виброплощадки $f_0$ , кол/мин
			расчетная	опытная	

Определение собственных колебаний виброплощадки

$$f_0 = 10 \sqrt{E/(F - M)}. \quad (3.8)$$

Результаты произведенных расчетов заносят в табл. 3.2.

В задании 2 определение фактической амплитуды колебаний виброплощадки проводят с помощью вибрографа ВР-1. Каждый замер осуществляют дважды с определением среднего значения из двух измерений. Результаты замера амплитуды заносят в табл. 3.2.

В задании 3 используют портландцемент М400, песок с  $M_{кр} = 2$ , щебень (гравий) с  $D_{макс} = 20$  мм. Расход воды подбирают опытным путем для получения заданной удобоукладываемости, указанной в табл. 3.3.

Таблица 3.3. Расход материалов на замес объемом 7 л и заданная удобоукладываемость

№ бригады	Расход материалов, кг			Удобоукладываемость по ГОСТ 10181.1—81, с
	цемент	песок	щебень (гравий)	
I	2,15	5,25	8	5...10
II	2,15	5,25	8	15...20
III	2,15	5,25	8	25...30

Результаты опытов заносят в табл. 3.4.

Таблица 3.4. Результаты опытов по определению водопотребности

№ бригады	№ замеса	Амплитуда, см	Частота, кол/мин	Интенсивность вибрации, см <sup>2</sup> /с <sup>2</sup>	Удобоукладываемость (опытная)	Водопотребность, л	
						на замес	на 1 м <sup>3</sup> смеси
1	1	0,03	3000	и т. д.			
	2	0,06	3000				
	3	0,09	3000				

По результатам опытов трех бригад строят график зависимости водопотребности бетонной смеси от интенсивности вибрирования (рис. 3.3).

В отчете, составленном индивидуально каждым студентом, следует полностью привести проведенные расчеты, результаты экспериментальных исследований и выводы по ним.

### 3.3. Лабораторная работа № 15. Исследование методов предварительного натяжения арматуры и контроля напряжения в арматуре

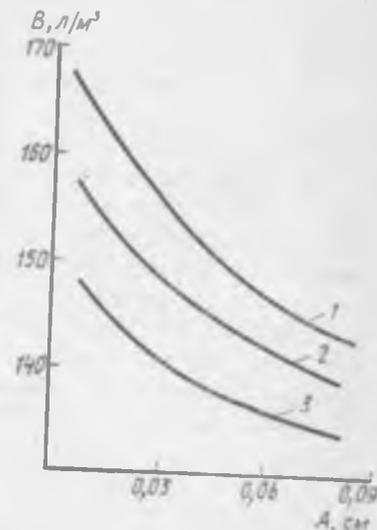


Рис. 3.3. Зависимость водопотребности бетонной смеси от интенсивности вибрирования:

1, 2, 3 — удобоукладываемость, результаты опытов звена I; б — то же соответственно для бригад I, II и III

Цель работы. Ознакомиться с расчетами параметров и способами натяжения арматуры и изучить методы контроля величины напряжения в арматуре.

Введение. Железобетонные конструкции, испытывающие растягивающие напряжения с обычной арматурой, обладают существенными недостатками: малой трещиностойкостью и жесткостью и большим расходом ар-

матуры. В таких конструкциях в растянутой зоне бетона появляются трещины при нагрузках значительно меньше расчетных, что объясняется малой предельной деформативностью бетона при растяжении и его незначительным сопротивлением растяжению. В предварительно напряженных конструкциях в результате обжатия бетона в растянутой зоне повышается трещиностойкость и жесткость, появляется возможность использовать арматуру и бетон более высокой прочности и, следовательно, сократить их расход и уменьшить массу конструкций. Такие конструкции значительно лучше работают на динамические и знакопеременные нагрузки, имеют меньшие прогибы, чем конструкции с обычной арматурой.

В настоящее время применяются различные способы натяжения арматуры и обжатия бетона. Натяжение арматуры можно производить до и после бетонирования (на упоры и на затвердевший бетон), а в отдельных случаях — в процессе уплотнения бетонной смеси и твердения бетона. Для натяжения арматуры применяют механический, электротермический, электротермомеханический способы. Возможно также применение напрягающегося цемента для изготовления самоупроченного железобетона.

Величина натяжения арматуры должна находиться в пределах упругой деформации применяемой арматурной стали и не превышать 85...90% предела текучести или 65...70% предела прочности на разрыв. В предварительно напряженных изделиях при механическом натяжении арматуры величина контролируемого напряжения не должна отличаться от заданной по проекту больше чем на  $-5$  и  $+10\%$ . При электротермическом напряжении арматуры предельное отклонение от заданного зависит от длины изделия.

При изготовлении предварительно напряженных железобетонных конструкций усилие натяжения арматуры измеряют манометром, по усилию поперечной оттяжки арматуры, частоте собственных колебаний арматуры и ее удлинению.

Натяжение арматуры выполняется на лабораторном стенде, состоящем из жесткой рамы из швеллеров, в торцах которой имеются захваты для арматуры, позволяющие закрепить и производить натяжение как минимум двух стержней и четырех проволок. Длина стенда должна быть не менее 4 м. С одной стороны стенда, со стороны подвижных захватов, устанавливают домкрат

и насосную станцию, которые убирают после окончания работы.

Во время натяжения арматуры необходимо соблюдать меры по безопасному проведению работы.

**Содержание лабораторной работы.** Рекомендуется подгруппу студентов разделить на четыре звена. Для звеньев индивидуально назначается один из этапов натяжения в каждом из трех расчетно-экспериментальных заданий. Время выполнения работы 3 ч.

**Задание 1.** Рассчитать и осуществить механическое натяжение пакета высокопрочной проволоки, состоящего из четырех проволок класса В-II, диаметром 4 мм, длиной 4000 мм. Величина натяжения — 70, 75, 80 и 85% от условного предела текучести  $\sigma_{0,2}$  соответственно для 1, 2, 3 и 4-го звеньев.

**Задание 2.** Рассчитать и осуществить механическое натяжение стержневой арматуры класса А-IV двух стержней диаметром 14 мм, длиной 4000 мм, марка стали 20ХГ2Ц. Величина натяжения 70, 75, 80 и 85% от условного предела текучести соответственно для 4, 3, 2 и 1-го звеньев.

**Задание 3.** Рассчитать и осуществить электротермическое натяжение стержневой арматуры класса А-IV одного стержня диаметром 16 мм длиной 2000 мм, марка стали 20ХГ2Ц. Величина натяжения 75, 80, 85 и 90% от условного предела текучести соответственно для 1, 2, 3 и 4-го звеньев.

**Указания по проведению лабораторной работы.** 1. Натяжение арматуры осуществляют этапами, равными 10% от условного предела ее текучести  $\sigma_{0,2}$ ; для стержневой арматуры в интервале 50...85%  $\sigma_{0,2}$ ; для высокопрочной проволоки 40...80%  $\sigma_{0,2}$ .

2. Для каждого этапа рассчитывают: теоретическое значение удлинения арматуры  $\Delta l_p$ ; величину усилия  $N$  и показание манометра домкрата  $P_m$  при механическом натяжении арматуры; температуру нагрева  $t_p$ , мощность трансформатора  $W$  и расход электроэнергии при электротермическом способе натяжения  $P_{тр}$ .

3. В процессе натяжения на каждом этапе измеряют: а) при механическом способе — фактическое удлинение арматуры  $\Delta l_\phi$  при расчетном показании манометра домкрата  $P_m$  или фиксируют значение  $P_m$ , соответствующее величине рассчитанного теоретического удлинения  $\Delta l_p$ ; величину напряжений в натянутой арматуре (по показанию контролирующего прибора)  $\sigma_{\phi}$ ;

б) при электротермическом способе — фактическое удлинение  $\Delta l_{\phi}$ , температуру  $t_{\phi}$  и продолжительность нагрева  $\tau$ .

4. Определяют теоретические значения удлинения арматуры при напряжении, равном или меньшем 70% условного предела текучести (см):

$$\Delta l_p = \sigma_0 l / E, \quad (3.9)$$

где  $\sigma_0$  — заданное напряжение в арматуре, МПа;

$$\sigma_0 = \sigma_{0,2} \alpha, \quad (3.10)$$

где  $\sigma_{0,2}$  — условный предел текучести арматуры, МПа (табл. 3.5);  $E$  — начальный модуль упругости арматуры.

Т а б л и ц а 3.5. Основные характеристики арматурной стали

Арматурная сталь			Условный предел текучести $\sigma_{0,2}$ , МПа, не менее	Временное сопротивление разрыву $\sigma_b$ , МПа	Относительное удлинение, %	Модуль упругости $E$ , МПа
вид	класс	диаметр, мм				
Арматурная проволока гладкая	В-II	3	1520	1900	4	$1,96 \cdot 10^6$
		4	1440	1800	4	
		5	1360	1700	4	
		6	1280	1600	5	
		7	1200	1500	6	
	8	1120	1400	6		
Арматурная проволока периодического профиля	Вр-II	3	1440	1800	4	$1,96 \cdot 10^6$
		4	1360	1700	4	
		5	1280	1600	4	
		6	1200	1500	5	
		7	1120	1400	6	
	8	1040	1300	6		
Горячекатаная периодического профиля	A-IV	10 ... 32	590	885	8	$1,96 \cdot 10^6$
	A-V	10 ... 22	785	1030	7	$1,86 \cdot 10^6$
Термически упрочненная периодического профиля	At-IV	10 ... 28	590	785	9 ... 10	$1,86 \cdot 10^6$
	At-V	10 ... 28	785	980	7 ... 8	$1,86 \cdot 10^6$
	At-VI	10 ... 28	980	1200	6 ... 7	$1,86 \cdot 10^6$

ры, МПа (табл. 3.5);  $l$  — начальная длина арматуры, см;  $a$  — заданная величина натяжения, %.

5. Определяют величину натяжения арматуры и показания манометра домкрата при механическом натяжении арматуры.

Усилие натяжения

$$N = \sigma_s S_a l, \quad (3.11)$$

где  $S_a$  — площадь поперечного сечения арматуры, см<sup>2</sup>;  $l$  — количество одновременно натягиваемых стержней (проволок).

Показания манометра домкрата, МПа

$$P_m = N / (\eta S_n), \quad (3.12)$$

где  $\eta$  — средний коэффициент полезного действия домкрата равный 0,95...0,97;  $S_n$  — площадь поршня домкрата, равная 50 см<sup>2</sup>.

6. Определяют температуру нагрева, мощность трансформатора и количество электроэнергии, расходуемой на нагрев стержней.

Удлинение арматуры (см) при ее нагреве до рекомендуемой температуры

$$\Delta l = \alpha l_k (t_p - t_0), \quad (3.13)$$

где  $\alpha$  — коэффициент линейного расширения стали (табл. 3.6);  $l_k$  — расстояние между токопроводящими контактами (длина нагреваемого участка арматуры), см;  $t_p$  — рекомендуемая температура нагрева, °С;  $t_0$  — температура окружающей среды, °С.

Таблица 3.6. Коэффициенты линейного расширения стержней и проволоочной арматуры

Температурный интервал, °С	Коэффициенты линейного расширения $\alpha \cdot 10^6$ , °С арматуры		
	горячекатаной классов А-IV, А-V и АIIIВ	термически упроченной классов Ат-IV, Ат-V и Ат-VI	проволоки класса Вр-II
20 ... 300	13,2	12,5	13,0
20 ... 350	13,5	13,0	13,4
20 ... 400	13,8	13,5	13,8
20 ... 450	14,2	14,0	14,1
20 ... 500	14,5	—	14,5

Теоретическое значение удлинения арматуры при заданной величине напряжения в ней определяется по формуле (3.9).

Для укладки арматурных стержней в упоры их необходимо удлинить путем нагрева на величину несколько большую, чем было определено расчетом. Дополнительное удлинение  $\Delta l_t$  рекомендуется принимать равным 2...4 мм. С учетом этого температура нагрева стержней

$$t_p = (\Delta l_p + \Delta l_t) / \alpha l_k + t_0. \quad (3.14)$$

Требуемая мощность трансформаторов (В·А) для нагрева стержневой арматуры

$$P_{тр} = 0,467 n C \frac{(\Delta l_p + \Delta l_t)}{\tau} \sqrt{T_{тр}} \quad (3.15)$$

где  $n$  — количество одновременно нагреваемых стержней;  $C$  — линейная плотность стержней, кг (табл. 3.7);  $\tau$  — время нагрева арматуры, ч;  $T_{тр}$  — продолжительность включения трансформатора, %.

Т а б л и ц а 3.7. Площади поперечных сечений и линейная плотность арматуры

Диаметр, мм	Площадь поперечного сечения, см <sup>2</sup> , при числе стержней				Линейная плотность, кг/м
	1	2	3	4	
3	0,071	0,14	0,21	0,28	0,057
4	0,126	0,25	0,38	0,5	0,099
5	0,196	0,39	0,59	0,79	0,154
6	0,283	0,57	0,85	1,13	0,222
7	0,385	0,77	1,15	1,54	0,302
8	0,503	1,01	1,51	2,01	0,395
9	0,636	1,27	1,91	2,54	0,499
10	0,785	1,57	2,36	3,14	0,617
12	1,131	2,26	3,39	4,52	0,89
14	1,54	3,08	4,61	6,15	1,21
16	2,01	4,02	6,03	8,04	1,58
18	2,54	5,09	7,63	10,17	2,0

Количество электроэнергии (Дж·ч), расходуемое на нагрев арматуры, обеспечивающей заданное удлинение,

$$W = 0,2 n C (\Delta l_p + \Delta l_t) \sqrt{T_{тр}}. \quad (3.16)$$

Контроль величины напряжений в арматуре при механическом натяжении стержней и проволоки проводят по показанию манометра домкрата ( $P_m$ ) и по их фактическому конечному удлинению  $\Delta l_\phi$  на каждом этапе натяжения (МПа)

$$\sigma = \Delta l_\phi E / l. \quad (3.17)$$

Для этих целей используют также соответствующие механические и электромеханические измерительные приборы, например ПРД, ПРДУ, ПД, ИПН. При электротермическом способе натяжения контролируют температуру нагрева стержней, обеспечивающую их удлинение, заданное расчетом.

Полученные расчетом величины и опытные данные заносят в табл. 3.8, 3.9 и на рис. 3.4.

В отчете должны быть представлены все необходимые расчеты, требуемые заданием; приведены эскизы стенда для натяжения арматуры, установки для электротермического нагрева стержней, а также анкерных устройств; схемы приборов, применяемых для контроля величины натяжения арматуры.

На основе анализа данных, полученных всеми звеньями по заданным этапам натяжения, делаются выводы. В выводах необходимо провести сравнительную оценку опытных данных, полученных на основании различных методов контроля параметров натяжения арматуры, с расчетными и допустимыми нормами величинами.

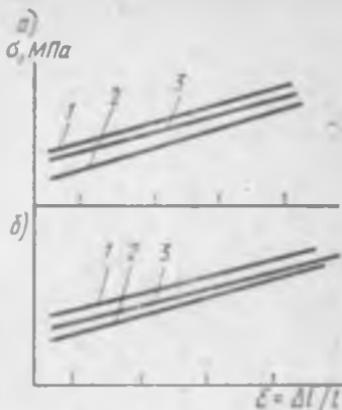


Рис. 3.4. Зависимость между напряжениями и относительными деформациями при натяжении:

а — арматурных стержней; б — высокопрочной проволоки; 1 — расчетная величина; 2 — по показанию концевому удлинению; 3 — по показанию контролирующего прибора

### 3.4. Лабораторная работа № 16. Исследование факторов, влияющих на ускорение твердения бетона в нормальных условиях

**Цель работы.** Исследовать влияние некоторых факторов на ускорение твердения бетона в нормальных условиях (без тепловой обработки).

**Введение.** Для ускорения твердения бетона в нормальных условиях при возведении зданий монолитным способом или при изготовлении железобетонных изделий в заводских условиях пользуются различными приемами: активация цемента, заключающаяся в дополнительном измельчении цемента сухим или мокрым

Т а б л и ц а 3.8. Натяжение стержневой арматуры механическим способом

Класс и марка арматурной стали . . . . . диаметр и количество одновременно натягиваемых стержней . . . . . длина стержней . . . . . условный предел текучести . . . . . модуль упругости . . . . .

№ звена	Величина натяжения $\alpha$ , %	Расчетное напряжение в арматуре $\sigma_r$ , МПа	Усилие натяжения, Н, Н	Расчетное показание манометра диаметра $R_m$ , МПа	Концевое удлинение арматуры, мм		Местное удлинение по тензомеру, мм		Фактическое напряжение в арматуре $\sigma_f$ , рассчитанное по удлинению, МПа		Отклонение фактического напряжения от расчетного по удлинению, %	
					относительные деформации $\Delta l/l$				концевому	местному	концевому	местному
					расчетное $\Delta l_p$	фактическое $\Delta l_f$	расчетное $\Delta l_p$	фактическое $\Delta l_f$				

Т а б л и ц а 3.9. Натяжение проволочной арматуры механическим способом

Класс арматурной проволоки . . . . . диаметр и количество одновременно натягиваемых проволок . . . . . длина проволоки . . . . . условный предел текучести . . . . . модуль упругости . . . . .

№ звена	Величина натяжения $\alpha$ , %	Расчетное напряжение в арматуре $\sigma_r$ , МПа	Усилие натяжения, Н, Н	Расчетное показание манометра диаметра $R_m$ , МПа	Удлинение арматуры, мм		Средний прогиб в центре проката $f \cdot 10^3$ , мм	Усилие для изготовления проката проволоки, Н	Фактическое напряжение в арматуре $\sigma_f$ , МПа, рассчитанное по		Отклонение фактического напряжения, % от расчетного по	
					относительные деформации $\Delta l/l$				концевому удлинению	прогибу	концевому удлинению	прогибу
					расчетное $\Delta l_p$	фактическое $\Delta l_f$						

Т а б л и ц а 3.10. Натяжение стержневой арматуры электротермическим способом

Класс и марка арматурной стали . . . . ., количество и диаметр нагреваемых стержней . . . . ., расстояние между контактами . . . . ., условный предел текучести . . . . ., модуль упругости . . . . .

№ звена	Величина натяжения $\sigma$ , %	Расчетное напряжение в арматуре $\sigma$ , МПа	Удлинение стержней, см		Температура нагрева, °С		Время, необходимое на удлинение $t$ , с	Расход электроэнергии $W$ , Дж · ч	Требуемая мощность трансформатора $P_{тр}$ , В · А	Отклонение фактической температуры от расчетной, %
			расчетное $\Delta l_p$	фактическое $\Delta l_f$	расчетная $t_p$	фактическая $t_f$				

способом (с возможным дополнительным введением при помеле 2...3% гипса); уменьшение воды затворения за счет использования пластифицирующих добавок, в том числе и добавок суперпластификаторов; применение быстротвердеющих или особо быстротвердеющих вяжущих (БТЦ, ОБТЦ или других); введение химических добавок, ускоряющих твердение бетона.

Исходя из производственных условий, в каждом конкретном случае может быть использован один (или сочетание) из указанных выше приемов [2, 3].

**Содержание лабораторной работы.** Работа состоит из нескольких заданий, каждое из которых выполняется звеном из трех студентов. Звено готовит необходимое количество замесов из бетонной смеси объемом 7...10 л. Один из замесов является исходным, количество других устанавливается в зависимости от задания.

Работа рассчитана на 3 ч.

**Задание 1.** Исследовать, как влияет активация цемента на ускорение процесса твердения бетона в нормальных условиях. Прочность бетона 20 МПа. Подвижность бетонной смеси 5...6 см. Материалы: заводской портландцемент среднеалюминатный М400; тот же цемент, но домолотый до удельной поверхности 3500, 4500 и 5500 см<sup>2</sup>/г. Песок средней крупности, содержание песка  $r=0,35$ . Известняковый щебень с  $D_{наиб} =$

= 20 мм. Прочность бетона при сжатии определить через 1,3 и 28 сут нормального твердения.

**Задание 2.** Исследовать, как влияет уменьшение воды затворения при введении пластифицирующих добавок на ускорение процесса твердения бетона в нормальных условиях. Прочность бетона, подвижность бетонной смеси, материалы и условия проведения экспериментальных исследований те же, что и в задании 1. При выборе пластифицирующей добавки и назначении ее количества руководствоваться данными, приведенными в табл. 1.3 рекомендаций [13].

**Задание 3.** Исследовать, как изменяется прочность бетона при сжатии во времени при использовании быстротвердеющих вяжущих (БТЦ, ОБТЦ и ГЦПВ). Прочность бетона 20 МПа. Подвижность бетонной смеси 5...6 см. Материалы: заводской среднеалюминатный портландцемент М400; заводские БТЦ и ОБТЦ М500; ГЦПВ М150. Песок и щебень те же, что и в задании 1. Прочность бетона при сжатии определить через 1,3 и 28 сут нормального твердения.

**Задание 4.** Исследовать, как влияет введение комплексной химической добавки на ускорение процесса твердения бетона в нормальных условиях. Прочность бетона, подвижность бетонной смеси, материалы и условия проведения экспериментальных исследований те же, что и в задании 1. При выборе комплексной добавки (ускоряющей и пластифицирующей) и назначении ее количества руководствоваться указаниями, приведенными в [13].

**Указания к проведению лабораторной работы. 1.** Каждое звено подбирает состав бетонной смеси расчетно-экспериментальным способом согласно указаниям, приведенным в лабораторной работе № 5. Этот состав бетонной смеси является исходным. Затем подсчитывает расход материалов на один замес объемом 10 л.

**2.** При выполнении задания 1 три других замеса изготавливают с использованием домолотого до указанной в задании удельной поверхности цемента. Все четыре замеса бетонной смеси изготавливают с одинаковой, заданной удобоукладываемостью. Из этих замесов (так же как при выполнении всех остальных заданий) изготавливают девять образцов размером 100×100×100 мм.

**3.** При выполнении задания 2 и 4 подбор состава бетона с добавками производят по показателю заданной прочности бетона и удобоукладываемости согласно [13].

4. При выполнении задания 3 другие три замеса (кроме исходного) изготавливают с использованием быстротвердеющих вяжущих соответственно БТЦ, ОБТЦ и ГЦПВ с одновременным корректированием расхода материалов для обеспечения заданной удобоукладываемости.

5. Образцы после твердения в нормальных условиях в указанные сроки взвешивают для определения средней плотности бетона и испытывают для определения прочности бетона при сжатии.

6. Результаты расчетов каждое звено приводит в индивидуальном отчете. Результаты экспериментальных исследований заносят в специальную таблицу. В качестве примера приводится табл. 3.11 применительно к заданию 1. Кроме того, составляется сводная таблица по аналогии с табл. 3.14, в которую заносят результаты исследований всех звеньев.

Используя эти данные, каждое звено строит зависимости, отражающие влияние исследуемого фактора на ускорение процесса твердения бетона в нормальных

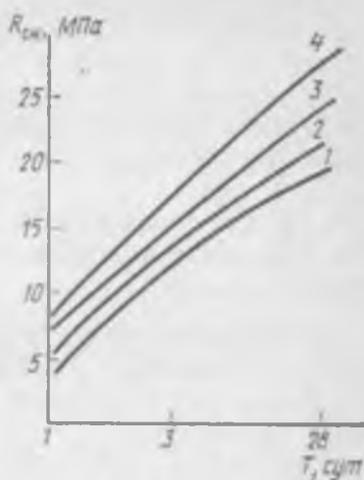


Рис. 3.5. Влияние активизации цемента на ускорение процесса твердения бетона в нормальных условиях:

1 — образцы из бетона на заводском портландцементе; 2, 3, 4 — то же, на портландцементе с удельной поверхностью соответственно 3500, 4500 и 5500 см<sup>2</sup>/г

Таблица 3.11. Таблица результатов исследований первого звена

№ звена	№ состава	Переменный фактор — тонкость помола цемента, см <sup>2</sup> /г	Прочность бетона, МПа	Подвижность бетонной смеси ОК, см	Средняя плотность бетонной смеси, кг/м <sup>3</sup>	Предел прочности при сжатии, МПа, через		
						1 сут	7 сут	28 сут
1	1	2800	20	5 ... 6				
	2	3500	20	5 ... 6				
	3	4500	20	5 ... 6				
	4	5500	20	5 ... 6				
				и т. д.				

условиях, как показано на рис. 3.5 применительно к заданию 1.

7. Каждое звено по результатам исследований делает частные выводы, а по результатам исследований, приведенных в сводной таблице, общие выводы, включающие теоретические и практические с экономической точки зрения рекомендации по выбору наиболее эффективного приема ускорения твердения бетона в нормальных условиях.

### *3.5. Лабораторная работа № 17. Исследование факторов, влияющих на эффективность тепловой обработки бетона*

**Цель работы.** Исследовать влияние вида вяжущего и состава бетона, вида и режима тепловой обработки и других факторов на прочность бетона и эффективность тепловой обработки.

**Введение.** При производстве сборного железобетона с целью ускорения процессов твердения и повышения эффективности производства применяют различные виды тепловой обработки. Наряду с положительным эффектом ускорения твердения бетона тепловая обработка оказывает и некоторое отрицательное влияние на свойства бетона, что обусловлено главным образом нарушением структуры бетона. Причинами деструкции бетона являются: возникающие при подъеме температуры внутреннее давление в слабом бетоне вследствие разницы в коэффициентах теплового расширения влаги, воздуха и твердых составляющих; неизбежные перепады температуры в бетоне по сечению; миграция влаги в теле бетона и др. Все это вызывает дефекты в структуре — повышение общей пористости, создание направленной капиллярной пористости и др. [3]. Поэтому основной задачей тепловой обработки является не только получение более высокой прочности в наиболее короткие сроки, но и выбор таких режимов, при которых снижение показателей физико-механических свойств бетона при его тепловой обработке было бы минимальным.

**Содержание лабораторной работы.** Работа состоит из нескольких заданий, каждое из которых выполняет звено из 2...3 студентов. Задания отличаются составом или видом цемента, составом бетона. С целью исследования влияния большего количества факторов, каждое звено использует один состав бетона, из кото-

рого изготавливаются образцы для двух режимов (или двух видов тепловой обработки) и для нормального твердения. Режимы тепловой обработки могут отличаться длительностью отдельных периодов и температурой прогрева.

Работа рассчитана на 3 ч.

**Задание 1.** Исследовать как влияет режим тепловой обработки на ее эффективность. Режим тепловой обработки: первый — 2+3+2 ч, второй — 2+2+3+2 ч, температура прогрева 80 °С. Прочность бетона 20 МПа. Подвижность бетонной смеси 5...6 см. Материалы: портландцемент малоалюминатный М400; содержание песка  $r=0,35$ ; щебень с  $D_{\text{наиб}}=20$  мм. Прочность бетона при сжатии определить через 4 ч и 27 сут после тепловлажностной обработки и 28 сут нормального твердения.

**Задания 2, 3.** Они аналогичны заданию 1, но в задании 2 следует применить высокоалюминатный портландцемент, а в задании 3 — шлакопортландцемент, БТЦ или портландцемент с введением химической добавки, ускоряющей твердение.

**Задания 4, 5, 6.** Они аналогичны заданиям 1, 2, 3, но следует использовать жесткие бетонные смеси с жесткостью 10...20 с по ГОСТ 10181.1—81.

**Указания к проведению лабораторной работы.** 1. Каждое звено подбирает состав бетонной смеси расчетно-экспериментальным способом согласно указаниям, приведенным в лабораторной работе № 5. Затем рассчитывают расход материала на один замес объемом 7 л (если изготавливать образцы-кубы размером ребра 70,7 мм) или объемом 17 л при изготовлении образцов-кубов с размером ребра 100 мм.

2. При изготовлении замеса корректируют подвижность или жесткость бетонной смеси при этом подвижность смеси для 1...3-го звеньев и жесткость смеси для 4...6-го звеньев должны быть одинаковыми.

3. Из каждого замеса изготавливаются 15 образцов-кубов. Определяют среднюю плотность бетонной смеси. По шесть образцов из каждого замеса помещают в пропарочные камеры для тепловой обработки по различным режимам. Три оставшиеся образца каждого замеса твердеют в нормальных влажностных условиях.

4. Три образца после тепловой обработки взвешивают для определения средней плотности бетона и испытывают для определения прочности бетона при сжатии.

5. Три других образца после тепловой обработки хранят в нормальных влажностных условиях и испытывают, как и образцы нормального хранения (контрольные) в возрасте 14 или 28 сут.

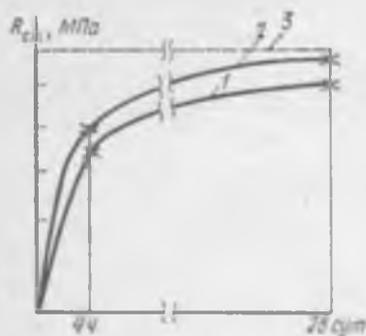


Рис. 3.6. Влияние режима тепловлажностной обработки на прочность бетона при сжатии:

1 — (2+4+2 ч); 2 — (2+2+4+2 ч); 3 — через 28 сут твердения в нормальных влажностных условиях

6. Расчеты, выполненные каждым звеном, приводятся в индивидуальном отчете. Результаты испытаний заносятся в таблицу, составляемую согласно заданию. В качестве примера приводится табл. 3.12. На основании полученных результатов каждое звено строит график влияния режима тепловлажностной обработки на предел прочности бетона при сжатии (см. рис. 3.6). По результатам испытаний всех звеньев составляется сводная таблица по аналогии с табл. 3.12

Таблица 3.12. Влияние режимов тепловой обработки на физико-механические свойства бетона

Переменный фактор	Подвижность бетонной смеси ОК, см	Режим тепловой обработки, ч	Средняя плотность, кг/м <sup>3</sup>		Предел прочности при сжатии, МПа. после			
			бетонной смеси	бетона через		тепловой обработки через		нормального влажностного твердения через 28 сут
				4 ч	28 сут	4 ч	28 сут	
Низкоалюминатный портландцемент		2+3+2						
		2+2+3+2						
		Нормальное твердение						

Примечание. Под чертой — относительное значение прочности, % от  $R_{ж}$  нормального твердения.

7. Каждое звено по результатам испытаний делает частные выводы о влиянии режимов тепловой обработки на ее эффективность. А по результатам всех исследований, приведенных в сводной таблице, делаются общие выводы о влиянии факторов, исследованных в работе, на эффективность тепловой обработки с практической и экономической точек зрения и теоретические обоснования полученных результатов.

## ГЛАВА 4

### МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ К ЛАБОРАТОРНЫМ РАБОТАМ ПО РАЗДЕЛУ КУРСА

#### «ПОВЫШЕНИЕ СТЕПЕНИ ЗАВОДСКОЙ ГОТОВНОСТИ И УЛУЧШЕНИЕ КАЧЕСТВА ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ИЗДЕЛИЙ. КОНТРОЛЬ И УПРАВЛЕНИЕ КАЧЕСТВОМ НА ЗАВОДАХ СБОРНОГО ЖЕЛЕЗОБЕТОНА»

Повышение заводской готовности бетонных и железобетонных изделий и доведение ее до наиболее полной, при которой до минимума уменьшается объем монтажных и отделочных работ на строительстве с одновременным повышением их качества, является в настоящее время основной тенденцией развития промышленности сборного железобетона.

Одним из важнейших условий обеспечения выпуска заводами бетонных и железобетонных изделий высокого качества является правильная организация системы контроля и управления качеством на заводах сборного железобетона.

Оценка качества сборного железобетона предусматривает целый ряд операций как в процессе изготовления, так и при выпуске готовой продукции: контроль качества материалов; правильный выбор состава и удобоукладываемости бетонной смеси; контроль за однородностью и соответствием заданию бетона по прочности, точности размеров, внешнему виду и т. п.

Контроль прочности бетона на сжатие занимает важное место в операциях по контролю качества на заводах ЖБИ. Поэтому лабораторные работы, включенные в данный раздел, посвящены изучению методов оценки прочности бетона неразрушающими методами (№ 18), позволяющими осуществлять контроль прочности как на изделиях, так и на образцах; статистическому методу контроля прочности с учетом его однородности (№ 19), а также текущему контролю качества бетонной смеси и прогнозированию отпускной и заданной прочности бетона (№ 20).

#### *4.1. Лабораторная работа № 18. Изучение некоторых методов оценки прочности бетона в изделиях неразрушающими методами*

**Цель работы.** Оценить прочность бетона в изделиях ультразвуковым импульсным и механическим методами.

**Введение.** Одной из главных задач в области дальнейшего развития промышленности сборного железобетона является совершенствование технологии изделий и конструкций, повышение их заводской готовности, качества и долговечности [2, 6, 7]. Высокое качество продукции не может быть достигнуто без новейших методов контроля на всех этапах технологического процесса и испытания материалов, изделий и конструкций. Одним из основных показателей качества железобетонных изделий и конструкций является прочность (на сжатие, растяжение и изгиб) и однородность бетона.

В соответствии с действующими стандартами прочность бетона контролируется путем испытания серии образцов. Каждая серия состоит из трех образцов-близнецов, изготовленных из бетонной смеси, взятой из одного и того же замеса [6].

Количество серий образцов для контроля качества бетона рекомендуется независимо от размеров изготавливаемых образцов, однако достоверность контрольных испытаний, результаты которых распространяются на весь нормируемый объем бетона, зависит не только от количества испытанных серий, но и от их объема, с увеличением которого возрастает достоверность оценки качества всей бетонной продукции.

Контроль прочности бетона путем испытания стандартных образцов имеет ряд существенных недостатков [6, 7]. Для осуществления более полного контроля за качеством железобетонных изделий и конструкций все более широко используются неразрушающие методы контроля прочности бетона, которые можно разделить на две группы: механические и физические. Физические методы основываются на оценке прочности бетона по скорости прохождения через него ультразвука или по регистрации колебаний (или других физических величин). Испытания производят с помощью различных физических приборов. Для определения прочности бетона при применении неразрушающих методов используются тарировочные зависимости, связывающие прочность бетона с показателями, полученными при данном методе испытания.

В настоящее время предложено достаточно большое количество методов и приборов для контроля прочности бетона в изделиях без разрушения [6, 7].

**Содержание лабораторной работы.** Работа включает два задания. Первое задание выполняется бригадой, состоящей из четырех звеньев, и заключается в оце-

ке прочности бетона в изделиях ультразвуковым импульсным методом. Второе задание, выполняемое бригадой из двух звеньев, заключается в оценке прочности бетона в изделиях механическим методом (например, с помощью эталонного молотка К. П. Кашкарова).

Оценка прочности бетона в изделиях ультразвуковым импульсным методом сводится к построению тарировочного графика и определению прочности бетона с помощью этого графика по результатам прозвучивания изделия (или специально приготовленных образцов) ультразвуковым прибором [6].

Сущность ультразвукового импульсного метода состоит в том, что измеряют скорость распространения через бетон переднего фронта продольной ультразвуковой волны  $V$  (называемую скоростью ультразвука). Исходя из зависимости  $R=f(V)$ , по измеренной  $V$  определяют прочность бетона. Для измерения  $V$  необходимо знать время прохождения ультразвука на участке определенной длины, называемой базой прозвучивания  $l$ . Так как скорость ультразвука в бетоне велика (примерно 5 км/с), то при обычных значениях  $l$  (до 1,5 м) приходится определять весьма малые интервалы времени, измеряемые в микросекундах. Для возбуждения ультразвуковых волн и измерения времени их прохождения через бетон применяют специальные приборы. В приборах последних моделей амплитуда временного интервала между зондирующим и прошедшим через бетон импульсами измеряют малогабаритным цифровым вольтметром. Приборы выполнены на полупроводниковых элементах и интегральных микросхемах. ГОСТ 17624—78 предусматривает применение приборов УК-10П и УФ-9011Ц. Допускается применять и другие приборы. Предельная основная относительная погрешность измерения времени распространения ультразвука должна быть  $\Delta \leq \pm (0,01 t + 0,1)$  мкс.

Оценка прочности бетона механическим методом с помощью эталонного молотка К. П. Кашкарова (или другого типа) основана на определении прочности бетона в зависимости от величины отношения диаметра лунки на поверхности бетона к диаметру лунки на эталонном стальном стержне [6, 7]. Прочность бетона определяют этими приборами по ГОСТ 22690.1—77.

В случае использования эталонного молотка К. П. Кашкарова необходимо учитывать следующее.

Эталонный молоток состоит из головки, рабочая часть которого снабжена стальным шариком  $d=15,88$  мм. В стакане молотка между его корпусом и шариком имеется отверстие, в которое вставляется эталонный стержень. Эталонные стержни представляют собой заостренные с одного конца стержни  $\varnothing 12$  или  $10$  мм, длиной  $10 \dots 15$  см.

Прочность бетона определяют следующим образом. Молотком ударяют по поверхности бетона. Шарик при этом образует лунки на эталонном стержне и поверхности бетона. Если лунки на бетоне требуется получить в точно определенных местах, то эталонный молоток устанавливают в заданные точки поверхности и наносят слесарным молотком удар по головке прибора. Головка эталонного молотка должна быть расположена перпендикулярно бетонной поверхности. В этом случае лунки имеют более правильную форму, чем после удара одним эталонным молотком. После каждого удара эталонный стержень передвигают в стакане молотка; при этом расстояние между центрами соседних отпечатков должно быть не менее  $10$  мм. На поверхности же бетона это расстояние должно быть  $\geq 30$  мм. Диаметр отпечатков должен быть в пределах: на бетоне  $0,3 \dots 0,7$  диаметра шарика, на стержне  $\geq 2,5$  мм. Измерение проводят с помощью углового масштаба, измерительной лупы, штангенциркуля и других приспособлений с погрешностью не более  $0,1$  мм.

Перед выполнением этой работы необходимо ознакомиться с основами определения прочности бетона ультразвуковым и механическими методами по нормативно-технической литературе [6, 7] и ГОСТ 17624—78, 22690.2—77. Работа выполняется в течение 3 ч.

**Задание 1.** Определить прочность бетона в изделии ультразвуковым импульсным методом с помощью ультразвукового прибора.

**Задание 2.** Определить прочность бетона механическим методом с помощью эталонного молотка К. П. Кашкарова.

**Указания к проведению лабораторной работы.** Задание 1 состоит из двух частей: первая часть — построение тарировочного графика, вторая — определение прочности бетона в изделии ультразвуковым методом. При проведении первой части работы три звена первой бригады изготавливают по четыре серии образцов размером  $100 \times 100 \times 100$  мм с постоянным расходом воды и различным расходом цемента (табл. 4.1)\*.

Т а б л и ц а 4.1. Расходы материалов для изготовления контрольных образцов для построения тарировочного графика

№ образцов	№ звена	Расход материалов, кг/м <sup>3</sup> , на серия образцов															
		1				2				3				4			
		цемент	вода	песок	щебень	цемент	вода	песок	щебень	цемент	вода	песок	щебень	цемент	вода	песок	щебень
1	1	400	170			500	170			550	170			600	170		
	2	400	190			500	190			550	190			600	190		
	3	400	210			500	210			550	210			600	210		

Примечание. Расход песка и щебня на 1 м<sup>3</sup> бетона рассчитать и внести в соответствующие графы таблицы.

После твердения по заданному режиму образцы прозвучивают на ультразвуковом приборе для определения скорости распространения ультразвука в бетоне. Испытания проводят при температуре 0...50°C (в изделиях — до 65°C). Температура бетона изделия на контролируемых участках не должна отличаться от температуры образцов, испытанных для построения тарировочной зависимости, более чем на ±5°C.

При прозвучивании генератор импульсов прибора передает кратковременный электрический импульс на преобразователь (первый щуп прибора), который находится в соприкосновении с испытываемым образцом. В преобразователе этот импульс превращается в ультразвук и поступает в бетон. Ультразвуковой импульс, пройдя образец, попадает на приемник (второй щуп), в котором ультразвуковые колебания превращаются в электрические импульсы. При испытании между щупами и поверхностью бетона должен быть акустический контакт, который обеспечивается смазыванием их тонким слоем технического вазелина. Полученные электрические импульсы усиливаются в усилителе и поступают на индикатор. По шкале индикатора определяют время  $t$  (мкс) прохождения ультразвукового импульса

\* При определении прочности бетона в изделиях состав бетона и используемые материалы при изготовлении образцов должны быть такими же, как в изделиях.

через слой бетона между шупами, который равен размеру образца (уточняемого замером перед испытанием) и соответствует длине распространения ультразвука в бетоне  $S$  (мм).

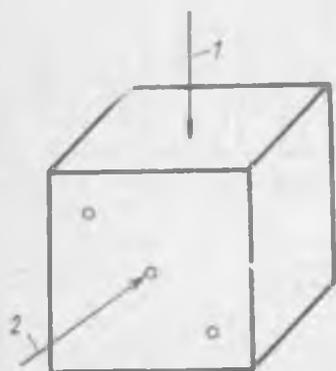


Рис. 4.1. Схема расположения контрольных точек при прозвучивании образца:

1 — направление укладки бетона; 2 — направление прозвучивания образца

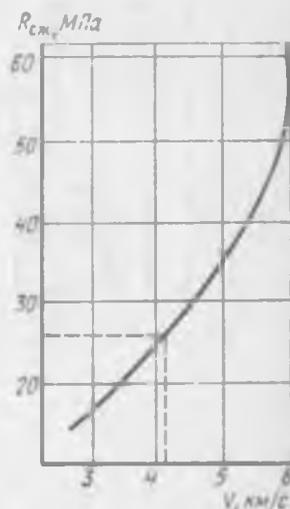


Рис. 4.2. Тарировочный график «скорость ультразвука — прочность бетона»

Замер производится в трех точках в направлении, перпендикулярном укладке бетона в формы (рис. 4.1). По трем измерениям находят среднее арифметическое значение скорости распространения ультразвука в бетоне (км/с)

$$V = S/t. \quad (4.1)$$

Затем прозвученные образцы испытываются на прессе для определения прочности бетона при сжатии. Результаты ультразвукового и механического испытаний образцов на прочность при сжатии заносят в табл. 4.2, 4.3.

Одновременно звено 4 и бригада I на заводе или на стенде в лаборатории осуществляет прозвучивание изделия ультразвуковым прибором. Места, в которых проводится определение прочности бетона, устанавливают в зависимости от конструкции изделия. Для от

здания акустического контакта (при базах измерения 10..50 см) поверхность необходимо смазать тонким слоем вазелина. Эти данные используют для построения тарировочного графика скорости ультразвука — прочность бетона (рис. 4.2). Проверка зависимости осуществляется по ГОСТ 21217—75.

Таблица 4.2. Результаты механических испытаний

№ серия	№ образца	Площадь одного образца, мм <sup>2</sup>	Средняя площадь трех образцов, мм <sup>2</sup>	Разрушающая нагрузка, Н		Прочность на сжатие одного образца, МПа	Средняя прочность на сжатие трех образцов, МПа
				на один образец	средняя на три образца		
1	2	3	4	5	6	7	8

Звено I

I	1						
	2						
	3						
II	1						
	2						
	3						
III	1						
	2						
	3						
IV	1						
	2						
	3						

и т. д.

По измеренному значению скорости распространения ультразвука и тарировочному графику, построенному для данного состава бетона, определяется прочность бетона в прозвучиваемом месте изделия (табл. 4.4).

Изделие можно заменить образцами. В этом случае звено 4 бригады I готовит еще одну серию образцов, прозвучивает их и по полученным показателям и тарировочному графику определяет прочность бетона. При отсутствии тарировочной зависимости, а также контрольных образцов из испытываемого изделия высверливают три образца и испытывают их, определяя среднее значение скорости  $v_0$ , а затем прочность бетона при

Т а б л и ц а 4.3. Результаты ультразвуковых испытаний

№ се- рии	№ об- раз- ца	Время прохождения ультразвука, мкс					Среднее значение размера образца, мм	Среднее значение скорости для трех образцов, км/с
		в точках			среднее значение для одного образца	среднее значение для трех образцов		
		1	2	3				
1	2	3	4	5	6	7	8	9
<i>Звено I</i>								
I	1 2 3							
II	1 2 3							
III	1 2 3							
IV	1 2 3							

и т. д.

Т а б л и ц а 4.4. Результаты определения прочности бетона  
в изделии ультразвуковым методом

№ изде- лия	Время прохождения ультразвука, мкс			Среднее значение времени, мкс	Среднее значение размера, мм	Среднее значение скорости, км/с	Проч- ность при сжатии (по та- рировоч- ному графи- ку), МПа
	в точках						
	1	2	3				
1 2 3							

сжатия  $R_0$ . В этом случае  $R_{сж}$  для тяжелого бетона ориентировочно можно определить по формулам

$$\text{при } R_{сж} \leq 30 \text{ МПа} \quad R_{сж} = R_0 (v^4/v_0^4), \quad (4.2)$$

$$\text{при } R_{сж} > 30 \text{ МПа} \quad R_{сж} = R_0 v / (8,87 v_0 - 7,87 v). \quad (4.3)$$

При выполнении задания 2 два звена бригады II изготавливают образцы-кубы размером  $150 \times 150 \times 150$  мм из бетонной смеси с расходом материалов, приведенным в табл. 4.5. Бетонная смесь уплотняется на лабораторной виброплощадке в соответствии с заданной

удобоукладываемостью. Образцы подвергают тепловой обработке по заданному режиму.

Прочность бетона при сжатии определяют следующим образом. С помощью молотка К. П. Кашкарова осуществляются удары по поверхности бетона. При этом стальной шарик образует лунки на эталонном круглом стержне ( $d_s$ ) и поверхности бетона ( $d_b$ ). Диаметр лунок следует измерять с точностью до 0,1 мм. Измерения проводят в нескольких точках образца на расстоянии между точками  $\geq 30$  мм. Затем вычисляют средние значения  $d_b$  и  $d_s$  всех лунок и по величине отношения  $d_b/d_s$ , с помощью тарировочной кривой\* (рис. 4.3) определяют прочность бетона при сжатии (табл. 4.6).

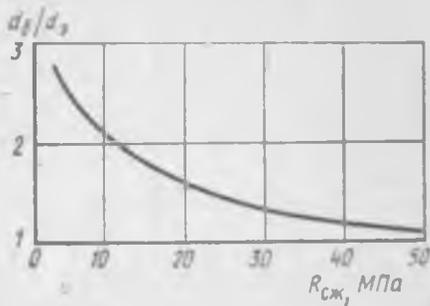


Рис. 4.3. Тарировочная кривая определения прочности бетона

Рис. 4.3. Тарировочная кривая\* (рис. 4.3) определяют прочность бетона при сжатии (табл. 4.6).

Таблица 4.5. Расход материалов на замес 10 л

№ образца	№ бригады	№ звена	Жесткость, с	Расход цемента на 1 м³ бетонной смеси, кг	Расход материалов на опытный замес			
					цемент, кг	вода, л	песок, кг	щебень, кг
1	II	1	10 ... 20	300	3		7	12
2			10 ... 20	400	4		6,6	11,4
3			10 ... 20	500	5		7,77	10,3
4		2	10 ... 20	600	6		5,8	10,2

Примечание. Расход воды откорректировать согласно требуемой жесткости.

Имея тарировочную кривую, описанным выше способом можно определить прочность бетона в изделии.

После проведения работы бригады и звенья обмениваются результатами экспериментальных исследований, обсуждают их и делают соответствующие частные и общие выводы. В отчете должны быть отмечены по-

\* Тарировочную кривую определения прочности бетона  $R_{сж}$  —  $d_b/d_s$  строят заранее.

ложительные и отрицательные стороны определения прочности бетона в изделиях без разрушения исследуемыми методами.

Т а б л и ц а 4.6. Результаты определения прочности бетона на сжатие

№ бригады	№ образцов	$d_0$	$d_0$	$d_0/d_0$	$R_{сж}$ по тарировочной кривой
<i>Звено 1</i>					
II	1	и т. д.			
	2				
	3				

#### 4.2. Лабораторная работа № 19. Статистический метод контроля прочности бетона с учетом его однородности

Цель работы. Ознакомиться со статистическим методом контроля прочности бетона с учетом его однородности по данным контрольных испытаний прочности бетона. Провести анализ работы технологической линии (комплекса) и установить статистические характеристики и требуемую прочность бетона для работы в новом контролируемом периоде.

Введение. При контроле качества бетона, а также при контроле и анализе производственных процессов широко применяются математическая статистика и статистические методы [3]. Применение статистических методов для контроля прочности бетона позволяет достичь постоянства принятой при расчете конструкций обеспеченности нормативных сопротивлений бетона. При этом требования к прочности бетона назначают с учетом фактической однородности, прочности, характеризующей величиной коэффициента вариации прочности бетона. На заводах сборного железобетона, изготовляющих бетон с высокой однородностью, требуемая прочность бетона по сравнению с нормируемой должна быть снижена с соответствующим сокращением расхода цемента или улучшением других технико-экономических показателей. В зависимости от технического уровня заводов, качества сырья и технологической дисциплины значение коэффициента вариации прочности бетона может отличаться от принятого среднего значения и колебаться от 4...6 до 20...25%. Следовательно, изделия, имеющие высокую однородность бетона (низкий коэффициент вариации), будут иметь лишний

запас прочности, а имеющие повышенный коэффициент вариаций — недостаточный запас ее, что и должно учитываться при назначении прочности бетона [2, 7, 15].

**Содержание лабораторной работы.** Работа состоит из нескольких заданий, выполняемых отдельным звеном. Каждое звено определяет величину коэффициента вариации и в зависимости от его значения устанавливает требуемую прочность бетона с оценкой ее экономичности. Работа выполняется в течение 3 ч. Примерные задания по выполнению этой работы приводятся ниже\*.

**Задание 1.** Определить требования к прочности бетона с учетом фактической однородности прочности бетона по результатам испытаний контрольных образцов за месяц работы технологической линии. Линия выпускает плиты покрытий из бетона прочностью 30 МПа с отпускной прочностью, равной 70% от заданной. Каждую смену отбирается проба бетона, из которой готовят образцы для контроля отпускной прочности бетона. Цех работает 5 дн в неделю в три смены, а в субботу в две смены. В качестве условной партии для расчета статистических характеристик принять точную продукцию цеха.

Образец выписки исходных данных из лабораторного журнала завода железобетонных изделий за месяц работы технологической линии и перечень статистических характеристик, подлежащих определению, приводится в табл. 4.7. Количество серий образцов с показателями средней прочности бетона ( $R_i$ ) должно быть не менее 20...30. Исходные показатели (гр. 1...4 табл. 4.7) выдаются студентам заранее.

**Задание 2.** Аналогично заданию 1, но исходные данные принимаются за другой месяц работы этой же линии.

**Задание 3.** Аналогично заданию 1, но исходные данные принимаются по результатам испытаний образцов также за месяц работы при выпуске плит перекрытий по конвейерной технологии из бетона прочностью 20 МПа.

---

\* Задания и методика могут быть использованы студентами, работающими в научном студенческом обществе. В этом случае исходные показатели следует брать из лабораторного журнала завода ЖБИ.

Таблица 4.7. Данные для определения величины коэффициента вариации прочности бетона

Исходные показатели				Определяемые характеристики				
1	2	3	4	5	6	7	8	9
№ условной партии <i>m</i>	Дата испытаний	Смена	$R_i$ , МПа	$R_m$ , МПа	$W_m$ , МПа	$d$	$S_m$ , МПа	$V_m$ , %

Задание 4. Аналогично заданию 3, но исходные данные для выполнения задания принимаются за другой месяц работы линии.

Указания к проведению лабораторной работы. 1. Каждое звено должно ознакомиться с методикой статистического контроля прочности бетона, изложенной в ГОСТ 18105.0—80 — 18105.2—80. Основная терминология и определения при статистическом контроле прочности бетона приведена в прилож. 19.1 к данной лабораторной работе.

2. Звено производит расчеты с целью определения статистических характеристик, необходимых для определения величины коэффициента вариации. По результатам расчета заполняют гр. 5...9 табл. 4.7. Методика расчета приводится ниже.

3. Статистический контроль прочности бетона в зависимости от производственных условий может проводиться по двум схемам: с использованием для определения показателей однородности результатов контроля предыдущих партий бетона (схема А); с использованием для определения показателей однородности результатов контроля подлежащей приемке партии бетона (схема Б). При выполнении вышеприведенных заданий определение показателей однородности прочности бетона производится по схеме А.

4. В гр. 5 табл. 4.7 записывают результаты определения средней прочности бетона в партии  $R_m$ , которую вычисляют как среднее арифметическое значение единичных результатов определения прочности по формуле

$$R_m = \sum_{i=1}^n R_i/n, \quad (4.4)$$

где  $R_i$  — среднее значение прочности бетона серии об-

разцов (гр. 4), МПа;  $n$  — число серий образцов в партии (гр. 3).

5. В гр. 6 табл. 4.7 вписывают вычисления размаха прочности в партии  $W_m$  как разницу между наибольшим и наименьшим значениями средней прочности бетона серии по формуле

$$W_m = R_{l_{\max}} - R_{l_{\min}}. \quad (4.5)$$

6. В гр. 7 той же таблицы вписывают значения коэффициента  $d$ , зависящего от количества серий контрольных образцов, принимаемых по табл. 4.8.

Т а б л и ц а 4.8. Значения коэффициента

$n$	2	3	4	5	6
$d$	1,13	1,69	2,06	2,33	2,5

7. В гр. 8 заносят вычисленные значения среднеквадратичного отклонения в партии ( $S_m$ )

$$S_m = W_m/d. \quad (4.6)$$

8. В гр. 9 заносят значения коэффициента вариации в каждой партии ( $V_m$ )

$$V_m = S_m/(R_m \cdot 100). \quad (4.7)$$

9. По результатам вычислений определяют средний по партиям за анализируемый период коэффициент вариации  $V_n$ , который определяется делением итога гр. 9 ( $\Sigma V_m$ ) на число условных партий  $m$  гр. 1.

$$V_n = \sum_{m=1}^m V_m/m. \quad (4.8)$$

10. В зависимости от полученного значения коэффициента вариации прочности бетона  $V_n$  назначают требуемую прочность бетона  $R^r$ , которую при нормировании ее по прочности рассчитывают по формуле

$$R^r = K_r R_{\text{норм}}/100, \quad (4.9)$$

где  $K_r$  — коэффициент требуемой прочности (табл. 4.9);  $R_{\text{норм}}$  — нормируемая прочность бетона, отпускная и др.

11. Полученное значение требуемой прочности бетона сравнивают с заданной и делают вывод об эффек-

тивности работы технологической линии (по расходу цемента) за контролируемый период (за один месяц). Выводы каждого звена сравниваются между собой.

Таблица 4.9. Значения  $K_r$  для бетона тяжелого и легкого на пористых заполнителях при контроле по схеме А (по ГОСТ 18105.1—80)

Коэффициент вариации $V_p, \%$	$K_r, \%$ от нормируемой прочности при $n$ или $N_c$ , равном						
	1	2	3	4	6	10	30 и более
5	85	84	83	83	83	82	81
6	87	86	85	85	85	84	83
7	90	88	88	87	87	86	85
8	93	91	90	90	89	89	87
9	96	94	93	92	92	91	89
10	99	97	96	95	94	94	92
11	102	100	99	98	97	96	94
12	106	103	102	101	100	99	97
13	109	106	105	104	103	102	100
14	113	110	108	107	106	105	103
15	117	114	112	111	110	108	106
16	122	118	116	115	113	112	109
17	126	122	120	119	117	116	112
18	131	126	124	123	121	120	116
19		131	129	127	125	124	120
20	Область недопустимых значений вариаций				130	128	124

В отчете, составленном индивидуально каждым студентом, должны быть приведены примеры расчетов всех статистических характеристик, заключительные расчеты, а также выводы по ним.

Пример расчетов при выполнении, данной лабораторной работы приведен ниже.

**Пример.** Выполнить статистический контроль прочности бетона с учетом его однородности. Расчет выполняется применительно к заданию 1.

Исходные данные занесены в табл. 4.10 в гр. 1...4, результаты всех последующих расчетов приведены в гр. 5...9.

1. Определяется средняя прочность бетона (для партии 1) по формуле (4.4)

$$R_m = (20,8 + 21,3 + 21,6) / 3 = 21,2 \text{ МПа.}$$

Аналогично рассчитываются значения  $R_m$  для всех 26 партий и результаты заносятся в гр. 5.

2. Рассчитывается размах прочности бетона в партии по формуле (4.5). Например:  $W_m = 21,6 - 20,8 =$

$= 0,8$  МПа, результаты аналогичных расчетов  $W_m$  за-  
носятся в гр. 6.

Т а б л и ц а 4.10. Определение величины коэффициента  
вариации прочности бетона

Исходные показатели			Определение характеристик					
№ вир- тия	дата испы- таний	сме- на	$R_{f,}$ МПа	$R_{m,}$ МПа	$W_{m,}$ МПа	$d$	$S_{m,}$ МПа	$V_{m,}$ %
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	01.09.86	1	20,8	21,2	0,8	1,69	0,47	2,2
		2	21,3					
		3	21,6					
2	02.09.86	1	21,8	21,4	1,8	1,69	1,07	5,0
		2	22,1					
		3	20,3					
3	03.09.86	1	20,8	21,0	0,5	1,13	0,35	1,7
		2	21,3					
4	05.09.86	1	20,1	20,4	0,5	1,69	0,3	1,5
		2	20,4					
		3	20,6					
5	06.09.86	1	21,5	20,9	1,2	1,69	0,71	3,4
		2	20,3					
		3	20,9					
6	07.09.86	1	22,3	21,5	1,5	1,69	0,9	4,2
		2	20,8					
		3	21,5					
7	08.09.86	1	19,8	20,5	1,1	1,69	0,65	3,2
		2	20,8					
		3	20,9					
8	09.09.86	1	21,3	21,1	1,1	1,69	0,65	3,1
		2	21,0					
		3	22,1					
9	10.09.86	1	21,8	21,3	0,9	1,13	0,8	3,7
		2	20,9					

Исходные показатели			Определение характеристик					
№ партии	дата испытания	смена	$R_{f'}$ МПа	$R_{m'}$ МПа	$\sigma_{m'}$ МПа	$d$	$S_{m'}$ МПа	$V_{m'}$ %
1	2	3	4	5	6	7	8	9
10	12.09.86	1	19,6	20,7	2,7	1,69	1,6	7,5
		2	20,8					
		3	22,3					
11	13.09.86	1	21,3	21,2	2,6	1,69	1,52	7,2
		2	22,4					
		3	19,8					
12	14.09.86	1	21,3	21,4	0,4	1,69	0,24	1,1
		2	21,2					
		3	21,6					
13	15.05.86	1	20,8	21,5	1,5	1,69	0,88	4,1
		2	22,3					
		3	21,4					
14	16.09.86	1	22,5	21,2	3,2	1,69	1,89	8,9
		2	21,8					
		3	19,3					
15	17.09.86	1	21,5	21,2	0,6	1,13	0,53	2,5
		2	20,9					
16	19.09.86	1	22,5	21,8	1,7	1,69	1,0	4,5
		2	20,8					
		3	22,3					
17	20.09.86	1	21,0	21,3	0,5	1,69	0,3	1,4
		2	21,5					
		3	21,3					
18	21.09.86	1	20,9	21,5	1,1	1,69	0,65	3,1
		2	22,0					
		3	21,5					
19	22.09.86	1	21,3	21,9	2,2	1,69	1,3	6,0
		2	20,6					
		3	23,8					

Исходные показатели			Определение характеристик					
№ партии	дата испытаний	смена	$R_{1.}$ МПа	$R_{m.}$ МПа	$W_{m.}$ МПа	$d$	$S_{m.}$ МПа	$V_{m.}$ %
1	2	3	4	5	6	7	8	9
20	23.09.86	1	19,1	21,3	3,5	1,69	2,07	9,8
		2	22,3					
		3	22,6					
21	24.09.86	1	21,3	21,5	0,5	1,13	0,44	2,0
		2	21,8					
22	26.09.86	1	20,3	20,9	1,2	1,13	1,07	5,1
		2	21,5					
23	27.09.86	1	21,3	21,5	1,1	1,69	0,65	3,0
		2	22,2					
		3	21,1					
24	28.09.86	1	22,3	21,4	2,8	1,69	1,63	7,7
		2	21,4					
		3	19,5					
25	29.09.86	1	22,6	21,1	3,4	1,69	2,02	9,5
		2	21,4					
		3	19,2					
26	30.09.86	1	20,3	21,0	1,5	1,69	0,89	4,2
		2	20,9					
		3	21,8					
Итого...								115,6

3. Значения коэффициента  $d$  принимаются по табл. 4.8 и заносятся в гр. 7.

4. Рассчитываются значения среднеквадратичного отклонения в партии по формуле (4.6).

$$S_m = 0,8/1,69 = 0,47 \text{ МПа,}$$

результаты остальных аналогичных расчетов заносятся в гр. 8.

5. Определяется коэффициент вариации в каждой партии по формуле (4.7):  $V_m = (0,47/21,2) 100 = 2,2\%$ .

Аналогично рассчитываются остальные значения  $V_m$  и заносятся в гр. 9.

6. По результатам определений коэффициентов вариаций вычисляют средний по партиям (за сентябрь 1986 г.) коэффициент вариации по формуле (4.8):  $V_n = 115,6/26 = 4,5\%$ .

7. В зависимости от полученного значения среднего коэффициента вариации  $V_n = 4,5\%$  выбирают требуемую прочность бетона  $R^T$  вместо нормированной прочности 30 МПа по формуле (4.9):

$$R^T = K_T R_{\text{норм}} / 100.$$

Коэффициент требуемой прочности, по табл. 4.9 для  $V_n = 4,5\%$  и  $n = 3$   $K_T = 83\%$ , тогда  $R^T = 83 \cdot 30 / 100 \approx 25$  МПа, отпускная прочность вместо 21 МПа по заданию будет равна  $R^T_{\text{отп}} = 25 \cdot 0,7 = 17,5$  МПа. Уменьшенное значение  $R^T$  бетона по сравнению с заданной (30 МПа) получено за счет высокой однородности бетона. Снижение прочности бетона с 30 до 25 МПа может дать экономию цемента, уменьшить время твердения и т. п.

При использовании цемента М400 прочность бетона  $R_6 = AR_{\text{ц}}(\text{Ц/В} - \text{Б})$ . Тогда расход цемента для бетона  $R_6 = 30$  МПа составляет  $300 = 0,6 \cdot 400 \cdot (\text{Ц/В} - 0,5)$ ,  $\text{Ц/В} = (300 + 120) / 240 = 1,75$  при  $\text{В} = 190$  л/м<sup>3</sup>  $\text{Ц}_1 = 190 \cdot 1,75 = 335$  кг/м<sup>3</sup>.

Расход цемента для бетона  $R^T = 25$  МПа составляет  $250 = 0,6 \cdot 400 (\text{Ц/В} - 0,5)$ ,  $\text{Ц/В} = (250 + 120) / 240 = 1,55$ ,  $\text{Ц}_2 = 190 \cdot 1,55 = 295$  кг/м<sup>3</sup>, т. е. экономия цемента за счет высокой однородности прочности бетона ( $V_n < 5\%$ ) может составить  $\text{Ц}_1 - \text{Ц}_2 = 335 - 295 = 40$  кг/м<sup>3</sup> бетона.

#### Приложение 19.1

#### Основные термины и обозначения статистического контроля прочности бетона сборных и монолитных конструкций

Термин	Условное обозначение	Определение
Серия образцов бетона	—	Контрольные образцы-кубы, изготовленные из одной пробы бетонной смеси, твердевшие в одинаковых условиях и испытанные в одном возрасте
Проба бетонной смеси	—	Порция бетонной смеси одного состава, отобранная от одного замеса или транспорт-

Термин	Условное обозначение	Определение
Контролируемый вч-сток конструкции	—	<p>ной емкости, для изготовления одной или нескольких серий контрольных образцов</p> <p>Участок поверхности конструкции площадью 100... 400 см<sup>2</sup>, для которого в качестве единичного значения принимается среднее значение результатов определения прочности бетона неразрушающими методами</p>
Партия бетона	—	<p>Контролируемый объем бетона одного производственного состава, изготовленный за установленное настоящими стандартами время и относящийся к одному технологическому комплексу</p>
Технологический комплекс	—	<p>Одна или несколько технологических линий на предприятиях по производству сборных железобетонных изделий и конструкций или одна или несколько секций по приготовлению бетонной смеси на заводах товарного бетона, для которых контроль бетона одинаковой прочности и технологии производится по общим статистическим характеристикам</p>
Подготовительный период	—	<p>Период времени, в течение которого выполняются подготовительные работы, необходимые для перехода на контроль прочности неразрушающими методами по данному стандарту: обследование контролируемых конструкций и параллельный контроль по образцам и неразрушающими методами</p>
Контролируемый период	—	<p>Период времени, в течение которого при контроле сборных конструкций по схеме А коэффициент вариации прочности бетона принимается постоянным, определенным за предшествующий анализируемый период</p>
Анализируемый (базисный) период	—	<p>Период времени, за который при контроле сборных конструкций по схеме А определя-</p>

Термин	Условное обозначение	Описание
		<p>статистические характеристики, служащие для назначения требуемой прочности последующим</p> <p>гические характеристики для назначения требуемой прочности контролируемым</p>
Проектный возраст бетона	—	<p>период, в течение которого бетон, предусмотренный в проекте для достижения проектной прочности</p>
Косвенная характеристика прочности бетона	—	<p>Характеристика прочности бетона, определяемая скоростью распространения ультразвука</p>
Средний уровень прочности бетона	$R_y$	<p>Средняя прочность бетона, для которой подбирается его состав и которая поддерживается в процессе производства бетона, заданная в ГОСТах или технической документации</p>
Нормируемая прочность бетона	$R_{норм}$	<p>Прочность бетона, установленная в документах в установленном порядке</p>
Фактическая прочность партии бетона	$R_m$	<p>Прочность бетона, определяемая по результатам испытаний контрольных образцов или неразрушающими методами непосредственно в конструкциях</p>
Требуемая прочность бетона	$R^t$	<p>Минимально допустимые значения средней прочности бетона на, средней инструкции в возрасте 28 суток, устанавливаемые лабораториями предприятий и строительными лабораториями с учетом значения коэффициента вариации</p>
Размах прочности бетона	$W_m$	<p>Разность между максимальным и минимальным значениями фактической прочности отдельных серий бетона</p>
Среднеквадратичное отклонение прочности бетона	$S_m$	<p>Показатель однородности бетона</p>
Коэффициент вариации бетона в каждой партии	$V_m$	<p>Относительный показатель однородности прочности бетона, выраженный в процентах от среднего значения прочности</p>
Коэффициент вариации бетона средний по пар-	$V_n$	<p>То же</p>

Термин	Условное обозначение	Определение
Период за анализируемый период Номер серии	<i>i</i>	Порядковый номер серии образцов, участка конструкции или конструкции в партии
Номер партии	<i>m</i>	Порядковый номер партии сборных конструкций за анализируемый или контролируемый период, а также порядковый номер партии монолитного бетона
Количество серий контрольных образцов	<i>N</i>	Количество серий контрольных образцов, характеризующих прочность бетона для сборных конструкций в возрасте 28 сут за анализируемый период

#### 4.3. Лабораторная работа № 20. Текущий контроль качества бетонной смеси и прогнозирование отпускной и заданной прочности бетона\*

**Цель работы.** Изучить метод определения фактического водоцементного отношения свежеприготовленной бетонной смеси, с помощью которого можно осуществлять текущий контроль ее качества и прогнозировать отпускную и заданную прочность бетона.

**Введение.** Наиболее часто нормируется и контролируется предел прочности бетона при сжатии.

Основными факторами, определяющими прочность бетона при сжатии, являются прочность цементного камня и плотность бетона, которые зависят, в свою очередь, от водовяжущего отношения. Зависимость прочности бетона от водовяжущего отношения является одним из основных законов в технологии бетона, позволяющих регулировать ее. Для выражения конечной зависимости между прочностью бетона при сжатии и водоцементным отношением предложены различные эмпирические формулы, с помощью которых можно прогнозировать среднестатистическую прочность бетона при принятых значениях В/Ц или Ц/В. Однако в связи с влиянием различных технологических факторов, глав-

\* Рекомендуется для факультативного проведения в научно-исследовательском студенческом обществе.

ным образом из-за невозможности практически строгого сохранения расчетного водоцементного отношения, значения фактических прочностей отличаются от требуемых.

Определение прочности испытанием бетонных образцов или неразрушающими методами позволяет только констатировать прочность бетона в готовом изделии, а необходимое корректирование прочности и расхода цемента возможно только для следующей партии изделий, но только со значительной погрешностью. Поэтому применение методов, позволяющих определить фактическое водоцементное отношение в свежеприготовленной бетонной смеси, имеет большое практическое и экономическое значение для заводов ЖБИ, так как позволяет точно прогнозировать прочность бетона и обеспечить тем самым минимальный расход цемента для требуемой прочности бетона.

Разработана методика определения фактического водоцементного отношения в свежеприготовленной бетонной смеси [9], позволяющая осуществлять текущий контроль качества бетонной смеси и прогнозировать отпускную и заданную прочность бетона на заводах железобетонных изделий. Метод основан на изменении концентрации раствора хлорида натрия, вводимого в свежеприготовленную бетонную смесь, за счет разбавления этого раствора водой затворения. По изменению концентрации раствора соли рассчитывается фактическое содержание воды в бетоне (см. § 1.3).

Определив за 15...20 мин фактическое водоцементное отношение бетонной смеси, можно достаточно точно прогнозировать прочность бетона, используя для этого тарифовочный график  $R_b = f(V/C_{\text{факт}})$ .

Текущий контроль качества бетонной смеси на заводах (определение  $V/C_{\text{факт}}$ ) следует осуществлять не менее одного раза в смену. В случае получения высокого значения  $V/C_{\text{факт}}$ , что не обеспечивает отпускную и заданную прочность бетона, состав бетонной смеси следует откорректировать, уменьшив количество воды.

Если же полученные значения  $V/C_{\text{факт}}$  обеспечивают более высокие показатели отпускной и заданной прочности, то это указывает на уменьшения расхода цемента, что является резервом его экономии.

**Содержание лабораторной работы.** Бригада студентов получает одно задание. Исходя из того, что для построения тарифовочного графика для определения прочности бетона по фактическому водоцементному от-

ношению ( $V/C_{\text{факт}}$ ) необходимо получить 3...4 точки для бетонных смесей, имеющих одинаковую удобоукладываемость, бригада студентов разбивается на 3..4 звена. Каждое звено рассчитывает расход материалов на  $1 \text{ м}^3$  бетонной смеси и на замес, отличающийся друг от друга значением водоцементного отношения в пределах от 0,35...0,40 до 0,5...0,65 в зависимости от принятой жесткости или подвижности. Из каждого замеса отбирается проба бетонной смеси для определения фактического водоцементного отношения, а из оставшейся смеси готовят образцы для определения отпускной и заданной прочности бетона, а также прочности бетона в возрасте 28 сут после пропаривания.

Во всех замесах применяются одинаковые исходные материалы, количество воды подбирают из условия получения одинаковой во всех замесах подвижности или жесткости бетонной смеси.

Зная значения фактического водоцементного отношения ( $V/C_{\text{факт}}$ ) и соответствующие величины прочности бетона, полученные при испытании образцов, строят тарировочный график  $R_{\text{сж}} = f(V/C_{\text{факт}})$ . По построенному графику, зная  $V/C_{\text{факт}}$  свежеприготовленной бетонной смеси, можно прогнозировать отпускную и заданную прочность бетона при сжатии. Работа выполняется в два этапа и рассчитана на 4...5 ч.

**Задание 1.** Определить фактическое водоцементное отношение и построить тарировочный график для определения отпускной и заданной прочности бетона по результатам опытов, проводимых на бетонных смесях с подвижностью 4 см. Материалы: портландцемент М400, щебень фракционированный с  $D_{\text{нзвб}} = 20$  мм; песок рядовой. Рассчитать расход материалов на  $1 \text{ м}^3$  бетона прочностью 20 МПа, приняв для звена 1 расход цемента и воды 270 и 190 кг. Расход цемента для 2, 3, 4-го звеньев соответственно 310, 350 и 390 кг.

**Задание 2.** Отличается от первого тем, что опыты проводятся на бетонных смесях с жесткостью 20 с. Кроме того, рассчитывается расход материалов на  $1 \text{ м}^3$  бетона прочностью 30 МПа, приняв для звена 1 расход цемента и воды 320 и 165 кг соответственно; расход цемента для 2, 3 и 4-го звеньев — 360, 400 и 440 кг соответственно.

**Указания к проведению лабораторной работы.** 1. Каждое звено подбирает состав бетонной смеси, рассчитывает расход материалов на  $1 \text{ м}^3$  и для приготовления

замеса объемом 10 л (например, используя методику расчета работы № 5).

2. При приготовлении замесов уточняют количество воды для получения заданной подвижности, корректируя ее по методике, приведенной в § 1.3. Результаты расчетов составов бетона заносятся в табл. 4.11 (в качестве примера приведены расчеты для задания 1).

Таблица 4.11. Результаты расчетов состава бетона

№ знака	Подвижность бетонной смеси, см	Расход материалов (кг/м <sup>3</sup> ) бетонной смеси (над чертой) и кг/замес (под чертой)				
		цемента	воды	песка	щебня фракции, мм	
					5 ... 10	10 ... 20
I	4	<u>270</u>	<u>190</u>	<u>750</u>	<u>460</u>	<u>690</u>
		2,7	2,05*	7,5	4,6	6,9
и т. д.						

\* Указано откорректированное количество воды.

3. От каждого откорректированного замеса отбирают и отвешивают 2 кг бетонной смеси и определяют фактическое водоцементное отношение по методике, приведенной в § 1.3. Из оставшейся бетонной смеси одновременно изготавливают три формы образцов размером 100×100×100 мм; две формы пропаривают по заданному режиму, образцы из третьей формы выдерживают в камере нормального хранения в течение 28 сут.

4. В каждом замесе определяют среднюю плотность бетонной смеси и рассчитывают фактический расход материалов по методике, приведенной в § 1.3. Результаты опытов и расчетов заносят в табл. 4.12.

5. Второй этап работы начинается с испытания образцов для определения  $R_{отп}$  (отпускной прочности через 1 сут после пропаривания),  $R_{28 \text{ сут}}^{\text{проп}}$  (прочности после пропаривания в возрасте 28 сут) и  $R_{28 \text{ сут}}^{\text{н. хран.}}$  (заданной прочности). Результаты испытаний заносят в табл. 4.12.

6. По результатам опытов строят тарировочный график  $R=f(V/C_{\text{факт}})$ . При его построении по оси абсцисс откладывают найденные значения  $V/C_{\text{факт}}$ , а по оси ординат — соответствующие значения отпускной и заданной прочности бетона, а также прочности в воз-

Таблица 4.12. Сводные результаты испытаний бетона с различным водоцементным отношением

№ бригады	№ ящика (замеса), заданная	Подвижность бетонной смеси, см	Средняя плотность бетонной смеси, кг/м <sup>3</sup>	Водоцементное отношение		Фактический расход материалов, кг/м <sup>3</sup> бетонной смеси				Предел прочности при сжатии, МПа	
				расчетное	фактическое	цемента	воды	песка	щебня	после пропаривания	после нормального твердения через 28 сут
1	1										
	2										
	3										
	4										

и т. д.

расте 28 сут после пропаривания. Ниже оси абсцисс параллельно ей проводят прямую, на которой для сопоставления откладывают соответствующие значения  $V/C_{расч}$  (рис. 4.4).

7. По построенному графику определяют  $V/C_{факт}$ , обеспечивающее получение заданной и отпускной прочности бетона.

8. Проанализировав полученные звеньями результаты, необходимо сделать общие выводы.

9. Зная  $V/C_{факт}$  свежеприготовленной бетонной смеси по построенному графику, можно прогнозировать отпускную и заданную прочность бетонов (этот метод прошел проверку в производственных условиях на некоторых заводах ЖБИ Москвы).

Пример текущего контроля бетонной смеси и прогнозирования отпускной прочности бетона приведен ниже.

Пример. Рассчитать и провести текущий контроль качества свежеприготовленной бетонной смеси для прог-

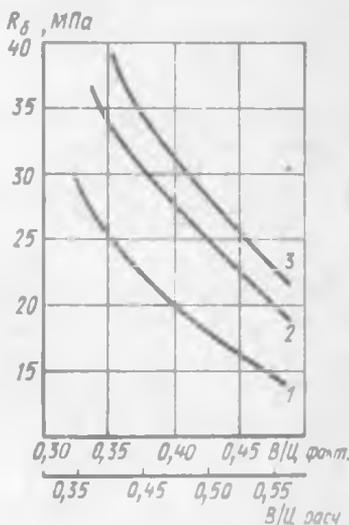


Рис. 4.4. Тарировочный график для определения прочности по  $V/C_{факт}$ :

1 — отпускной; 2 — после пропаривания в возрасте 28 сут; 3 — после 28 сут нормального твердения

нозирования отпускной и заданной прочности бетона. Требуется получить бетон с отпускной прочностью 20 МПа. Испытанию подлежит бетонная смесь следующего состава (на 1 м<sup>3</sup> бетона): цемента — 535 кг, песка — 644 кг, щебня — 970 кг и воды — 244 л; средняя плотность бетонной смеси — 2370 кг/м<sup>3</sup>. Необходимо

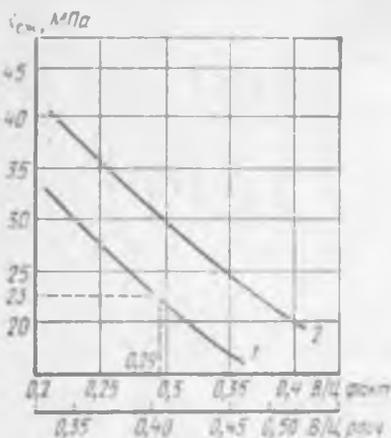


Рис. 4.5. Тарировочный график для определения прочности по В/Ц<sub>факт</sub>:

1 — отпускной; 2 — после пропаривания в возрасте 28 сут

установить, будет ли приготовленный бетон иметь заданную прочность?

1. От испытуемой бетонной смеси берут порцию бетона в 2 кг. К ней доливают 100 мл 0,1н раствора хлорида натрия. Из хорошо перемешанной смеси отсасывают с помощью прибора жидкость. Из этой жидкости отбирают по 1 мл исследуемой пробы на три параллельных титрования, осуществляемых как указано в § 1.3 настоящего практикума.

2. Пусть на титрование трех проб соответственно пошло 0,43; 0,45 и 0,44 мл 0,098н раствора

AgNO<sub>3</sub>, титр которого по NaCl равен 0,098 мг·эquiv/мл. Для расчета берут среднее арифметическое значение трех титрований, т. е. 0,44 мл и вычисляют концентрацию хлоридов C<sub>2</sub> в отобранной из бетонной смеси жидкости по формуле (1.26)

$$C_2 = 0,098 \cdot 0,44 / 1,0 = 0,043 \text{ мг·эquiv/мл.}$$

3. По формуле (1.30) вычисляют фактическое содержание воды в свежеприготовленной бетонной смеси массой 2 кг:

$$V = 100(0,1 - 0,043) / 0,043 = 132 \text{ мл.}$$

4. Далее рассчитывают содержание цемента в этой же смеси:

$$Ц = 2 \cdot 535 / 2370 = 0,452 \text{ кг.}$$

5. Находят фактическое водоцементное отношение:

$$В/Ц_{\text{факт}} = 132 / 452 = 0,29.$$

6. По тарировочному графику (рис. 4.5), построенному для бетонных смесей с тем же расходом цемента, что и испытываемая, на цементе и заполнителях, применяемых на данном предприятии, но с различным водоцементным отношением, меняющимся в небольшом интервале, в котором находится и необходимое для данного производства значение, находим отпускную прочность бетона ( $R_{отп}$ ). Для  $V/C_{факт} = 0,29$  отпускная прочность бетона составляет 22 МПа. Так как отпускная прочность соответствует заданной, то состав бетонной смеси не нуждается в корректировании. Эта бетонная смесь обеспечит получение прочности в возрасте 28 сут в 30 МПа (см. рис. 4.5).

## ГЛАВА 5

### МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ К ЛАБОРАТОРНЫМ РАБОТАМ ПО РАЗДЕЛУ КУРСА

#### «ПОВЫШЕНИЕ ДОЛГОВЕЧНОСТИ БЕТОННЫХ И ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ»

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 в курсах сопротивления материалов, строительной механики и железобетона.

К физико-химическим воздействиям относятся климатические воздействия, характеризуемые 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, приводящие к снижению его прочности, к разрушению конструкций из него [10, 16]. 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 определяет долговечность выполненных из него конструкций. Степень долговечности конструкций определяется календарным сроком 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 требова-

ния, регламентирующие воздействия окружающей среды, устанавливаются в соответствии с нормами при проектировании зданий и сооружений по СНиПам. Эти требования указывают в рабочих чертежах изделий. Кроме того, они входят в стандарты на соответствующие изделия. Защиту конструкций из бетона и железобетона следует осуществлять по СНиП 2.03.11—85.

Долговечность железобетонных конструкций в большой степени зависит также от способности бетона защищать стальную арматуру от коррозии [1, 10]. 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 [1, 10, 16].

Для оценки стойкости бетона по отношению к внешним воздействиям существуют различные методы, на некоторые из них разработаны специальные стандарты (например, ГОСТ 12730.0—78, 12730.5—84 — на определение водопоглощения, водонепроницаемости и других характеристик структуры бетона).

Для оценки коррозионной стойкости к воздействию агрессивных сред в настоящее время предложено много методов, главные из которых основаны на: измерении массы образцов; исследовании прочностных и упругих характеристик; изменении деформаций расширения; определении скорости коррозии; определении изменений в структуре; визуальных наблюдениях.

Кроме того, для этих целей проводят исследования фильтрационной способности материала, а также рентгенографический, петрографический и термический анализы.

Главная задача определения стойкости бетона к различного рода воздействиям состоит в моделировании их в ускоренном режиме, с тем чтобы за минимальный срок оценить долговечность бетона. Ускорение процесса воздействия различных факторов на свойства бетона является чрезвычайно сложной задачей. Для ускорения процессов коррозии бетона применяют различные физико-химические приемы, в частности: увеличение реагирующей поверхности исследуемого материала (испытания в этом случае ведутся при перемешивании измельченного материала с агрессивной средой или фильтрации последней через измельченный материал), однако этот прием учитывает только химическую сторону коррозии; увеличение скорости обмена агрессивного раствора у поверхности материала, это обеспечивается фильтрацией агрессивного раствора через образец под давлением или под вакуумом; увеличение концентрации агрессивного раствора; попеременное смачивание материала в агрессивной среде и высушивание его; испытание образцов в напряженном состоянии и др.

Несмотря на значительное количество и разнообразие методов определения стойкости бетона, они должны по возможности удовлетворять следующим основным требованиям: протекание аналогичных физико-химических или физических процессов в условиях, аналогичных натурным; проведение испытаний за минимальный срок; базирование на объективных, прямых, количественных и воспроизводимых критериях, определяемых с достаточной точностью и надежностью; использование серийно выпускаемого промышленностью оборудования; возможность автоматизации; небольшие трудозатраты; получение таких параметров, которые дают возможность моделировать процесс и предвидеть, выраженную в количественной оценке долговечность бетона.

Учитывая, что на долговечность бетонных и железобетонных конструкций наибольшее влияние оказывают агрессивные среды, вызывающие физико-химическую коррозию, в лабораторных работах, приведенных ниже, рассматриваются вопросы, связанные с изучением относительной стойкости различных бетонов при солевой, физической и химической коррозиях, а также с поведением арматуры в бетонах на различных вяжущих, в том числе под воздействием агрессивных сред. При выполнении этих работ использованы современные методы исследований, наиболее доступные для учебных лабораторий. Эти методы могут быть использованы студентами также при разработке научно-экспериментальной части курсового и дипломного проекта и при проведении других видов научных исследований.

### *5.1. Лабораторная работа № 21. Определение относительной стойкости бетона на различных вяжущих под воздействием агрессивных сред*

**Цель работы.** Исследовать относительную стойкость бетона на различных вяжущих под воздействием агрессивных сред.

**Введение.** 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 коррозии бетона [10]: 1) процессы коррозии, которые возникают в бетоне при действии жидких сред, способных растворять цементный камень и выносить его из структуры бетона; 2) процессы, при которых происходят химические взаимодействия — обменные реакции — между цементным камнем и раствором; образующиеся продукты реакции либо легко растворимы и выносятся из структуры, либо отлагаются в виде аморфной массы, не обладающей вяжущими свойствами; этот вид коррозии возникает при действии на бетон растворов кислот и некоторых солей; 3) процессы, вызывающие накопление и кристаллизацию малорастворимых продуктов реакции с увеличением объема твердой фазы; к этому виду относится коррозия при действии сульфатов.

**Содержание лабораторной работы.** Она состоит из трех заданий, каждое из которых выполняется бригадой из двух звеньев. Работа выполняется в два этапа. Общая продолжительность работы 5 ч.

Каждая бригада исследует относительную стойкость бетона на различных вяжущих под воздействием агрессивных сред, указанных в задании. Относительная стойкость бетона определяется по: снижению прочности бетона при сжатии и изгибе на образцах-балоч-

ках размером  $40 \times 40 \times 160$  мм: уменьшению массы образцов; изменению их размеров; визуальным наблюдениям при хранении образцов в агрессивных средах и в воде (взятой в качестве эталона) в течение 1,5...2 мес.

**Задание 1.** Определить относительную стойкость бетона в жидкой агрессивной среде, характеризующей процессы коррозии II вида. Исследования проводятся на образцах, изготовленных из раствора состава 1:3 по массе (вяжущее: песок). Подвижность растворной смеси по погружению стандартного конуса 3...7 см. **Материалы:** вяжущее — портландцемент, пуццолановый портландцемент, сульфатостойкий портландцемент, гипсоцементнопуццолановое вяжущее; песок средней крупности, кварцевый. Агрессивная среда (например, соляная или серная кислота) с водородным показателем  $pH < 4$ .

**Задание 2.** Определить относительную стойкость бетона в жидкой агрессивной среде, характеризующей процессы коррозии II вида. Исследование проводится на таких же образцах и с использованием тех же материалов, что и в задании 1. Агрессивная среда — содержание магниезальных солей в пересчете на ион  $Mg^{2+} > 3000$  мг/л.

**Задание 3.** Определить относительную стойкость бетона при солевой физической коррозии (процессы коррозии III вида). Исследования проводятся на таких же образцах и с использованием тех же материалов, что и в задании 1. Агрессивная среда — содержание сульфатов в пересчете на ион  $SO_4^{2-} > 5000$  мг/л.

**Указания к проведению лабораторной работы.** 1. Каждое звено бригады рассчитывает расход материалов на  $1 \text{ м}^3$  растворной смеси, исходя из принятой средней плотности раствора (например,  $2200 \text{ кг/м}^3$ ), а затем пересчитывает расход материалов на замес объемом 3 л.

2. Первое звено каждой бригады использует в качестве вяжущего портландцемент и пуццолановый портландцемент, второе — сульфатостойкий портландцемент и гипсоцементнопуццолановое вяжущее. При изготовлении раствора на ГЦП вяжущем в воду затворения необходимо ввести замедлитель схватывания (например, СДБ) в количестве 0,3...0,4% от массы вяжущего.

3. Каждое звено изготавливает два замеса растворной смеси. Расход воды подбирают из условия получения заданной подвижности для раствора на портландце-

менте. Для растворов на других вяжущих водовяжущее отношение остается постоянным (как для первого замеса на портландцементе).

4. Из каждого замеса изготавливают образцы-балочки в количестве 12 шт. ( $3 \times 2 \times 2 = 12$ , где 3 — количество образцов; 2 — условия хранения образцов (вода и агрессивная среда); 2 — срок испытания). Расход материалов на замес для каждой бригады заносится в табл. 5.1.

Т а б л и ц а 5.1. Расход материалов на замес

№ бригады	№ загла	№ замеса	Вид вяжущего	Подвижность смеси, см	Средняя плотность смеси, кг/м <sup>3</sup>	Расход материалов на замес, кг		
						вяжущего	веса	воды
I	1	1	Портландцемент					
		2						
	2	1	Сульфатостойкий портландцемент					
		2	ГЦП вяжущее					

и т. д.

Время уплотнения на виброплощадке и режим тепловлажностной обработки указывает преподаватель. При изготовлении в торцы образцов-балочек (каждого состава) вставляют специальные реперы, которые покрывают затем защитным покрытием для предотвращения от коррозии. Этот объем работы должен быть выполнен в течение 2 ч.

5. После тепловой обработки промаркированные образцы бригад I и II помещают в заранее приготовленную агрессивную среду и в воду. (Из каждого состава три образца с реперами и три без них в одну среду.) Перед укладкой образцов в среды их маркируют и осматривают. Через сутки после насыщения в воде и аг-

рессивных растворах образцы без реперов (по 3 шт.) испытывают для определения прочности при изгибе и сжатии. Образцы с реперами сразу взвешивают, определяют первоначальную длину на приборе любого типа и вновь помещают в те же среды. Образцы при солевой физической коррозии (бригады III), высушенные до постоянной массы, насыщаются в указанной агрессивной среде в течение 30 мин под вакуумом при остаточном давлении 100...120 Па, после этого высушиваются при температуре 60 °С. Последующие испытания проводятся на образцах, прошедших 10, 25 и 50 циклов попеременного высушивания — насыщения.

6. Продолжение работы проводится по истечении указанного в задании срока (на этот объем работы требуется еще 3 ч). Прошедшие испытания образцы осматривают, фиксируют изменения, взвешивают, определяют длину образцов, а затем прочность при изгибе и сжатии. Полученные результаты каждым звеном заносят в табл. 5.2. На основании данных, приведенных в табл. 5.2, определяют коэффициент стойкости по формулам.

$$K_{R_{из}} = R_{из}^{агр-сп} / R_{из}^{водн.хр}, \quad (5.1)$$

$$K_{R_{сж}} = R_{сж}^{агр-сп} / R_{сж}^{водн.хр}, \quad (5.2)$$

где  $R_{из}^{водн.хр}$  и  $R_{сж}^{водн.хр}$  — прочность при изгибе и сжатии после указанного в задании срока в воде, а  $R_{из}^{агр-сп}$  и  $R_{сж}^{агр-сп}$  — то же, при хранении в агрессивных средах. При определении коэффициента стойкости  $R_{из}$  и  $R_{сж}$  берется среднее (по результатам испытания трех образцов из каждого замеса). Результаты по относительной стойкости раствора на различных вяжущих под воздействием исследуемых агрессивных сред заносят в табл. 5.3.

На основании полученных результатов исследований и анализа их делают выводы об относительной стойкости бетона на различных вяжущих в исследуемых агрессивных средах; указываются причины их разрушения в этих средах. Кроме этого, в случае необходимости обосновываются надежные и экономичные мероприятия по защите конструкций, обеспечивающие нормальный срок службы их с учетом долговечности\* по СНиП 2.03.11—85.

\* Вид конструкции и степень долговечности назначает преподаватель.



Таблица 5.3. Относительная стойкость раствора на различных вяжущих после испытаний в агрессивных средах

№ бригады	№ заека	№ замеса	Вид вяжущего	Вид агрессивной среды	Показатели относительной стойкости раствора			
					Потеря мас. см. %	$\Delta L$ , мм/м	$K_{R_{из}}$	$K_{R_{сж}}$
1	2	3	4	5	6	7	8	9
I	1	1	Портланд-цемент	Агрессивная среда с $pH < 4$				
		2	Пуццолановый портландцемент					
	2	3	Сульфатостойкий портландцемент					
		4	ГЦП вяжущее					
II	1	1	Портланд-цемент	Агрессивная среда с $Mg^{2+} > 3000$ мг/л				
		2	Пуццолановый портландцемент					
	2	3	Сульфатостойкий портландцемент					
		4	ГЦП вяжущее					

Продолжения табл. 6.3

№ бригады	№ загла	№ загла	Вид вяжущего	Вид агрессивной среды	Показатели относительной стойкости раствора			
					Потеря массы, %	$\Delta l$ , мм/м	$K_{R_{из}}$	$K_{R_{сж}}$
1	2	3	4	5	6	7	8	9
III	1	1	Портландцемент	Агрессивная среда с $SO_4^{2-} > 5000$ мг/л				
		2	Пуццолановый портландцемент					
	2	3	Сульфатостойкий портландцемент					
		4	ГЦП вяжущее					

### 5.2. Лабораторная работа № 22. Определение скорости коррозии бетона в жидких агрессивных средах

**Цель работы.** Определить скорость коррозии бетона при воздействии агрессивных жидких сред I и II видов и оценить эффективность мероприятий по повышению долговечности бетона при воздействии этих сред.

**Введение.** При коррозии I и II видов происходит постепенное разрушение бетона с поверхности в глубину материала. Для оценки долговечности железобетонных конструкций, эксплуатирующихся в этих условиях, необходимо уметь определить скорость коррозии бетона. Интенсивность разрушения бетона зависит от механизма переноса агрессивных сред и их взаимодействия с компонентами бетона в первую очередь с цементным камнем.

В процессе коррозии бетона возникают различные механизмы переноса агрессивных веществ к поверхности коррозии. В ненапорных подземных и подводных

Таблица 5.3. Относительная стойкость раствора на различных вяжущих после испытаний в агрессивных средах

№ образцы	№ зоны	№ замеса	Вид вяжущего	Вид агрессивной среды	Показатели относительной стойкости раствора			
					Потери мас.-см., %	$\Delta L$ , мм/м	$K_{R_{из}}$	$K_{R_{сж}}$
1	2	3	4	5	6	7	8	9
I	1	1	Портландцемент	Агрессивная среда с $pH < 4$				
		2	Пуццолановый портландцемент					
	2	3	Сульфатостойкий портландцемент					
		4	ГЦП вяжущее					
II	1	1	Портландцемент	Агрессивная среда с $Mg^{2+} > 3000$ мг/л				
		2	Пуццолановый портландцемент					
	2	3	Сульфатостойкий портландцемент					
		4	ГЦП вяжущее					

Продолжение табл. 5.3

№ бригады	№ загла	№ замеса	Вид вяжущего	Вид агрессивной среды	Показатели относительной стойкости раствора			
					Потери массы, %	$\Delta l$ , мм/м	$K_{R_{из}}$	$K_{R_{сж}}$
1	2	3	4	5	6	7	8	9
III	1	1	Портландцемент	Агрессивная среда с $SO_4^{2-} > 5000$ мг/л				
		2	Пуццоловый портландцемент					
	2	3	Сульфатостойкий портландцемент					
		4	ГЦП вяжущее					

### 5.2. Лабораторная работа № 22. Определение скорости коррозии бетона в жидких агрессивных средах

**Цель работы.** Определить скорость коррозии бетона при воздействии агрессивных жидких сред I и II видов и оценить эффективность мероприятий по повышению долговечности бетона при воздействии этих сред.

**Введение.** При коррозии I и II видов происходит постепенное разрушение бетона с поверхности в глубину материала. Для оценки долговечности железобетонных конструкций, эксплуатирующихся в этих условиях, необходимо уметь определить скорость коррозии бетона. Интенсивность разрушения бетона зависит от механизма переноса агрессивных сред и их взаимодействия с компонентами бетона в первую очередь с цементным камнем.

В процессе коррозии бетона возникают различные механизмы переноса агрессивных веществ к поверхности коррозии. В ненапорных подземных и подводных

конструкциях, а также в водонасыщенных наземных конструкциях преобладает диффузионный перенос агрессивных веществ. При одностороннем напоре (влажностном перепаде или капиллярном подсосе) происходит фильтрационный вид переноса агрессивных веществ.

Скорость коррозии быстро развивается в первоначальный момент и постепенно затухает во времени. Это связано с образованием на реакционной поверхности продуктов коррозии, которые тормозят доступ к ней агрессивных веществ. В первое время скорость коррозии определяется скоростью взаимодействия агрессивной среды с составляющими бетона или скоростью растворения. По мере накопления продуктов коррозии на скорость коррозии начинает влиять также диффузия агрессивных сред к реакционной поверхности. В этот период, условно названный диффузионно-кинетическим, скорость коррозии определяется как скоростью химического взаимодействия, так и диффузией реагирующих веществ [10, 12].

С увеличением глубины поражения бетона и величины слоя продуктов коррозии решающее значение приобретает диффузия агрессивных веществ к поверхности коррозии. Этот период называется периодом внутренней диффузии. Для него характерна прямолинейная зависимость глубины разрушения от  $\sqrt{t}$  ( $t$  — время воздействия агрессивных сред на бетон). Длительность процесса коррозии бетона в диффузионно-кинетическом периоде колеблется от 6 до 60 сут в зависимости от состава бетона, вида агрессивной среды, структуры и толщины слоя продуктов коррозии.

При воздействии на бетон агрессивной среды происходит послойное его разрушение с образованием трех зон: 1) коррозии; 2) вторичных химических реакций и 3) полностью разрушенного цементного камня. С течением времени происходит передвижение зон в глубину бетона, но даже при значительной степени разрушения сохраняется четкая граница между неразрушенным бетоном и зонами коррозии.

Для определения скорости коррозии бетона при воздействии жидких агрессивных сред I и II видов в лабораторной работе можно использовать метод разработанный НИИЖБом [12]\*.

---

\* Рекомендуется для факультативного проведения в научно-исследовательском студенческом обществе.

**Содержание лабораторной работы.** Она состоит из двух заданий, каждое из которых выполняется одной бригадой. Каждая бригада определяет скорость коррозии бетона при диффузионном переносе агрессивных жидких сред, указанных в задании. Полученные результаты используются для расчета глубины разрушения и прогнозирования скорости коррозии на длительные сроки, а также для оценки эффективности принятых мероприятий для повышения долговечности при воздействии указанных агрессивных сред.

**Задание 1.** Определить скорость коррозии бетона в агрессивной жидкой среде I вида, рассчитать глубину разрушения и прогнозирования ее на длительные сроки, а также оценить эффективность принятых для защиты мероприятий. Исследования провести на образцах-цилиндрах из бетона (или раствора) диаметром и высотой 5 см на специальной установке для определения коррозии (рис. 5.1). Состав бетона подобрать в соответствии с реальными составами бетона, применяемыми для изготовления конструкций. Материалы: заводской портландцемент с содержанием  $\text{CaO}$  62%; песок кварцевый средней крупности; крупный заполнитель — известняковый щебень,  $D_{\text{наиб}} = 10$  мм. После изготовления образцы пропаривают по указанному преподавателем режиму.

Каждая бригада при изготовлении образцов выполняет по согласованию с преподавателем мероприятие по повышению долговечности бетона при воздействии указанной агрессивной среды (например, выбор портландцемента с необходимым минералогическим составом; введение эффективной добавки; увеличение плотности бетона, защита покрытиями и т. п.) согласно СНиП 2.03.11—85. Для обеспечения в процессе испытания постоянства реакционной поверхности боковая цилиндрическая поверхность образцов должна быть защищена стойким лаковым покрытием.

**Задание 2.** Аналогично заданию 1, но исследования образцов провести в агрессивной жидкой среде II вида.

**Указания по проведению лабораторной работы.**

1. Каждая бригада производит расчет расхода материалов на  $1 \text{ м}^3$  бетонной (растворной) смеси, а затем пересчитывает расход материалов на замес. Каждая бригада изготавливает три образца (согласно заданию) и три образца с учетом принятого мероприятия по повышению долговечности.

2. После пропаривания на цилиндрическую поверхность образцов наносят покрытие [12]. Покрытие наносят на воздушно-сухую поверхность бетона (раствора).

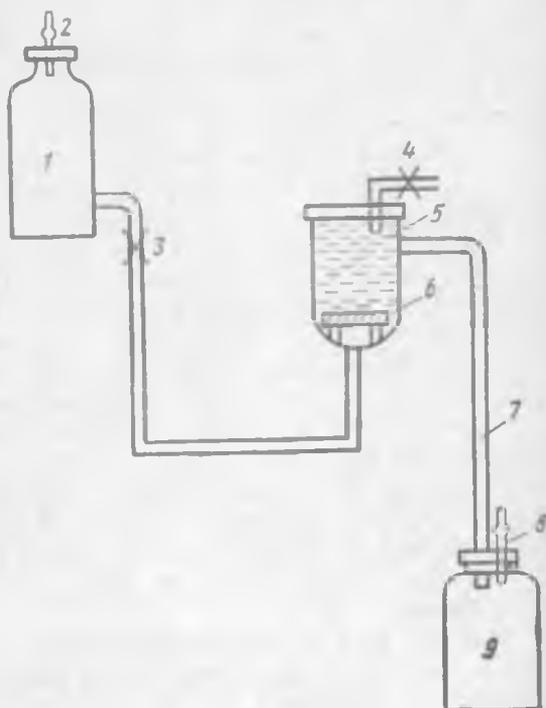


Рис. 5.1. Установка для исследования скорости коррозии в проходящем агрессивном растворе:

1 — расходная емкость с агрессивным раствором; 2, 8 — хлоркальциевые трубки; 3, 4 — краны; 5 — рабочая емкость с исследуемым образцом; 6 — образец; 7 — шланг; 9 — емкость для слива отработанного раствора

3. Незащищенные торцевые поверхности перед погружением образцов в агрессивную среду защищают наждачной бумагой, замеряют площадь рабочей поверхности, которая используется для расчета скорости коррозии.

4. Аппаратура и рабочие растворы для испытания должны быть подготовлены в лаборатории заранее [12].

5. Скорость коррозии  $v$  определяют в процессе испытания путем измерения концентрации растворов; при этом объем  $V$  отбираемого для титрования раствора

должен быть постоянным [12]. Скорость коррозии I и II видов выражают в мг/(см<sup>2</sup>·сут) по СаО\*. Определенные проводят на трех образцах-близнецах. Каждая бригада заносит результаты испытаний в табл. 5.4.

Т а б л и ц а 5.4. Результаты испытаний

Наименование определений	Начало испытания	Дата испытания			
Период между испытаниями $\tau_1$ , сут					
Время от начала испытаний $\tau_2$ , сут					
Объем раствора, участвовавшего во взаимодействии с цементным камнем или бетоном $V$ , мл					
Поверхность взаимодействия образца с раствором $S$ , см <sup>2</sup>					
Объем стандартного титрованного раствора, пошедшего на титрование исходного раствора до испытания $V_1$ , мл					
Объем стандартного титрованного раствора, пошедшего на титрование раствора после взаимодействия с цементным камнем или бетоном $V_2$ , мл					
Объем раствора, отобранного на титрование $V_3$ , мл					
$P_{CaO}$ за период $\tau_1$ , мг/см <sup>2</sup>					
$\Sigma P_{CaO}$ от начала испытания за период $\tau_2$ , мг/см <sup>2</sup>					
Скорость $v$ за период $\tau_1$ , мг СаО (см <sup>2</sup> ·сут)					

При объемном методе анализа катионов или анионов критерий скорости коррозии

$$P_{CaO} = \frac{(V_1 - V_2) \cdot N \cdot 28,04V}{SV_3}, \quad (5.3)$$

где  $V_1$  и  $V_2$  — объемы стандартного титрованного рас-

\* Возможно определение скорости коррозии III вида. В этом случае скорость коррозии выражают в мг/(см<sup>2</sup>·сут) по SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>. Кроме того, необходимы дополнительные исследования прочности и деформативности бетона.

твор, пошедшего на титрование соответственно исходного раствора-среды и раствора-среды после взаимодействия с бетоном, мл;  $V_2$  — объем раствора-среды, отобранного на титрование;  $N$  — нормальность титрованного раствора; 28,04 — мг СаО связывается 1 мл 1 н раствора<sup>\*</sup>;  $V$  — объем раствора участвовавшего во взаимодействии с бетоном, мл;  $S$  — поверхность взаимодействия образца с раствором, см<sup>2</sup>.

Скорость коррозии

$$v = P_{CaO}/\tau_1 \text{ или } v = P_{SO_4^{2-}}/\tau_1, \quad (5.4)$$

где  $\tau_1$  — время проведения испытания.

$\Sigma P_{CaO}$  — для расчета глубины разрушения бетона получается суммированием  $P_{CaO}$  за каждый период испытания

$$\Sigma P_{CaO} = P_{I CaO} + P_{II CaO} + P_{III CaO} + \dots + P_{n CaO}.$$

При определении коррозии I вида рекомендуется для обеспечения максимальной скорости не допускать превышения концентрации СаО в воде-среде более чем на 30 мг/л.

Скорость коррозии можно определять и в стационарных условиях [12]. В этом случае в процессе исследования не разрешается поддерживать концентрацию раствора-среды путем добавления концентрированных растворов.

#### 6. Глубина разрушения бетона

$$\Gamma_p = \Sigma P_{CaO}/(Ц\beta), \quad (5.5)$$

где  $\Sigma P_{CaO}$  — сумма  $P_{CaO}$  за каждый период испытания, мг/см<sup>2</sup>;  $\Sigma$  — количество цемента в образце, г/см<sup>3</sup>;  $\beta$  — содержание СаО в цементе, %, определяется по результатам химического анализа.

Примеры расчета глубины разрушения приведены ниже.

7. При прогнозировании глубины разрушения, а следовательно, и долговечности конструкций, используют зависимость  $\Sigma P_{CaO} = f \sqrt{\tau}$ , выражаемую формулой

\* Если расчет  $P$  ведется по  $SO_4^{2-}$ , то применяют соответствующий эквивалент исследуемого агрессивного компонента. Тогда  $P_{SO_4^{2-}}$

$= (C_1 - C_2) V (1000S)$ , где  $C_1$  и  $C_2$  — концентрация по  $SO_4^{2-}$  раствора соответственно исходного и после взаимодействия с бетоном, мг/л.

$$\sum P_{CaO} = a^2 + K \sqrt{\tau}, \quad (5.6)$$

где  $a^2$  — постоянная, учитывающая влияние процессов, протекающих в диффузионно-кинетической области;  $K$  — экспериментальная величина, г/(см<sup>2</sup>√сут), определяемая как тангенс угла наклона прямой к оси абсцисс на графиках  $\sum P_{CaO} - \sqrt{\tau}$  (рис. 5.2).

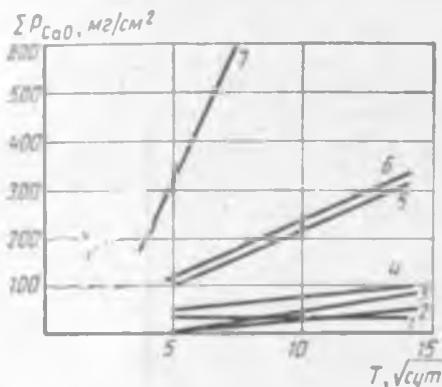


Рис. 5.2. Кинетическая зависимость процессов коррозии цементного камня в диффузионной области:

1 — 0,1 Н раствор  $H_2C_2O_4$ ; 2 — вода дистиллированная; 3 — агрессивная  $CO_2$  — 300 мг/л; 4 — 0,1 Н HF; 5 — 0,1 Н  $H_2SO_4$ ; 6 — 0,1 Н HCl (бетон); 7 — 0,1 Н HCl

Для учета погрешности в расчетах вместо  $a$  вводится множитель  $(1-\alpha)$ , где  $\alpha$  — поправочный коэффициент; учитывается только при  $\alpha > 0,1$ ;

$$\alpha = \sum P_{1CaO} / \sum P_{2CaO}, \quad (5.7)$$

где  $\sum P_{1CaO}$  — количество цементного камня в пересчете на CaO, вошедшее во взаимодействие с агрессивной средой в диффузионно-кинетической области (до установления прямолинейной зависимости)  $P_{1CaO} = f \sqrt{\tau}$ ;  $\sum P_{2CaO}$  — количество цементного камня в пересчете на CaO, вошедшее во взаимодействие с агрессивной средой с начала эксперимента к рассчитываемому сроку глубины разрушения.

Прогнозирование глубины разрушения бетона производится по формулам:

при  $\alpha > 0,1$  
$$\Gamma_p = (1-\alpha) K \sqrt{\tau} / (Ц\beta); \quad (5.8)$$

$$\text{при } \alpha < 0,1 \quad \Gamma_p = K \sqrt{\tau} / (Ц\beta), \quad (5.9)$$

где  $\tau$  — время, для которого прогнозируется глубина разрушения, сут.

8. На основании полученных результатов исследования скорости коррозии необходимо оценить агрессивность и степень агрессивности воды-среды по отношению к бетону конструкций в различных условиях эксплуатации. При этом агрессивность и степень агрессивности воды-среды можно определить по табл. 5.5.

Таблица 5.5. Зависимость степени агрессивности воды-среды от глубины разрушения бетона

Степень агрессивности воды-среды	Допустимая глубина разрушения бетона за 50 лет эксплуатации в конструкциях, см	
	железобетонных	бетонных
Среда:		
неагрессивная	1	2
слабоагрессивная	1...2	2...4
среднеагрессивная	2...4	4...6
сильноагрессивная	Более 4	Более 6

9. Оценивается целесообразность примененных защитных мероприятий и их эффективность путем сопоставления величин скорости коррозии и глубины разрушения защищенного и незащищенного бетона.

В отчете, составленном индивидуально каждым студентом, должны быть приведены результаты исследований и расчетов всех бригад, результаты расчетов заносят в сводную таблицу. На основании этих данных должны быть сделаны общие выводы по агрессивности и степени агрессивности воды-среды (агрессивных сред I и II видов), а также оценена целесообразность применения защитных мероприятий и их эффективность.

Примеры расчета глубины разрушения бетонных образцов приведены ниже.

**Пример 1.** Рассчитать глубину разрушения бетонного образца к концу испытания.

Образцы испытывали в соляной кислоте 0,1 N концентрации в течение 150 сут. За это время прореагировало цементного камня в пересчете на  $\Sigma P_{CaO}$  — 0,290 г/см<sup>2</sup>. Образцы изготовлены из бетона с расходом цемента 370 кг/м<sup>3</sup> и с В/Ц=0,62. Цемент с содержанием CaO=61%.

Глубину разрушения рассчитываем по формуле

$$\Gamma_p = \sum P_{CaO} / (Ц\beta) = 0,290 / (0,37 \cdot 0,61) = 1,27 \text{ см.}$$

Замеренная глубина разрушения составила 1,2 см.

**Пример 2.** Рассчитать глубину разрушения бетонного образца через 20 лет при воздействии на него соляной кислоты с 0,1 N концентрации.

Образцы изготовлены из бетона с расходом цемента 415 кг/м<sup>3</sup> и В/Ц=0,60. Цемент с содержанием СаО=62%.

По графику (рис. 5.2) определяем коэффициент К и рассчитываем величину  $\alpha$  по формуле

$$\alpha = \sum P_{1CaO} / \sum P_{2CaO} = 110 / 1815 = 0,07.$$

Так как  $\alpha < 0,1$ , то

$$\Gamma_p = K \sqrt{\tau} / (Ц\beta) = 1,87 \cdot 10^{-2} \cdot \sqrt{7300} / (0,415 \cdot 0,62) = 6,1 \text{ см.}$$

### *5.3. Лабораторная работа № 23. Исследование поведения стальной арматуры в бетонах*

**Цель работы.** Исследовать поведение стальной арматуры в бетонах и влияние на это поведение некоторых факторов.

**Введение.** 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 ионов — 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 рН среды в бетонах автоклавного твердения. Значительное влияние на коррозию стальной арматуры оказывает воздушно-влажная среда [10]. Чтобы предотвратить коррозию арматуры, необходимо обеспечить плотный защитный слой бетона при его щелочности не ниже рН 11,8. Сохранность арматуры в бетонах, имеющих пониженное рН 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.

**Содержание лабораторной работы.** Она состоит из четырех заданий, каждое из которых выполняется одной бригадой. Каждая бригада исследует поведение арматуры в образцах, заранее изготовленных и прошедших ускоренные испытания, путем определения потери массы металла на 1 м<sup>2</sup> площади и замера глубины коррозионных язв и питтингов. При этом изучается влияние на поведение арматуры в бетонах вида вяжущего, плотности бетона и толщины защитного слоя у арматуры. Продолжительность работы 4 ч.

**Задание 1.** Исследовать поведение арматуры в растворе, изготовленном на портландцементе. Исследование провести на образцах размером 40×40×160 мм, изготовленных из раствора состава 1:3 по массе (вяжущее: песок). Водоцементное отношение 0,4 и 0,7. Материалы: заводской портландцемент М400; песок кварцевый средней крупности. В образцы во время изготовления помещают по центру заранее подготовленные и взвешенные по методике [8] арматурные стержни диаметром 5 мм. После пропаривания образцы испытывают в режиме периодического увлажнения (1 сут в воде) и высушивания (3 сут при температуре 25±5°C).

**Задание 2.** То же, что и в задании 1, но раствор изготовить на шлакопортландцементе.

**Задание 3.** То же, что и в задании 1, но раствор изготовить на заводском гипсовом вяжущем. При изго-

товлении образцов в воду затворения ввести замедлитель схватывания.

Задание 4. То же, что и в задании 1, но образцы изготовить с водоцементным отношением 0,7. Толщина защитного слоя у арматуры 10, 15, 20 мм.

Указания по проведению лабораторной работы. 1. Перед началом работы студенты знакомятся с методикой подготовки арматурных стержней, изготовлением образцов и проведением ускоренных испытаний, а также с методиками исследования поведения арматуры в бетоне по [8, 10].

2. Для исследований каждой бригаде предоставляются образцы-балочки размером  $40 \times 40 \times 160$  мм (по 12 образцов I-й...III-й бригадам и 19 образцов — IV-й бригаде), прошедшие 50 циклов испытаний. Характеристики исследуемых образцов заносятся в табл. 5.6.

Таблица 5.6. Характеристики исследуемых образцов

№ бригады	№ звена	Исследуемые факторы			Фактическая средняя плотность бетона, кг/м <sup>3</sup>
		вид вяжущего	водоцементное отношение	толщина защитного слоя, мм	
I	1	Портланд-цемент	0,4		
	2		0,7		
II	1	Шлако-портланд-цемент	0,4		
	2		0,7		
III	1	Гипсовое	0,4		
	2		0,7		
IV	1	Портланд-цемент	0,7	10	
	2		>	15	
	3		>	20	

3. 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 над безводным хлоридом кальция или над концентрированной серной кислотой взвешивают на анали-

тических весах. Затем рассчитывают потерю массы на поверхности ( $\text{г}/\text{м}^2$ )

$$K_m = (P_0 - P)/S, \quad (5.10)$$

где  $P_0$  и  $P$  — масса металлического образца соответственно до помещения его в бетон и после извлечения его из бетона, г;  $S$  — площадь поверхности образца,  $\text{м}^2$ . Все данные весовых испытаний заносят в табл. 5.7.

Таблица 5.7. Результаты весовых испытаний стальной арматуры

№ бригады	№ звена	Водоцементное отношение (для толщина защитного слоя, мм)	№ образца	$P_0$	$P$ через 50 циклов	$K_m$ через 50 циклов
I	1	0,4	1	+	+	+
			2	+	+	+
			3	+	+	+

и т. д.

Примечание. Вид определения указан знаком «+».

4. По данным табл. 5.7 строят кинетическую кривую «коррозия — время» (рис. 5.3).

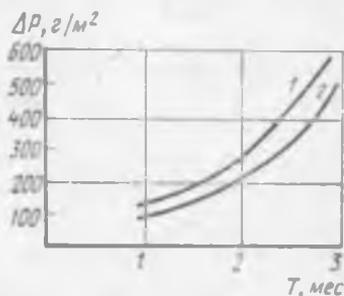


Рис. 5.3. Коррозия арматуры в бетоне:

1 — при В/Ц отношении 0,7; 2 — при В/Ц отношении 0,4

5. Далее с помощью индикатора часового типа с иглой по всей поверхности арматуры необходимо замерить глубину коррозионных язв и питтингов. По этим данным строят кривую распределения коррозионных язв по глубине (рис. 5.4) и рассчитывают среднюю статистическую глубину коррозии —  $\bar{X}_{ср}$  и дисперсию

значений глубины коррозии —  $S(X)$  относительно средней статистической глубины коррозионных поражений по формулам:

$$\bar{X}_{\text{ср}} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^s \bar{X}_j m_j; \quad (5.11)$$

$$S^2(X) = \frac{1}{n-1} \sum_{j=1}^s (\bar{X}_j - \bar{X}_{\text{ср}})^2 m_j, \quad (5.12)$$

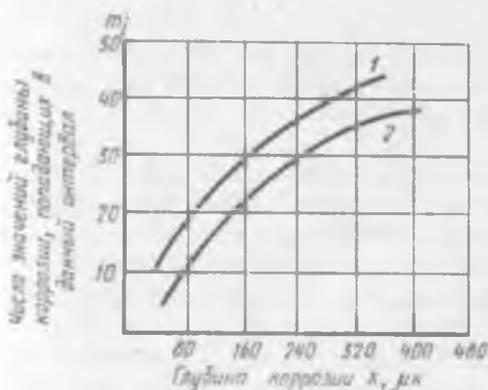


Рис. 5.4. Кривые распределения коррозионных язв по глубине:

1 — при В/Ц отношении 0,7; 2 — при В/Ц отношении 0,4

где  $n$  — общее число измерений по всей площади металла;  $\bar{X}_j$  — глубина коррозии, соответствующая середине интервала  $j$ , мк;  $m_j$  — число значений глубины коррозии, попадающих в данный интервал.

Полученные результаты расчетов заносят в табл. 5.8.

В отчете по работе каждая бригада на основании результатов исследований и анализа их делает частные выводы о поведении стальной арматуры от исследуемого фактора, а на основании анализа результатов всех бригад — выводы о влиянии вида вяжущего, плотности бетона и толщины защитного слоя на поведение стальной арматуры в нем.

Т а б л и ц а 5.8. Расчетные данные по глубине коррозии

№ бригады	№ заезда	Водоцементное отношение	№ образца	Показатели коррозии		
				$X_{ср}$ , мк	$X_{max}$ , мк	$\delta(X)$
I	1	0,4	4 5 6			
	2	0,7	10 11 12			

и т. д.

**5.4. Лабораторная работа № 24. Исследование поведения стальной арматуры в бетонах под воздействием агрессивных сред \***

**Цель работы.** Исследовать поведение стальной арматуры в бетонах под воздействием агрессивных сред.

**Введение.** Долговечность железобетонных конструкций, эксплуатируемых в промышленных и сельскохозяйственных зданиях и сооружениях, во многом зависит от сохранности арматуры в них.

Известно, что хлористые и серноокислые соли щелочных металлов нарушают пассивное состояние стали. Действие ионов-активаторов объясняется их способностью, адсорбируясь на поверхности стали, вытеснять кислород, участвующий в образовании защитных слоев или пленок [10]. 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, поскольку, даже несмотря на высокое значение pH 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 корро-

\* Методические указания к этой работе составлены при участии канд. техн. наук Н. К. Розенталя.

зии 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 алюмнатность цемента и больше содержание в нем гипса, так как последний связывается с алюминатами в первую очередь.

Железобетонные конструкции необходимо 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. В настоящее время разработаны методические рекомендации [8], в которых изложены методы оценки защитного действия добавок-ингибиторов в бетоне на портландцементе и других вяжущих (гипсовых, гипсоцементнопуццолановых и др.), а также в бетонах, изготовленных с применением добавок-ускорителей твердения, добавок золы и шлака. Методы позволяют определить защитное действие ингибиторов также в бетоне, находящемся в контакте с агрессивной средой, в том числе при наличии трещин в бетоне.

Ускоренному определению защитного действия ингибиторов в бетоне, изготовленном с добавкой-ускорителем или находящемся в контакте с агрессивной средой и посвящена лабораторная работа.

Содержание лабораторной работы. Она выполняется двумя бригадами. Бригада I определяет защитное действие ингибитора в бетоне, изготовленном с применением добавки-ускорителя твердения ( $\text{CaCl}_2$ ), агрессивной по отношению к стальной арматуре. Бригада II — то же, но в бетоне, находящемся в контакте с агрессивной средой (3%- и 5%-ный раствор  $\text{NaCl}$ ). Используют метод ускоренного определения эффективности ингибиторов коррозии в агрессивных растворах [8]. Исследования провести на установке, схема которой показана на рис. 5.5. Продолжительность работы 4 ч.

Задание 1 (выполняет бригада I). Звено I определяет ускоренным электрохимическим методом крити-

ческую дозировку  $\text{CaCl}_2$  в заранее приготовленном бетоне, содержащем ингибитор коррозии  $\text{NaNO}_2$ . Звено 2 выполняет то же, но путем визуального осмотра и определения коррозионных поражений стальной арматуры (глубины язв и питтингов), находящейся в заранее изготовленных бетонных образцах. При изготовлении образцов вводится различное количество добавки, агрессивно действующей по отношению к стальной арматуре и постоянное количество добавки-ингибитора коррозии стали.

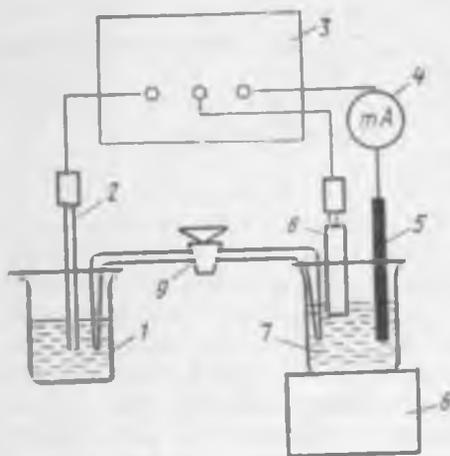


Рис. 5.5. Схема установки для снятия хроноамперметрических кривых:

1 — сосуд с насыщенным раствором  $\text{KCl}$ ; 2 — хлорсеребряный электрод сравнения; 3 — потенциостат П-6827; 4 — миллиамперметр; 5 — вспомогательный платиновый электрод; 6 — магнитный смеситель; 7 — сосуд с исследуемым раствором электролита; 8 — рабочий электрод; 9 — электролитический ключ

Характеристики и количество исследуемых образцов приведены в табл. 5.9. Материалы: портландцемент с  $\text{C}_3\text{A}=8..10\%$ ; известняковый щебень с  $D_{\text{max}}=10$  мм; песок кварцевый средней крупности. В качестве добавки-ускорителя твердения использо-

вать  $\text{CaCl}_2$ , а в качестве ингибирующей добавки —  $\text{NaNO}_2$ .

Задание 2 (выполняет бригада II). Звено 1 определяет защитное действие ингибитора коррозии  $\text{NaNO}_2$  ускоренным электрохимическим методом в заранее приготовленных бетонных образцах, находящихся в контакте с агрессивной средой (3%- и 5%-ные растворы  $\text{NaCl}$ ). Звено 2 выполняет то же, но путем визуального осмотра и определения коррозионных поражений стальной арматуры (глубины язв и питтингов), находящейся в заранее изготовленных образцах. Образцы до исследования находились в контакте с агрессивной средой (3%- и 5%-ные растворы  $\text{NaCl}$ ). Характеристики и количество исследуемых образцов приведены в табл. 5.9. Материалы те же, что и в задании 1.

Таблица 5.9. Характеристики и количество исследуемых бетонных образцов

№ бригады	№ звена	Количество образцов	Фактическая средняя масса бетонной смеси, кг/м <sup>3</sup>	Расход материалов на замес					
				кг				% от массы цемента	
				портланд-цемента	песка	щебня	воды	CaCl <sub>2</sub>	NaNO <sub>2</sub>

Бригада I

I	1	3						—	1
	2	3						0,5	1
		3						1,0	1
		3						2,0	1
		3						3,0	1

Бригада II

II	1	3						—	1
		3							1
	2	3						—	1

Указания по проведению лабораторной работы. 1. Студенты должны изучить литературу [16] по исследуемому вопросу и методические рекомендации [8].

2. Каждой бригаде выдается модельный электролит (вытяжка из бетона\*) и образцы. Для этого заранее изготавливаются бетонные образцы размером 70,7×70,7×70,7 мм. В эти образцы уложены стальные пластины размером 25×50×3 мм из стали А-II. При изготовлении армированных образцов для второго звена бригады I в воду затворения вводилось 0,5; 1,0; 2,0; 3,0 и 3,0% CaCl<sub>2</sub> и 1% ингибитора коррозии NaNO<sub>2</sub>. После пропаривания образцы для первой бригады подвергались испытанию в режиме периодического увлажнения и высушивания (1 сут в воде и 3 сут на воздухе) в течение 1,5...2 мес. При изготовлении армированных образцов для бригады II в воду затворения вводился ин-

\* Или модельный электролит фиксированного состава.

гибитор коррозии в количестве 1%. Эти образцы после пропаривания подвергались испытанию в режиме периодического насыщения и высушивания (одна часть образцов 1 сут в 3%-ном, а другая — в 5%-ном растворе хлористого натрия и 3 сут на воздухе) в течение 1,5..2 мес.

Вытяжка из бетона (или модельный электролит фиксированного состава) в количестве 100 мл готовится не менее чем за 1 сут до исследований и хранится в плотно закрытом сосуде.

3. Проводятся исследования согласно заданию ускоренным электрохимическим методом. Для этого звено I бригады I заполняет сосуд 7 (см. рис. 5.5) выданным электролитом. В него опускают заранее подготовленный по методике, изложенной в рекомендациях [8], электрод на глубину 1 см. При этом носик электрохимического ключа должен находиться на расстоянии 2..5 мм от рабочей поверхности электрода. Через 10 мин (минимальное время, в течение которого наблюдается относительная стабилизация потенциала) после погружения определяют потенциал рабочего электрода и накладывают потенциал +300 мВ относительно хлорсеребряного электрода сравнения (см. рис. 5.5). По истечении 25 мин добавляют раствор  $\text{CaCl}_2$  отдельными порциями таким образом, чтобы дозировка хлористого кальция в растворе электролита увеличивалась на 0,05% через каждые 3 мин. Через каждую минуту снимается показание миллиамперметра. При достижении плотности тока 100..2000 мкА/см<sup>2</sup>, что соответствует активному растворению металла и образованию ржавчины, опыт прекращается. Максимально допустимой следует считать такую дозировку хлоридов, при которой появляются первые питтинги и величина тока растет.

Ниже приведен пример определения критической дозировки хлористого кальция в насыщенном растворе  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  при 1%-ной концентрации нитрита натрия.

По результатам испытаний строят кривую «время — ток» (хроноамперметрические кривые) при постепенно возрастающей дозировке  $\text{CaCl}_2$  (рис. 5.6).

Звено I бригады II заполняет сосуд (см. рис. 5.5) сначала вытяжкой из бетона, контактирующего с 3%-ным раствором  $\text{NaCl}$ , а затем с 5%-ным раствором  $\text{NaCl}$  и с содержанием 1%  $\text{NaNO}_2$ . Стальной электрод погружают в исследуемый раствор, с помощью потенциостата накладывают потенциал +300 мВ по хлорсе-

ребряному электроду и измеряют плотность тока, протекающего через поверхность электрода. Если плотность тока при указанном значении потенциала больше  $25 \text{ мкА/см}^2$ , то сталь находится в активном состоянии (возможна интенсивная коррозия).

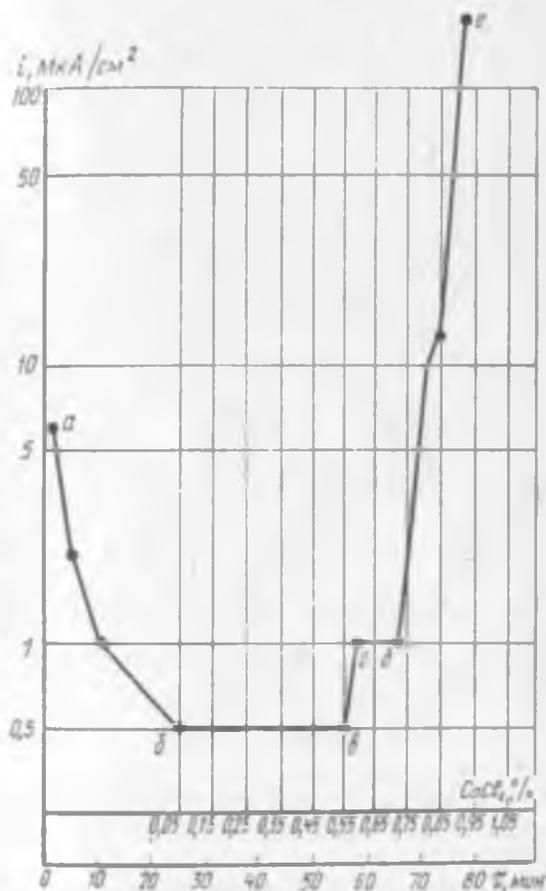


Рис. 5.6. Хроноамперометрическая кривая поведения стали в насыщенном растворе  $\text{Ca}(\text{OH})_2 + 0,1\% \text{ NaNO}_2$  при наложенном потенциале 300 мВ

4. Вторые звенья каждой бригады разрушают полученные образцы, арматуру очищают от остатков бетона и продуктов коррозии по методике, изложенной в лабораторной работе № 23 или в рекомендациях [8, п. 3.4, 3.6 и прилож. 5]. Затем визуально устанавливают наличие коррозии. Далее измеряют глубину коррозионных язв и питтингов по методике, изложенной в

лабораторной работе № 23 или в рекомендациях [8, п. 3.7, 3.8]. На основании этих замеров делают соответствующие расчеты [8, прилож. 5].

5. Каждое звено на основании результатов исследований делает частные выводы. Звенья обмениваются результатами исследований и делают общие выводы по поведению арматуры в бетоне, изготовленном с применением добавки-ускорителя твердения, агрессивной по отношению к стальной арматуре (бригада I) или в бетоне, контактирующем с агрессивной средой (бригада II).

6. В отчете, составленном индивидуально каждым студентом, приводятся методики по изготовлению бетонных образцов, подготовке стальных пластин, а также по изготовлению вытяжек (или модельных электродов фиксированного состава) из бетона; методики проведения исследований с зарисовкой установки, на которой проводились исследования; расчетно-графический материал; частные и общие выводы по результатам работы одной и двух бригад.

**Пример.** Определение критической дозировки  $\text{CaCl}_2$  в насыщенном растворе  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  при 1%-ной дозировке  $\text{NaNO}_2$ .

1. Приготавливается раствор рабочего электролита [8, п. 2.15].

2. Подготавливается поверхность рабочего электрода [8, п. 2.14].

3. Проводятся исследования на установке (см. рис. 5.5) по методике ускоренного определения эффективности ингибиторов коррозии стали в агрессивных растворах [8].

4. По результатам испытаний строят кривую «время — ток» при постепенно возрастающем количестве  $\text{CaCl}_2$  (см. рис. 5.6).

5. Анализ полученной кривой показывает, что после наложения потенциала +300 мВ (точка *O* на оси), плотность тока резко падает в течение 1 мин (точка *a*) до значения — 6 мкА/см<sup>2</sup>, затем более плавно опускается до своего минимального (при чувствительности прибора 0,1 мкА) значения 0,5 мкА/см<sup>2</sup> (точка *b*). На участке *b—в*, несмотря на увеличение количества  $\text{CaCl}_2$  от 0,05 до 0,55%, наблюдается постоянное значение тока. По длине этого участка можно судить о пассивирующих свойствах данного ингибитора при действии хлорид-ионов. При повышении дозировки  $\text{CaCl}_2$  более 0,55% (участок *в—г*) произошло скачкообразное уве-

личение плотности тока —  $1 \text{ мкА/см}^2$ , что свидетельствует о нарушении пассивирующей пленки (образование питтингов). Это явление можно объяснить пробоем пассивирующего слоя на металле в результате адсорбции хлорид-иона, которая не может быть предотвращена при данном количестве ингибитора и потенциале электрода.

На участке  $г—д$  при дозировке  $\text{CaCl}_2$  от 0,6 до 0,7% наблюдается динамическое равновесие. Оно объясняется конкурирующей адсорбцией хлорид-ионов и кислорода. Увеличение количества хлоридов приводит к смещению динамического равновесия в сторону адсорбции хлорид-ионов. При дальнейшем увеличении количества  $\text{CaCl}_2$  от 0,7 до 0,9% (участок  $д—е$ ) наблюдается активное растворение поверхности стального электрода, характеризующееся увеличением плотности тока от 1 до  $150 \text{ мкА/см}^2$  и выше.

Полученные данные показывают, что при количестве  $\text{CaCl}_2$  до 0,55% в присутствии 1%  $\text{NaNO}_2$  сталь находится в пассивном состоянии. Первые питтинги появились при 0,6%-ной дозировке  $\text{CaCl}_2$  и до количества 0,7% интенсивность этого процесса не увеличилась. При большем содержании  $\text{CaCl}_2$  наблюдается сильное ускорение коррозии стали.

6. Далее исследования следует продолжить на образцах, как указано в лабораторной работе № 24.

На основании полученных результатов всех исследований делаются окончательные выводы.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Алексеев С. Н., Ратинов В. Б., Розенталь Н. К., Кашурников Н. М. Ингибиторы коррозии стали в железобетонных конструкциях. М., 1985.
2. Баженов Ю. М. Технология бетона. М., 1987.
3. Баженов Ю. М., Комар А. Г. Технология бетонных и железобетонных изделий. М., 1984.
4. Инструкция по изготовлению изделий и деталей сборных конструкций из силикатного бетона плотной структуры. Изд. ВНИИСТРОМ им. П. П. Будникова — М., 1979.
5. Ицкович С. М. Заполнители для бетона. Минск, 1983.
6. Лецинский М. Ю. Испытание бетона. М., 1980.
7. Лецинский М. Ю., Цылковский Г. А., Александров В. И. Справочник по контролю качества в промышленном и гражданском строительстве. Киев, 1983.
8. Методические рекомендации по исследованию ингибиторов коррозии арматуры в бетоне. М., 1980.
9. Методические рекомендации по определению фактического водоцементного отношения в свежеприготовленной бетонной смеси. Изд. НИИЖБ Госстроя СССР.— М., 1980.
10. Москвин В. М. и др. Коррозия бетона и железобетона, методы их защиты. М., 1980.
11. Рекомендации по применению методов математического планирования эксперимента в технологии бетона. М., 1982.
12. Руководство по определению скорости коррозии цементного камня, раствора и бетона в жидких агрессивных средах. М., 1975.
13. Руководство по применению химических добавок в бетоне. М., 1981.
14. Руководство по подбору составов тяжелого бетона. М., 1979.
15. Справочник по производству сборных железобетонных изделий. Под редакцией К. В. Михайлова и А. А. Фоломеева. М., 1982.
16. Чехов А. П. Защита строительных конструкций от коррозии. М., 1977.

Основные государственные стандарты по вопросам,  
связанным с проведением лабораторных работ  
по курсу  
«Технология бетонных и железобетонных изделий»  
(на 1 января 1987 г.)

ГОСТ. 8.002—86. Государственная система обеспечения единства измерений. Организация и порядок проведения проверки, ревизии и экспертизы средств измерений.

ГОСТ 2.116—84 \*. Единая система конструкторской документации. Основные положения.

ГОСТ 15.001—73 \*. Разработка и постановка продукции на производство. Основные положения.

ГОСТ 166—80 \*. Штангенциркуль. Типы. Основные параметры. Технические требования.

ГОСТ 215—73 \*. Термометры ртутные стеклянные лабораторные.

ГОСТ 310.1—76. (СТ СЭВ 3920—82). Цементы. Методы испытаний.

ГОСТ 427—75 \*. Линейки измерительные металлические.

ГОСТ 577—68 \*. (СТ СЭВ 3138—81). Индикаторы часового типа с ценой деления 0,01 мм.

ГОСТ 882—75 \*. Щупы. Основные параметры. Технические требования.

ГОСТ 2405—80 \*. Щупы. Основные параметры. Технические требования.

ГОСТ 2405—80 \*. (СТ СЭВ 1641—79, 584—83). Манометры, вакуумметры и мановакуумметры показывающие. Общие технические требования.

ГОСТ 2789—73 \*. Формы для изготовления образцов.

ГОСТ 3584—73 \*. Сетки проволочные тканые с квадратными ячейками контрольные, высокой точности.

ГОСТ 5578—76. Щебень из доменного шлака для бетона. Технические требования.

ГОСТ 5781—82 \*. Сталь горячекатаная для армирования железобетонных конструкций.

ГОСТ 6727—80 \*. Проволока из низкоуглеродистой стали холоднотянутая для армирования железобетонных конструкций. Технические условия.

ГОСТ 7025—78. Материалы стеновые и облицовочные. Методы определения водопоглощения и морозостойкости.

ГОСТ 7164—78 \*. Потенциометры и уравновешенные мосты автоматические

ГСП. Общие технические условия.

ГОСТ 7348—81 \*. Проволока стальная круглая углеродистая для предварительно напряженных железобетонных конструкций.

ГОСТ 8026—75 \*. Линейки поверочные

ГОСТ 8267—82. Щебень из природного камня для строительных работ. Технические условия.

- ГОСТ 8269—72. Щебень из естественного камня, гравий и щебень из гравия для строительных работ. Методы испытаний.
- ГОСТ 8462—85. Материалы стеновые и облицовочные. Методы определения предела прочности при сжатии и изгибе.
- ГОСТ 8735—75. Песок для строительных работ. Методы испытаний.
- ГОСТ 8829—85. Конструкции и изделия железобетонные сборные. Методы испытания и оценки прочности, жесткости и трещиностойкости.
- ГОСТ 8905—82 \*. Прессы гидравлические для испытания строительных материалов.
- ГОСТ 9757—83. Заполнители пористые неорганические для легких бетонов. Классификация и общие технические требования.
- ГОСТ 9759—83. Гравий и песок керамзитовые. Технические условия.
- ГОСТ 10060—76. Бетоны. Методы определения морозостойкости.
- ГОСТ 10178—85. Портландцемент и шлакопортландцемент. Технические условия.
- ГОСТ 10180—78 \*. Бетоны. Методы определения прочности на сжатие и растяжение.
- ГОСТ 10181—81. Смеси бетонные. Методы определения удобоукладываемости.
- ГОСТ 10260—82. Щебень из гравия для строительных работ. Технические условия.
- ГОСТ 10268—80. Бетон тяжелый. Технические требования к заполнителям.
- ГОСТ 10884—81. Сталь стержневая арматурная термомеханически и термически упрочненная периодического профиля. Технические условия.
- ГОСТ 10905—86. Плиты поверочные и разметочные. Технические требования.
- ГОСТ 10922—75. Арматурные изделия и закладные детали сварные для железобетонных конструкций. Технические требования и методы испытаний.
- ГОСТ 11050—78. Бетон легкий на пористых заполнителях. Методы определения прочности и объемной массы.
- ГОСТ 11991—83. Щебень и песок аглопоритовый. Технические условия.
- ГОСТ 12004—81 \*. Сталь арматурная. Методы испытания на растяжение.
- ГОСТ 12505—81. Формы стальные для изготовления железобетонных панелей наружных стен жилых и общественных зданий. Технические требования.
- ГОСТ 12730.0—78. Бетоны. Общие требования к методам определения плотности, влажности, водопоглощения, пористости и водонепроницаемости.
- ГОСТ 12730.2—78. Бетоны. Методы определения влажности.
- ГОСТ 12730.3—78. Бетоны. Методы определения водопоглощения.
- ГОСТ 12730.4—78. Бетоны. Методы определения показателей пористости.

- ГОСТ 12730.5—84. Бетоны. Методы определения водонепроницаемости.
- ГОСТ 12852.0—77. Бетон ячеистый. Общие требования к методам испытаний.
- ГОСТ 13015—75 \*\*. Изделия железобетонные и бетонные. Общие технические требования.
- ГОСТ 13087—81. Бетон тяжелый. Методы испытания на истираемость.
- ГОСТ 14019—80. Металлы и сплавы. Методы испытаний на изгиб
- ГОСТ 15825—80. Портландцемент цветной. Технические условия.
- ГОСТ 15895—77, (СТ СЭВ 547—84, 3404—81). Качество продукции. Статистические методы управления качеством, Термины.
- ГОСТ 16263—70. Государственная система обеспечения единства измерений. Метрология. термины и определения.
- ГОСТ 17623—78, Бетоны. Радноизотопный метод определения плотности.
- ГОСТ 17624—78. Бетоны, Ультразвуковой метод определения прочности,
- ГОСТ 18105—86. Бетоны, Правила контроля прочности. Основные положения.
- ГОСТ 18321—81, Качество продукции. Статистические методы управления. Правила отбора единиц продукции в выборку.
- ГОСТ 18885—73 \*. Формы стальные для изготовления железобетонных и бетонных изделий. Общие технические требования.
- ГОСТ 18957—73. Тензометры для измерения линейных деформаций строительных материалов и конструкций. Общие технические условия.
- ГОСТ 19345—83. Гравий шунгзитовый.
- ГОСТ 19491—74. Весы лабораторные.
- ГОСТ 21218—75 \*. Бетоны, Контроль и оценка прочности и однородности с применением неразрушающих методов.
- ГОСТ 22236—85. Цементы. Правила приемки.
- ГОСТ 22263—76. Щебень и песок из пористых горных пород. Технические условия.
- ГОСТ 22266—76 \*. Цементы сульфатостойкие. Технические условия.
- ГОСТ 22685—77, Формы для изготовления контрольных образцов бетона. Технические условия.
- ГОСТ 22690.0—77. Бетон тяжелый. Методы определения прочности без разрушения приборами механического действия.
- ГОСТ 22690.2—77, Бетон тяжелый. Метод определения прочности эталонным молотком Кашкарова.
- ГОСТ 22783—77, Бетоны, Метод ускоренного определения прочности на сжатие.
- ГОСТ 23283—78, Бетоны жаростойкие. Метод определения деформаций под нагрузкой при высоких температурах.
- ГОСТ 23685—77. Весы циферблатные.

- СНиП 2.03.01—84. Бетонные и железобетонные конструкции.
- СНиП 2.03.11—85. Защита строительных конструкций от коррозии.
- СНиП 2.10.02—84. Здания и сооружения для хранения и переработки сельскохозяйственной продукции.
- СНиП 2.10.03—84. Животноводческие, птицеводческие и звероводческие здания и сооружения.
- СНиП 3.09.01—85. Производство сборных железобетонных конструкций и изделий.
- СНиП 5.01.23—83. Типовые нормы расхода цемента для приготовления бетонов, сборных и монолитных бетонных, железобетонных изделий и конструкций.
- СНиП III-4—80. Техника безопасности в строительстве.
- СНиП III-15—76. Бетонные и железобетонные конструкции монолитные.
- СНиП III-16—80. Бетонные и железобетонные конструкции. Правила производства и приемки работ.
- СТ СЭВ 2441—80. Защита от коррозии в строительстве. Конструкции бетонные и железобетонные. Основные положения проектирования.

## ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие . . . . .	3
Введение . . . . .	5
<i>Глава 1. Общие указания по проведению лабораторных работ и методы исследований свойств бетонных смесей и бетона . . . . .</i>	<i>7</i>
1.1. Организация и проведение лабораторных работ . . . . .	7
1.2. Подготовка и хранение материалов, оборудование и аппаратура . . . . .	8
1.3. Общие методы исследования основных свойств бетонной смеси и бетона . . . . .	11
1.4. Мероприятия по технике безопасности при выполнении лабораторных работ . . . . .	37
<i>Глава 2. Методические указания к лабораторным работам по разделу курса «Бетонведение и технология бетона» . . . . .</i>	<i>38</i>
2.1. Лабораторная работа № 1. Качественная оценка заполнителей по технологическим характеристикам . . . . .	38
2.2. Лабораторная работа № 2. Исследование факторов, влияющих на свойства бетонной смеси и бетона, с применением математических методов планирования эксперимента . . . . .	42
2.3. Лабораторная работа № 3. Определение реологических характеристик бетонной смеси . . . . .	54
2.4. Лабораторная работа № 4. Выбор химических добавок применительно к условиям производства бетонных и железобетонных изделий с оценкой их эффективности . . . . .	60
2.5. Проектирование состава тяжелого бетона и исследование основных факторов, влияющих на его состав . . . . .	65
2.5.1. Лабораторная работа № 5. Проектирование состава тяжелого бетона расчетно-экспериментальным методом и исследование основных факторов, влияющих на свойства бетона . . . . .	66
2.5.2. Лабораторная работа № 6. Планирование эксперимента и выбор состава тяжелого бетона с применением математико-статистических методов . . . . .	73
2.5.3. Лабораторная работа № 7. Ускоренный способ оценки качества цемента в бетоне и назначение состава бетона . . . . .	92
2.6. Проектирование состава легких бетонов на пористых заполнителях и исследование основных факторов, влияющих на их состав . . . . .	100
	221

2.6.1. Лабораторная работа № 8. Проектирование состава легкого бетона на пористых заполнителях и исследование основных факторов, влияющих на его состав . . . . .	101
2.6.2. Лабораторная работа № 9. Проектирование состава высокопрочного легкого бетона на пористых заполнителях и исследование основных факторов, влияющих на его состав . . . . .	109
2.6.3. Лабораторная работа № 10. Проектирование состава поризованного легкого бетона на пористых заполнителях и исследование основных факторов, влияющих на его состав . . . . .	117
2.7. Лабораторная работа № 11. Подбор состава тяжелого бетона с использованием структурных характеристик . . . . .	123
2.8. Лабораторная работа № 12. Проектирование состава бетона автоклавного твердения и исследование основных факторов, влияющих на состав и экономичность бетона . . . . .	132
<b>Глава 3. Методические указания к лабораторным работам по разделу курса «Технологические процессы и способы изготовления бетонных и железобетонных изделий» . . . . .</b>	
3.1. Лабораторная работа № 13. Исследование эффективности способов перемешивания бетонной смеси . . . . .	139
3.2. Лабораторная работа № 14. Исследование режимов виброуплотнения бетонной смеси . . . . .	144
3.3. Лабораторная работа № 15. Исследование методов предварительного натяжения арматуры и контроля напряжения в арматуре . . . . .	147
3.4. Лабораторная работа № 16. Исследование факторов, влияющих на ускорение твердения бетона в нормальных условиях . . . . .	153
3.5. Лабораторная работа № 17. Исследование факторов, влияющих на эффективность тепловой обработки бетона . . . . .	158
<b>Глава 4. Методические указания к лабораторным работам по разделу курса «Повышение степени заводской готовности и улучшение качества железобетонных изделий. Контроль и управление качеством на заводах сборного железобетона» . . . . .</b>	
4.1. Лабораторная работа № 18. Изучение некоторых методов оценки прочности бетона в изделиях неразрушающими методами . . . . .	161
4.2. Лабораторная работа № 19. Статистический метод контроля прочности бетона с учетом его однородности . . . . .	170
4.3. Лабораторная работа № 20. Текущий контроль качества бетонной смеси и прогнозирование отпусковой и заданной прочности бетона . . . . .	181

<b>Глава 5. Методические указания к лабораторным работам по разделу курса «Повышение долговечности бетонных и железобетонных конструкций» . . . . .</b>	<b>187</b>
5.1. Лабораторная работа № 21. Определение относительной стойкости бетона на различных вяжущих под воздействием агрессивных сред . . . . .	189
5.2. Лабораторная работа № 22. Определение скорости коррозии бетона в жидких агрессивных средах . . . . .	195
5.3. Лабораторная работа № 23. Исследование поведения стальной арматуры в бетонах . . . . .	203
5.4. Лабораторная работа № 24. Исследование поведения стальной арматуры в бетонах под воздействием агрессивных сред . . . . .	208
<b>Литература . . . . .</b>	<b>216</b>
Основные государственные стандарты по вопросам, связанным с проведением лабораторных работ по курсу «Технология бетонных и железобетонных изделий» (на 1 января 1987 г.)	217

*Учебное издание*

**Ферронская Анна Викторовна  
Стамбулко Владимир Исаевич  
ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ  
ПО КУРСУ  
«ТЕХНОЛОГИЯ БЕТОННЫХ  
И ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ИЗДЕЛИЙ»**

Заведующий редакцией Б. А. Ягулов. Редактор Л. Б. Лохова  
Младший редактор О. С. Смотрина. Художник С. В. Аладьев  
Художественный редактор В. П. Бабилова. Технический ре-  
дактор Э. М. Чижевский. Корректор Г. А. Четкина

**ИБ № 6057**

Изд. № СТР—489. Сдано в набор 05.02.88. Подп. в печать 03.06.88.  
Формат 84×108<sup>1/32</sup>. Бум. тип. № 2. Гарнитура литературная. Печать  
высокая. Объем 11,76 усл. печ. л. 11,97 усл. кр.-отт. 11,41 уч.-изд. л.  
Тираж 10 000 экз. Зак. № 93. Цена 45 коп.

Издательство «Высшая школа», 101430, Москва, ГСП-4, Неглинная ул.,  
д. 29/14.

Московская типография № 8 Союзполиграфпрома при Государственном  
комитете СССР по делам издательства, полиграфии и книжной торговли.  
101000, Москва, Центр, Хохловский пер., 7.