Werner Reichel
Dietrich Conrad

BETON

Eine Einführung für das Selbststudium

Band 1
Eigenschaften
Projektierung
Prüfung

VEB Verlag
für Bauwesen
Berlin

В. Райхель
Д. Конрад

БЕТОН

В двух частях

Часть I
СВОЙСТВА. ПРОЕКТИРОВАНИЕ. ИСПЫТАНИЕ

Перевод с немецкого
д-ра техн. наук проф.
О. П. Мчедлова-Петросяна

Под редакцией
д-ра хим. наук проф.
В. Б. Ратинова

Москва
Стройиздат 1979

ББК 38.33
Р18
УДК 691.32

Рекомендовано к изданию Харьковским инженерно-строительным институтом

Райхель В., Конрад Д.

Р 18 Бетон: В 2-х ч. Ч. 1. Свойства. Проектирование. Испытание. Пер. с нем./Под ред. В. Б. Ратинова. — М.: Стройиздат, 1979. — 111 с., ил.

В книге, написанной на основе новейших теоретических разработок, популярно рассказывается о свойствах, проектировании и испытании бетона. Рассмотрены проблемы дозировки и смешивания исходных материалов, прочности затвердевшего бетона, методы испытания исходных материалов, бетонной смеси, затвердевшего бетона. Книга хорошо иллюстрирована.

Предназначена для широких кругов строителей.

Р $\frac{30209-588}{047(01)-79}$ 151—79. 3203000000

ББК 38.33
6С3

© VEB Verlag für Bauwesen, Berlin, 1976

© ПЕРЕВОД НА РУССКИЙ ЯЗЫК. СТРОЙИЗДАТ, 1979

Предисловие к русскому изданию

Книга В. Райхеля и Д. Конрада «Бетон» (Часть I. Свойства. Проектирование. Испытание) пользуется заслуженной популярностью в Германской Демократической Республике. Не поступаясь строгостью формулировок, авторы смогли живым, образным языком (используя при этом простые примеры, а также превосходно составленные таблицы и хорошо продуманные иллюстрации), кратко и четко изложить основные положения бетоноведения, рассмотреть во взаимосвязи различные вопросы проектирования состава бетона.

Для широкого круга советских специалистов, безусловно, представит интерес богатый опыт в области технологии бетона и железобетона в ГДР, который в некотором смысле отличается от отечественного. В подтверждение сказанного можно привести несколько примеров.

Анализируя взаимосвязь прочности бетона с концентрацией гелевой составляющей, В. Райхель и Д. Конрад весьма наглядно показывают влияние *В/Ц*, минерального состава и удельной поверхности цемента, вида цемента, температуры твердения на прочностные характеристики бетона с учетом изменения их во времени.

Представляют интерес принятая в ГДР система выбора вида цемента для различных областей его применения, классификация бетонной смеси в зависимости от консистенции и влияние на подвижность бетонной смеси количества цементного клея и зернового состава заполнителей.

Определенный практический интерес представляют принятая в ГДР методика улучшения зернового состава заполнителей, установленная взаимосвязь между консистенцией и водопотребностью с учетом линий просеивания и граничных размеров заполнителей.

Большой интерес представляют данные о связи между значением *В/Ц*, стандартной прочностью цемента (маркой) и прочностью бетона, а также методика проектирования состава бетона, когда в качестве одного из ограничений вводится *В/Ц*, а соотношение заполнителей фактически оценивается по их гранулометрическому составу (линиям просеивания). Как известно, в нашей стране такая методика проектирования состава бетона еще не нашла широкого распространения, а соотношение между песком и крупным заполнителем в основном определяется коэффициентом раздвижки зерен.

Следует отметить весьма удобную практику определения прочности бетона на производстве по контрольной карте, которая дает наглядное представление о характере распределения прочности и позволяет рассчитать нижнюю доверительную границу прочности, а не ограничиваться значением коэффициента вариации.

В русском издании книги сохранены классификация и марочная структура бетона и его составляющих, принятая в ГДР, которые в определенной мере также отличаются от отечественных стандартов на цемент, заполнители и бетон, что позволяет ознакомиться с методами испытаний и зарубежным опытом производства и применения тяжелого бетона.

Анализ отечественной и зарубежной практики приводит к выводу, что за последние годы в технологии бетона прочное место завоевали добавки различного назначения и особенно полуфункциональные, причем просле-

живается четкая тенденция к расширению масштабов их применения. К сожалению, вопросы использования добавок в бетоне изложены излишне-лаконично, в связи с чем мы приводим ряд комментариев. Кроме того, в примечаниях отсылаем читателя к принятым в СССР методам подбора состава бетона и его испытаниям. Это делается для того, чтобы упоминутые ранее различия между принятыми в ГДР и СССР методикой проектирования состава бетона, его классификацией, марочной прочностью и некоторые другие не затрудняли восприятие содержания книги.

Мы полагаем, что книга В. Райхеля и Д. Конрада «Бетон» заинтересует широкий круг советских читателей. Ее можно рекомендовать в качестве пособия для учащихся, обучающихся в системе производственно-технического образования, а также для повышения квалификации рабочих, занятых в строительстве и стройиндустрии, хотя, строго говоря, она рассчитана в основном на молодежь, которая еще только приобщается к увлекательной и нелегкой профессии строителя и решила сосредоточить свои способности и усилия главным образом на изучении технологии производства бетона и железобетона, а также областей их применения.

Д-р техн. наук, проф.
О. П. МЧЕДЛОВ-ПЕТРОСЯН

Д-р. хим. наук, проф.
В. Б. РАТИНОВ

К задачам книги

В настоящее время два строительных материала определяют современный облик строительной площадки: бетон и сталь. В техническом и экономическом отношении они настолько важны, что высокоразвитые страны измеряют и сравнивают свой промышленный потенциал по объему производства этих материалов. При этом для бетона за эталон берется вяжущее — цемент. В 1973 г. на одного человека в мире производилось приблизительно 160 кг цемента. В ГДР и СССР эта цифра составляет около 500 кг, что свидетельствует о высокоразвитом хозяйстве и предпосылке для интенсивного промышленного развития.

Почти каждый пятый работник строительства имеет дело с бетоном. В системе профессионального образования, будь то рабочий, мастер или инженер, изучают о бетоне все, что необходимо знать в процессе изготовления и применения бетона высокого качества. Практика, однако, заменяет привычными навыками многое из основного во время учебы. К сожалению, новая информация все еще находит дорогу преимущественно через слово «как», а слово «почему» остается часто неразъясненным. Если практик хочет углубить свои знания, то после ежедневной напряженной работы это осуществить нелегко и тем труднее, чем сложнее содержание книги.

Авторы и издательство, учитывая эти проблемы, сделали попытку изложить в книге эту часто обсуждавшуюся тему возможно доступнее, с новых позиций и именно так, чтобы каждый, кто имеет основные представления об использовании бетона в строительстве, мог извлечь важную информацию для своей деятельности. Перед нами стояла задача не только описать факты, но и возможно лучше осветить многие зависимости (взаимосвязи нельзя изучать только формально, их нужно понять!).

При написании рукописи нередко возникали трудности, когда мы пытались наглядно объяснить сложные процессы, еще полностью не изученные. Однако надеемся, что нашли при этом правильный тон, и тем не менее не исключено, что отдельному практику изложение материала покажется слишком научным, а научному работнику (для которого, по существу, книга не предназначена) — наоборот, поверхностным.

В первой части книги рассматриваются важнейшие свойства бетонной смеси и бетона в зависимости от их состава, а также проектирование состава бетона, во второй части будет рассмотрено взаимное влияние свойств материала и особенностей технологии изготовления и твердения.

Наиболее важные вопросы мы пытались осветить иногда очень подробно, а менее важные изложить более кратко. Так, например, разд. 3 (путь от цементного клея к цементному камню) в данной книге занимает сравнительно большой объем. Такой метод подачи материала нам кажется оправданным, так как важные свойства бетона обусловлены цементным клеем и цементным камнем. Чтобы существующие взаимосвязи представить достаточно наглядно, заполнители рассмотрены не там, где это обычно излагается в учебных пособиях, а в разделе о бетонных смесях.

Без испытания исходных материалов, бетонных смесей и бетона нельзя

изготовить бетон хорошего качества. Поэтому в разд. 6 приводится описание ряда методов испытаний и оценок, которые необходимо знать практику. Методики испытаний изложены по однотипной схеме. При этом, по возможности, использованы все положения новых стандартов.

В процессе подготовки настоящей публикации авторы получили многочисленные уточнения непосредственно со стройплощадок и с заводов от технологов по бетону, рабочих-бетонщиков и мастеров. Всем коллегам мы приносим сердечную благодарность.

Настоящее, третье издание первой части книги подготовлено на основе предложения Стройиздата опубликовать ее на русском языке в кратчайший срок.

Эту книгу следует рассматривать как дальнейшее развитие работы, вышедшей в свет в 1978 г. в народном предприятии «Издательство по строительству ГДР» и согласованной со второй частью книги, которая, предположительно, выйдет одновременно в ГДР и СССР.

За целеустремленную поддержку, реализацию этой задачи в кратчайший срок и за постоянное внимание к идее издания книги, к оформлению обеих частей особую благодарность выражаем редактору Э. Пойкерту.

Советскому издательству Стройиздат авторы признательны за интерес, проявленный к их публикации, и дружескую совместную работу при подготовке настоящего издания. Особо сердечно мы благодарим проф. О. П. Мчедлова-Петросяна не только за то, что он взял на себя перевод, но прежде всего за его ценные предложения и указания по содержанию книги.

Авторы с удовольствием примут предложения и замечания читателей по дальнейшему улучшению книги.

В. РАЙХЕЛЬ
Д. КОНРАД

I Бетон как строительный материал

Бетон — настолько разносторонний строительный материал, что строительство без него немыслимо. В сочетании со сталью его используют в качестве железобетона. Особенно широко и эффективно он применяется в предварительно напряженном железобетоне. Сегодня мы встречаемся с тяжелым бетоном * в смелых предварительно напряженных конструкциях, которые своей легкостью и элегантностью в значительной мере определяют облик современного строительства.

Бетон как строительный материал играет столь важную роль прежде всего благодаря:

- универсальной формуемости в изделии или в сооружениях;
- высокой прочности и долговечности;
- использованию сравнительно дешевых местных каменных материалов в качестве заполнителей (приблизительно 75% объема бетона);
- возможности механизации и автоматизации процесса изготовления.

Именно механизация и автоматизация обусловили тот факт, что за последние 20 лет в жилищном строительстве глиняный кирпич оказался в такой сильной мере вытесненным бетонными изделиями заводского изготовления.

Вернемся к определению материала.

Бетон, как строительный материал, состоит из компонентов: цемента, воды и заполнителей (зернистые смеси чаще всего представляют собой природный камень). Первоначально при их смешивании образуется формуемая масса — бетонная смесь определенной консистенции (от литой до жесткой), которая со временем упрочняется в искусственный камень вследствие гидравлического твердения вяжущего — цемента. Свойства бетонной смеси и бетона могут изменяться под влиянием химических добавок.

Термин «искусственный камень» подчеркивает ту мысль, что человек, создавая этот строительный материал, подражал природе. Действительно, в результате выветривания из первичных горных пород образуются зернистые породы, которые впоследствии или в процессе отложения в реках или в морях скреплялись связующим (как, например, известковая вода или кремнекислота) в «бетон». Возникающие таким образом «природные горные породы» геологи обозначают термином «упрочненные осадки». Нам известны такие породы, как брекчии, конгломераты и смешанные конгломераты из осадочных и изверженных пород. Насколько такие «бетоны» по структуре родственны изготовляемому сегодня бетону, показывает рис. 1.

Что же касается принципа изготовления (т. е. скрепления вяжущим рыхлых пород), бетон — очень древний строительный материал. При археологических исследованиях поселения на правом берегу Дуная у Железных Ворот проф. Срежович обнаружил бетонные полы, сделанные из извести, песка, гравия и воды. Эти бетонные плиты имели толщину от 3

* В дальнейшем тяжелый бетон на цементе обозначается словом «бетон».

Рис. 1. Природный камень и бетон вверху — камень-конгломерат из парка Гете в Веймаре, внизу — бетон с гравелистым песком (Л 32)

до 25 см. Возраст их был определен радиоуглеродным методом в 7600 лет!

Камни, скрепленные литым гипсом, использовались в сооружении в Междуречье; возраст их исчисляется в 6000 лет. Они обнаружены при раскопках в 1956—1957 гг.

Финикияне и греки продолжали применять этот принцип при изготовлении плит до тех пор, пока римляне не создали такие крупные постройки, как гавани, мосты, в частности акведуки, и купола более 40 м в диаметре. Римляне принесли этот метод возведения крупных конструкций и в среднюю Европу. Они проложили 105-километровый водопровод из бетона, снабжавший колонию Клаудиа Агриппинензис, ставшую позже г. Кельном, свежей водой из Эйфеля. В качестве вяжущего здесь была использована смесь извести и трасса. Часть этого сооружения служила до недавнего времени.

О бетоне в сегодняшнем понимании значения этого слова говорят с тех пор, как существует минеральное вяжущее цемент. Обычно годом его изобретения считают 1844-й. Исторически это подтверждается лучше всего тем, что этот год рассматривается как дата завершения почти столетних поисков нового вяжущего, когда Исаак Чарльз Джонсон сформулировал два фундаментальных условия изготовления цемента:

- подбор правильного соотношения исходных компонентов;
- обжиг этих материалов до температуры спекания (начинающегося плавления) около 1450° С.

Новому вяжущему и новому строительному материалу пришлось преодолеть скепсис и предубеждения, но, несмотря на это, его развитие шло очень быстро. Бетон нашел применение прежде всего в больших фундаментах водохозяйственных и промышленных сооружений. Уже в тот период новый метод строительства привел к росту производительности труда. Одной из больших построек из этого строительного материала был памятник Битвы народов в Лейпциге (1900—1905 гг.). Для его фундамента использовано 120 тыс. м³ трамбованного бетона (рис. 2).

С тех пор работы над бетоном материаловедческого и технологического характера не прекращаются. В наше время нет отрасли народного хозяйства, которая могла бы обойтись без бетона. На рис. 3—6 показа-

Таблица 1. Объяснения к терминам, связанным со строительным материалом бетон

Классификация бетона	Особые обозначения бетона		
По типу использованного вяжущего	Цементный бетон, асфальтобетон, пластобетон		
По объемной массе	Особо тяжелый ($\gamma>2{,}5$) баритовый, магнетитовый, лимонитовый	Тяжелый ($1{,}8<\gamma<2{,}5$) гранитный, щебеночный (базальтовый, известняковый, гранитный)	Легкий ($\gamma<1{,}8$) термозитовый, керамзитовый на вспученном сланце, летучей золе, спекшемся кирпичном щебне, вермикулите, перлите
По месту изготовления	Монолитный, предварительно изготовленный для подводного бетонирования		
По обрабатываемости	Жесткий, подвижный, литой		
По методу транспортировки бетонной смеси	Транспортируемый, подвергаемый давлению, перекачиваемый, литой		
По аппаратам и методам, применяемым для уплотнения	Трамбованный, вибрированный, центрифугированный		
По особым методам, применяемым при изготовлении	Вакуумированный, торкретированный, колькрит, препакт, крупнопористый		
По типу твердения	Нормальное, ускоренное (паропрогрев, горячий бетон, автоклавная обработка и др.)		
По прочностным показателям (при сжатии кубиков в МПа)	В 50, В 80, В 120, В 160, В 225, В 300, В 450, В 600		
По области использования	Конструкционный (например железобетон и предварительно напряженный железобетон), товарный, дорожный		
По специальным свойствам	Тампонажный, устойчивый при истирании, стойкий при агрессии, для защиты от радиации, огнестойкий, с малой усадкой, диффузионный, фильтрационный, дренажный, окрашенный, моющийся, звукопоглощающий, воздухововлекающий		

Рис. 2. Фундамент памятника Битвы народов (г. Лейпциг)

Рис. 3. Бетон в жилищном строительстве (г. Дрезден — Иоганштадт)

Рис. 4. Бетон в промышленном строительстве. Телевизионная башня в Дрездене (по той же технологии возводятся заводские трубы до 300 м)

ны некоторые современные бетонные сооружения.

Углубляющаяся специализация привела к тому, что к термину «бетон» стали добавлять слова, усложняющие восприятие этого термина. В связи с этим в табл. 1 сделана попытка классифицировать по различным признакам наиболее часто встречающиеся сочетания понятий, связанных с термином «бетон».

Напомним еще раз, что настоящая книга посвящена наиболее распространенному тяжелому бетону с природными заполнителями. Широко принятой классификацией является подразделение бетона по классам прочности при сжатии.

От бетона, используемого в конструкциях и сооружениях, требуются определенные физические, а иногда и химические свойства. В большинстве случаев определяющим показателем является прочность. Были созданы

Рис. 5. Бетон в водохозяйственном строительстве. Дамба в Раушенбахе

виды бетона, обозначение которых по прочности при сжатии дается в кгс/см² (МПа) в стандартных условиях твердения. Это бетоны марок: В 50, В 80, В 120, В 160, В 225, В 300, В 450, В 600 *.

* В СССР приняты марки бетона 50, 100, 150, ..., 600 и выше.

Рис. 6. Бетон в транспортном строительстве. Автострада Дрезден — Лейпциг

В табл. 2 приведены области применения бетона в зависимости от его прочности.

Проектировщик, руководствуясь техническими и экономическими критериями, выбирает необходимую марку для намеченного объекта строительства. Все, что должен знать практик для надежного изготовления тяжелого бетона требуемого качества, будет изложено в следующих пяти разделах книги.

Таблица 2. Преимущественное применение марок бетона для строительства из бетона или из предварительно изготовленных изделий

Изделия и вид строительства	Качество бетона[1]							
	В 50	В 80	В 120	В 160	В 225	В 300	В 450	В 600
Строительные изделия подчиненного назначения без арматуры (например, ленточные фундаменты) с предусмотренной малой долговечностью	×	×						
Небольшие строения с небольшими статически определенными деталями[2]			×					
Общее гражданское строительство[2]				×	×	(×)	(×)	
Предварительно изготовленные железобетонные изделия					×	×	×	×
Предварительно напряженные изделия						×	×	×

[1] Для легких бетонов и в области дорожного строительства есть и другие классы бетона.
[2] Большей частью бетон с арматурой.

2

Исходные компоненты бетона

Исходные компоненты бетона — цемент, заполнители и вода — своим качеством и количественными соотношениями решающим образом влияют на свойства бетона. Поэтому необходимо прежде всего рассмотреть свойства этих материалов.

2.1. Цемент

Цемент — гидравлическое минеральное вяжущее, дающее при твердении очень высокие прочности.

Его называют гидравлическим, поскольку:

- твердение основано на химической реакции с водой (гидратации);
- полученные из цементных минералов и воды твердые соединения в воде нерастворимы, т. е. водостойки.

Его называют минеральным, так как:

- исходные материалы, используемые для его получения, минеральной природы (это горные породы или продукты их выветривания).

Цемент принципиально отличается от других минеральных вяжущих (гипса, воздушной и гидравлической извести), которые твердеют только на воздухе или, затвердев на воздухе, иногда продолжают твердеть во внешней среде. Чтобы пояснить существенные различия между цементом, известью и гипсом, рассмотрим важнейшие характеристики этих вяжущих (табл. 3).

В дальнейшем нас будет интересовать только цемент.

Чтобы более наглядно представить процесс изготовления цемента, полезно сделать еще один экскурс в прошлое. Римляне подмешивали к извести определенные материалы для придания ей гидравлических свойств. Это были:

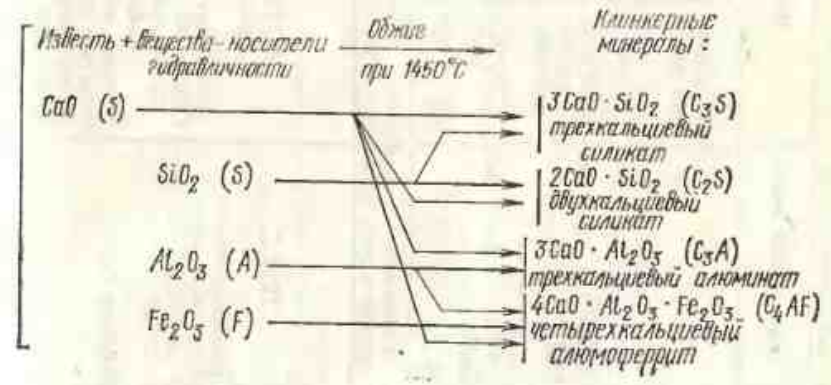
- пуццоланы (отложения вулканического пепла Везувия);
- дробленые или измельченные кирпичи;
- трасс, который они нашли в районе г. Эйфеля (затвердевшие отложения вулканического пепла).

Несмотря на различия, все эти материалы содержат в своем **составе оксиды:**

SiO_2 диоксид кремния (кварц или кремнекислота), Al_2O_3 оксид алюминия (глинозем), Fe_2O_3 оксид железа — и вызывают взаимодействие с ними извести; при этом происходит присоединение воды (гидратация) с образованием в первую очередь соединений с кремнеземом. В результате кристаллизуются нерастворимые гидросиликаты кальция. В средние века было случайно обнаружено, что продукты обжига загрязненных глиной известняков по водостойкости не уступают римским пуццолановым смесям, а даже превосходят их.

После этого начался упомянутый во введении вековой период усиленного экспериментирования. При этом основное внимание было обращено на разработку специальных месторождений известняка и глины, на оптимальное соотношение этих компонентов. Только после 1844 г. пришли к выводу, что, помимо точного соотношения компонентов сырьевой смеси, прежде всего необходима высокая температура обжига (порядка 1450° С) для достижения прочного соединения извести с оксидами. Эти три оксида после спекания с известью определяют гидравлические свойства, и их называют оксидами, обусловливающими гидравличность (факторами гидравличности).

Для изготовления цемента сначала добывают известняк и глину из карьеров. Известняк (приблизительно 75% всего количества) измельчают и тщательно перемешивают с глиной (примерно 25% смеси). Дозировка исходных материалов является чрезвычайно трудным процессом, так как содержание извести должно отвечать заданному количеству с точностью до 0,1%. Тем самым уже сказано, что соотношения химических составляющих поставлены в узкие пределы.



Эти соотношения определяются в специальной литературе понятиями «известковый», «кремнистый» и «глиноземистый» модули. Поскольку химический состав исходных сырьевых материалов вследствие зависимости от геологического происхождения постоянно колеблется, легко понять, как сложно поддерживать постоянство модулей. На современных цементных заводах хорошо зарекомендовало себя управление с помощью ЭВМ в комбинации с автоматическими методами анализа.

Правильно составленная шихта, подготовленная в зависимости от избранной технологии (сухой или мокрый метод), вводится во вращающуюся печь (длиной до 200 м и диаметром до 2—4 м) и обжигается при температуре около 1450° С — так называемой температуре спекания. При этой температуре материал начинает оплавляться (спекаться), он покидает печь в виде более или менее крупных комьев клинкера (называемого иногда и портландцементным клинкером). Во время обжига происходит следующий химический процесс:

В результате этих реакций образуются клинкерные материалы. Стоящие в скобках символы представляют собой упрощенный способ написания, принятый в химии цемента и применяемый также нами. Полученный обжигом клинкер измельчается с небольшой добавкой гипса (максимум 3%).

Размер зерен цемента лежит в пределах от 1 до 100 мкм. Его лучше иллюстрировать понятием «удельная поверхность». Если просуммировать площадь поверхности зерен в одном грамме цемента, то в зависимости от тонины помола цемента получатся значения от 2000 до 5000 см² (0,2—0,5 м²).

Преобладающая часть цемента в специальных емкостях перевозится автомобильным или железнодорожным транспортом. Все перегрузки производятся пневматическим способом. Меньшая часть цементной продукции доставляется во влаго- и разрывостойких бумажных мешках. Хранится цемент на стройках преимущественно в силосах.

На рис. 7 представлены некоторые узловые позиции технологии цементного производства.

Если измельчать чистый портландцементный клинкер с добавкой гипса, то получается собственно портландцемент. Оказалось, что к портландцементному клинкеру можно добавлять

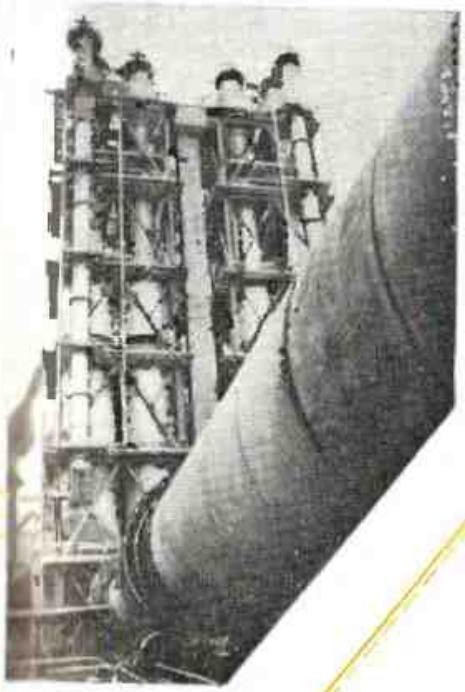
Таблица 3. Минеральные вяжущие, их изготовление, процесс твердения и свойства

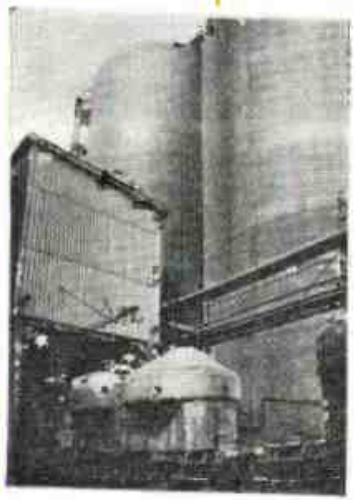
Вяжущее	Гипс	Воздушная известь		Гидравлическая известь	Цемент	
					Классический способ	С одновременным производством серной кислоты
Исходные вещества	Гипсовый камень	Известняки или карбидная известь		Известняк, глина или мергель	Известняк, глина или мергель	Гипс или ангидрит, песок, глина, кокс
Химическая формула	$CaSO_4 \cdot 2H_2O$	$CaCO_3$	CaC_2	$CaCO_3$, SiO_2, Al_2O_3, Fe_2O_3	$CaCO_3$ SiO_2, Al_2O_3, Fe_2O_3	$CaSO_4$, SiO_2, Fe_2O_3, Al_2O_3 C
Доля, %	100	100		75—95	75 25	
Подготовка I	Измельчение в дробилках и мельницах	Измельчение в дробилках	Обработка водой	Измельчение в дробилках помольных установках и гомогенизация		
Обжиг	В шахтной, вращающейся печи или в гипсоварочном котле					
Температура	$\approx 180°$ C, для специальных гипсов $\approx 1000°$ C	1200° C	Ацетилен	1200° C	$\approx 1450°$ C Спекание	
Принцип обжига	Обезвоживание	Декарбонатизация***	$CaC_2 + 2H_2O \rightarrow C_2H_2\uparrow + \boxed{Ca(OH)_2}\downarrow$	Декарбонатизация Обезвоживание глины и частичное взаимодействие	Декарбонатизация $CaSO_4 + 2C \rightarrow CaS + 2CO_2\uparrow$ $3CaSO_4 + CaS \rightarrow CaO + 4SO_2\uparrow$	
Химические процессы	$CaSO_4 \cdot 2H_2O \rightarrow \boxed{CaSO_4 \cdot 0{,}5H_2O} + 1{,}5H_2O\uparrow$	$CaCO_3 \rightarrow CaO + CO_2\uparrow$		Минерал C_2S	Полное взаимодействие извести с гидравлическими составляющими с образованием клинкерных минералов C_2S, C_3S, C_3A, C_4AF	

Продолжение табл. 3

Вяжущее	Гипс	Воздушная известь		Гидравлическая известь	Цемент
Подготовка II	Мелкий помол	Гашение $CaO + H_2O \rightarrow \boxed{Ca(OH)_2}$		Гашение	Тонкий помол с добавкой 3% гипса
Форма поставки	Порошок	Порошок или тесто	Тесто	Порошок	Порошок
Переработка (использование)	Гипс (+песок) + вода	С водой → штукатурка С водой и песком → раствор		С песком и водой → раствор	С песком и водой → раствор С заполнителями и водой → бетон
Процесс твердения	$CaSO_4 \cdot 0{,}5H_2O + 1{,}5H_2O \rightarrow CaSO_4 \cdot 2H_2O$ (рекристаллизация)*	$Ca(OH)_2 + CO_2 \rightarrow CaCO_3 + H_2O$ карбонатизация)		Карбонатизация и гидратация (твердеет медленней, чем цемент)	Гидратация
Свойства	Неводостоек Твердеет в результате взаимодействия с водой	Относительно водостойка		Водостойка Твердеет за счет реакции с водой и воздухом	Водостоек Твердеет благодаря реакции с водой
Прочность при сжатии	Прочность при сжатии 3—8 МПа**	Твердеет только на воздухе Требований нет		2—5 МПа	27,5—55 МПа

* Описанный процесс правильнее называть кристаллизацией (*Прим. научн. ред.*).
** По-видимому, речь идет о прочности гипса во влажном состоянии (*Прим. научн. ред.*).
*** В отечественной литературе принят термин «карбонатизация».





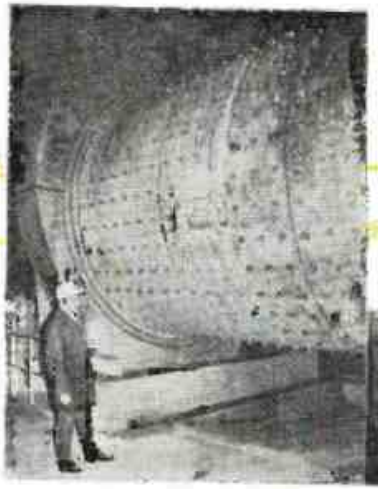


Рис. 7. Технология цементного производства

Исходные вещества подаются к вращающейся печи через дозирующие ленточные весы и сырьевую мельницу. При обжиге в печи образуются окатанные зерна портландцементного клинкера. В процессе измельчения его в цемент (размер зерна 1—100 мкм) вводят гипс и добавки. Показанная установка работает по современной технологии (позволяющей экономить энергию) с применением циклонного теплообменника. При обжиге расходуется только 800 ккал/кг клинкера.

вещества, приобретающие в присутствии цемента гидравлические свойства, т. е. способность к гидравлическому твердению. При этом также получаются высококачественные цементы, которые в большей или меньшей степени (в зависимости от вида и количества добавки) отличаются от чистого клинкерного цемента.

В качестве добавок могут фигурировать гранулированный доменный и другие шлаки, зола бурого угля и авгитопорфирит. Ранее добавкой служил только доменный шлак. С тех пор сохранялись понятия «железопортландцемент» и «доменный цемент». Ныне цементы с добавками из металлургии обозначают общим названием «шлакопортландцементы».

Путем введения добавок достигаются два преимущества:

- во-первых, цемент стоит дешевле, так как портландцементный клинкер дороже любой добавки;
- во-вторых, можно регулировать его специальные свойства.

Учитывая эти соображения, можно рекомендовать следующие цементы:

Портландцементы без добавок или с добавками не более 20% (TGL 28101/01);

PZ1 — без добавок;
PZ2 — то же;
PZ3 — » ;
PZ7 — максимально с 20% добавок;
PZ8 — то же.

Цементы с добавками более 20% (TGL 28101/02)

ZZ1 — 20—40% добавок;
ZZ2 — 20—40% добавок;
ZZ3 — 40—80% добавок;
ZZ4 — 55—80% добавок;
ZZ8 — 30—60% добавок.

В пределах этих разновидностей цемента существуют еще цементы, различающиеся прочностными показателями: 27,5; 32,5; 37,5; 42,4 и 47,5 МПа. Дальнейшие различия и вытекающие отсюда выводы для строительства рассмотрены в разд. 3.4.

2.2. Вода

Для изготовления бетона пригодна в принципе любая питьевая и промышленная вода, а также природная вода, если она не загрязнена.

Степень загрязнения воды устанавливают прежде всего по ее цвету, запаху, вкусу, содержащимся взвешенным частицам и имеющейся или возникающей при сильном ударении пене (рис. 8). Однако этих критериев, помимо их субъективности, совершенно недостаточно, чтобы судить о степени загрязнения. Некоторые примеси (например соли морской воды) не ухудшают процесс твердения, другие ухудшают уже при малых концентрациях.

Особого контроля требует использование открытых вод и колодцев в промышленных районах (особенно в районах химической, целлюлозной, кожевенной и пищевой промышленности). Могут оказаться непригодными также воды особых месторождений (например источники углекислых вод, болотные или воды месторождений бурого угля). В этих случаях следует с помощью методов контроля, о которых подробнее говорится в разд. 6.3, составить себе представление о применимости воды. Если используется вода из колодцев, находящихся в пределах строительной площадки, целесообразно определить ее качество.

Если бетон предназначен для изготовления предварительно напряженных конструкций, вода должна быть обязательно питьевой.

Рис. 8. Вода в реке сильно загрязнена. Ее нельзя использовать для изготовления бетона!

Это требование предъявляется, однако, не из соображений, связанных с твердением цемента. Оно обусловлено тем, что применяемые для предварительно напряженных конструкций стали очень чувствительны к коррозионным воздействиям минимальных концентраций хлористых растворов.

2.3. Заполнители

Заполнителями называются зернистые породы, составляющие основную массу бетона (приблизительно 75%). Они образуют зерновой скелет, который омоноличивается с помощью цементного камня (из цемента и воды) в искусственную породу.

Из определения легко сформулировать основные требования к заполнителям: они должны быть прочными и невыветренными и давать прочное сцепление с цементным камнем. Можно было бы допустить, что заполнители играют в бетоне пассивную роль. Однако дальнейшее изложение (прежде всего в разд. 4) покажет, как активно они изменяют свойства бетонной смеси и бетона.

Заполнители добываются с относительно небольшими затратами. Месторождения распределены по территории ГДР таким образом, что транспортные расходы на доставку заполнителей к заводам и стройплощадкам лежат в допустимых пределах. Часто для приготовления бетона применяют местные породы.

Обычно заполнители добывают из месторождений горных пород — гравийных ям и каменоломен. Если первые встречаются почти повсеместно в доисторических речных долинах и ледниковых образованиях, то каменоломни с пригодными разновидностями камня концентрируются преимущественно в южных и восточных районах; так, например, кварцевый порфир — в области Залле и Лейпцига, серый рваный камень — в Нижнем Лаузитце, диабаз — в Фогтланде, гранит — в Верхнем Лаузитце, гранулит — в Рудных горах, базальт — в Рене. В связи с увеличивающимся размахом строительства приобретают значение месторождения известняка в долине Заале-Унштрута и др. В гравийных месторождениях гравий добывается часто под водой.

Грубые включения отделяют на ситах. На обогатительных установках гравий часто промывают, чтобы удалить нежелательные включения (о которых еще будет идти речь). Последующая классификация дает точно дифференцируемые классы зерен.

Первоначально отсеянный крупный гравий дробится в дробилках, и полученную продукцию также классифицируют на ситах. Так как этим путем потребность в крупном заполнителе не может быть удовлетворена, были организованы открытые разработки, в которых добывается щебень. После взрывных работ камень пропускают через дробилки и сита, в результате чего также получается классифицированный материал. Добыча и обработка заполнителей показаны на рис. 9.

Размеры самых крупных и самых мелких зерен, полученных в результате рассева, определяются максимальными и минимальными размерами ячеек в ситах. Чтобы получить сравнимые результаты, применяют международные стандартные сита с размером стороны квадратной ячейки 0,25; 0,5; 1; 2; 4; 8; 16; 31,5 и 63 мм, причем в наборе могут быть представлены не обязательно все сита. Часто это только сита с размером ячеек 4, 16 и 31,5 мм. В зависимости от класса зерен и способа добычи рассматривают заполнители как песок, дробленый песок, гравий, щебень, гальку (см. табл. 4). Заполнитель, включающий и песок и гравий, называют гравелистым, или песчано-гравийной смесью.

Заполнители могут содержать ряд вредных составляющих, которые должен знать практик, чтобы предохранить себя от неприятных неожиданностей.

К первой группе загрязнений относятся прилипшие к заполнителю или встречающиеся в виде комьев мелкие частицы, из-за которых заполнитель без дальнейшего обогащения неприменим. Эти загрязнения образовались в процессе возникновения месторождения или в более поздний период. В щебне мелкие составляющие

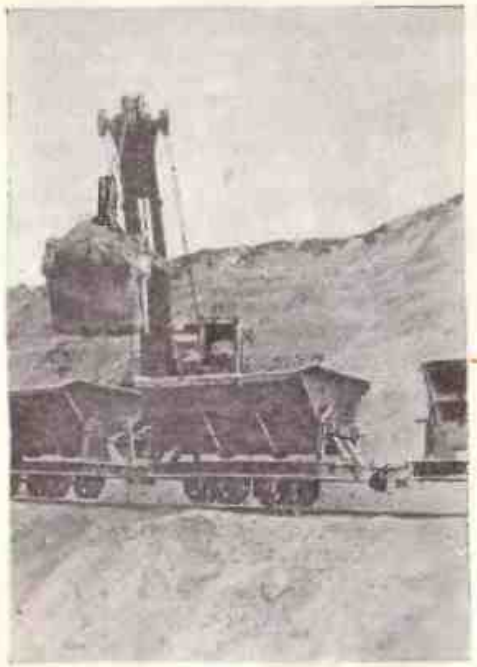
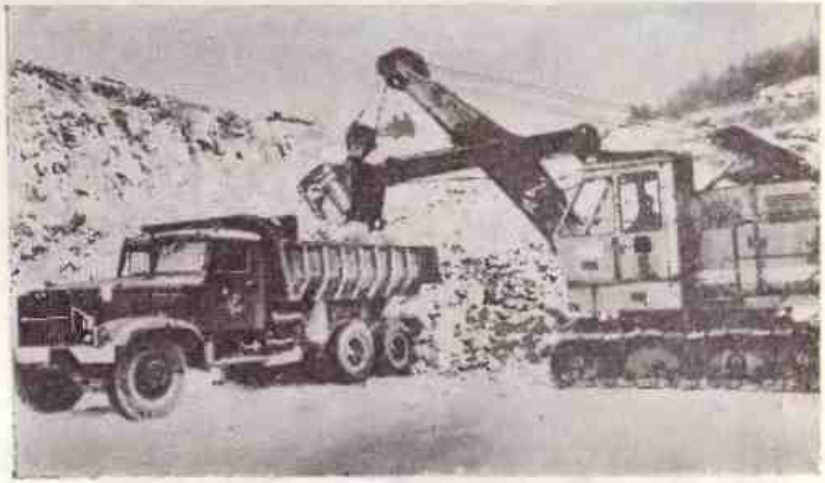
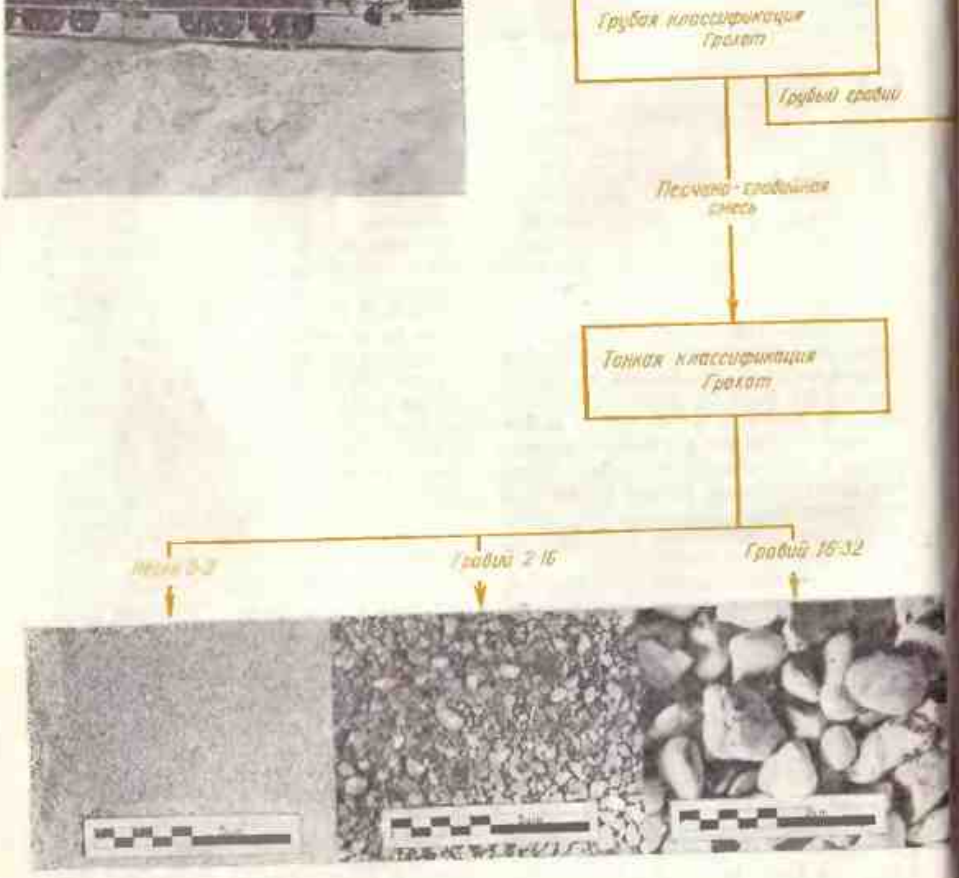
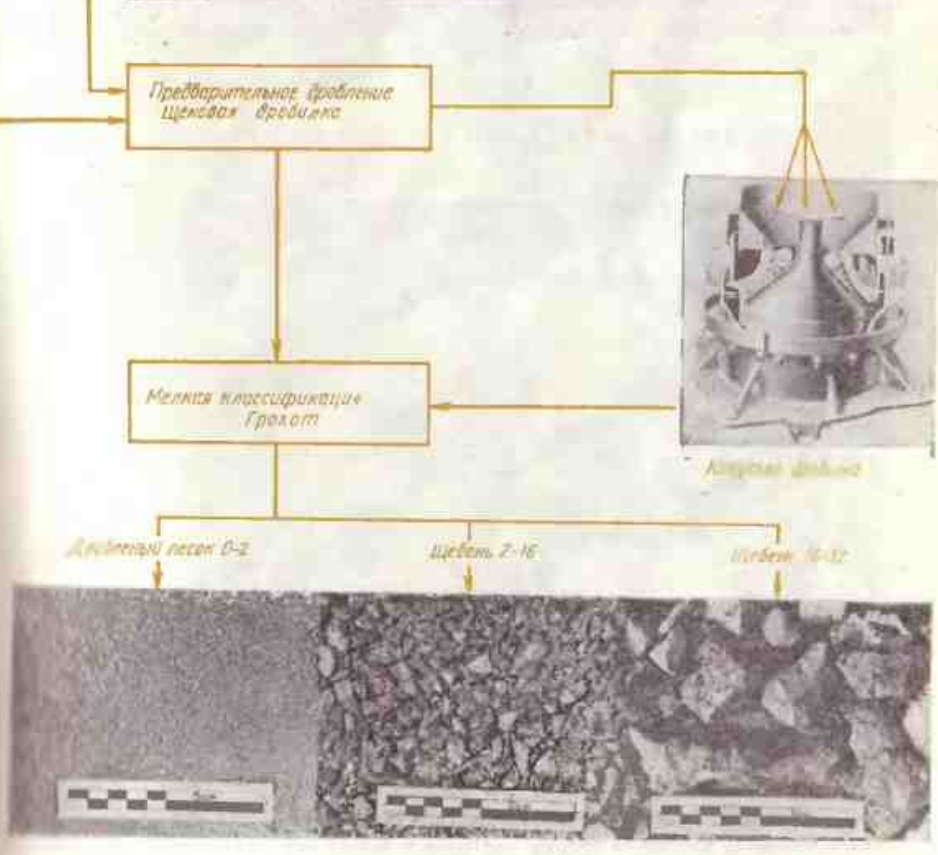


Рис. 9. Технология добычи заполнителей

Месторождение разрабатывается мощными агрегатами. Для разделения по размерам применяют агрегаты, основанные на различном принципе действия, различной конструкции и мощности. Раздельному хранению фракций заполнителя следует уделять особое внимание







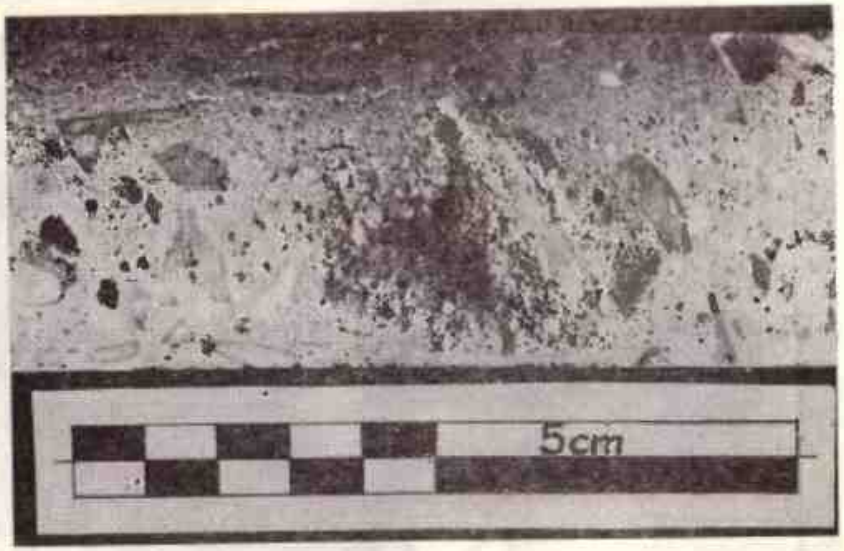


Рис. 10. Нарушения в бетоне, вызываемые глинянными включениями в заполнителе

При извлечении керна глина была вымыта промывочной водой, что вызвало нарушения в бетоне

Рис. 11. Влияние заполнителя с глинистой оболочкой

1 — сцепление с цементным камнем нарушено и заполнитель легко извлекается из керна; *2* — наличие раковин объясняется плохим уплотнением

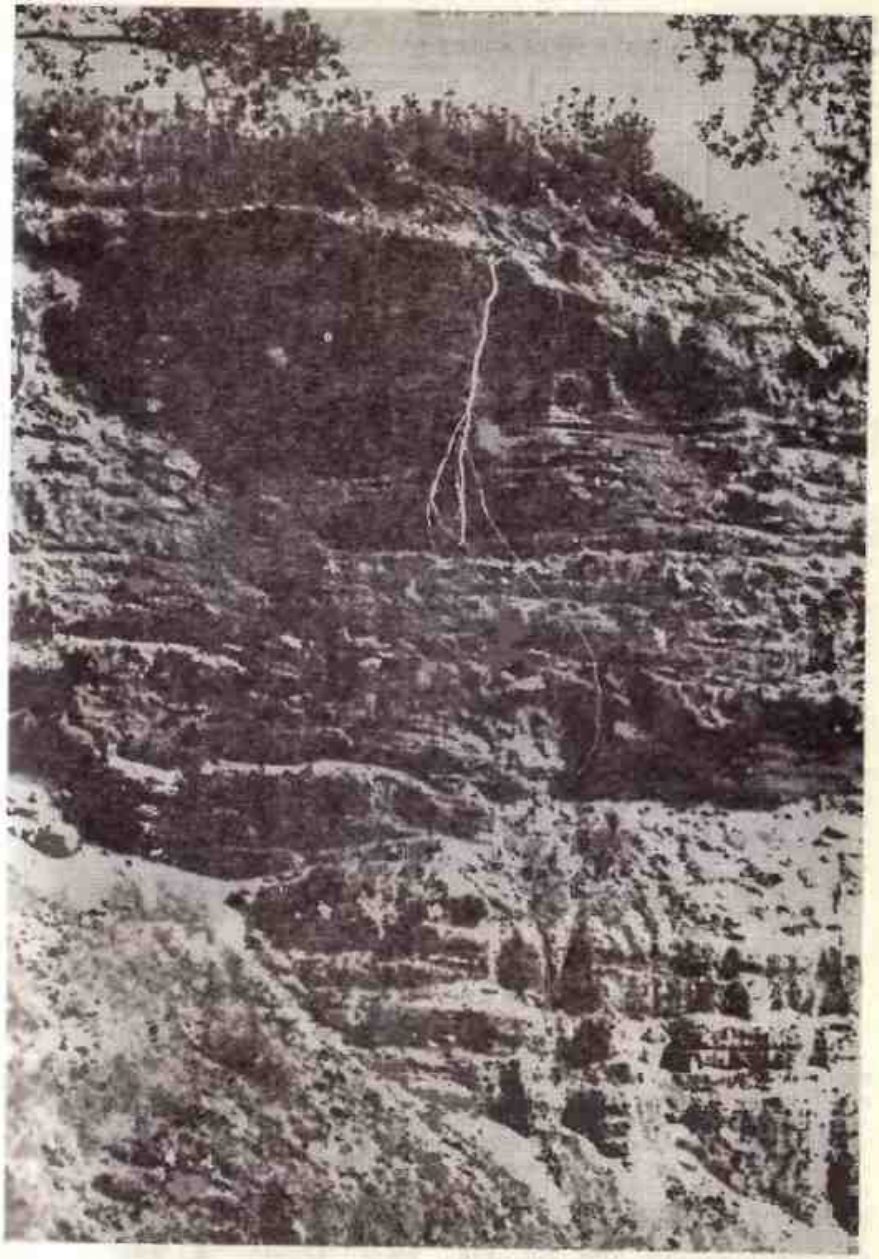


Рис. 12. Покровный слой песчано-гравийного месторождения

Перед добычей гравия покровный слой необходимо удалить. Сельскохозяйственные работы следует прекратить задолго до начала предлагаемой разработки месторождения

Таблица 4. Характеристика заполнителей по стандарту в зависимости от формы и размера зерна

Крупность зерна заполнителя, мм		Дополнительные обозначения заполнителя	
наименьшая	наибольшая	недробленый	дробленый
—	2	Песок	Дробленый песок
2	31,5	Гравий	Мелкий щебень
31,5	63	Грубый гравий	Щебень

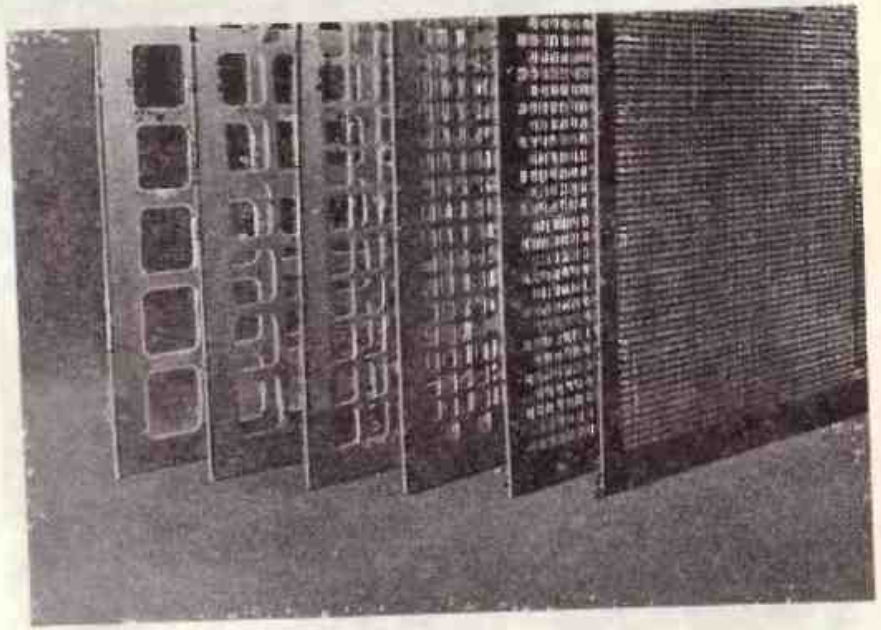


Рис. 13. Набор сит (из жести) для заполнителей бетона по TGL 7354

Размеры отверстий: 63; 31,5; 16; 8,4 и 2 мм. Входящие в этот же набор сита из тканей (с размером отверстий 1, 0,5 и 0,25 мм) не показаны

появляются из вскрыши каменоломни или в виде пыли при добыче. В сухом заполнителе эти примеси обладают удивительной твердостью и прочностью. Они размягчаются только частично во влажном грунте и при введении воды в процессе приготовления бетонной смеси. Поэтому из-за них происходят прямые (рис. 10) или косвенные (рис. 11) нарушения в бетоне.

Ко второй группе относятся загрязнения органического происхождения, которые появляются вследствие попадания гумусовых веществ материнской почвы с дождевой водой в гравийное месторождение или вследствие недостаточного удаления вскрыши (гумусовый слой, выветренная порода) над полезной породой и попадания ее при разработке в заполнитель (гравелистый песок или дробленая порода в каменоломне) (рис. 12). Так как эти вещества даже в очень малых концентрациях могут нарушать процессы твердения цемента, их следует обязательно учитывать.

Очень вредны сернистые соединения, которые могут встречаться в виде сульфидов или сульфатов. При увлажнении они приводят к сульфатному расширению затвердевшего бетона. Реже в заполнителях встречаются растворенные хлориды, также влияющие на процесс твердения цемента и, кроме того, вызывающие коррозионные явления на армирующей стали. Еще одна опасность — так называемые легкие заполнители. Это часть породы, преимущественно известняки, с объемной массой 2,3 г/см³, которые имеют малую собственную прочность и — что еще важнее — неморозостойки. Этими свойствами характеризуются заполнители гравийных месторождений послеледникового периода. Такой гравий применим только условно или по меньшей мере должен обогащаться промывкой.

Для того чтобы получить полное представление о заполнителе, рассмотрим особо важную его характеристику — зерновой состав. Ее необходимо знать, чтобы путем сравнения с заданными зерновыми составами определять пригодность зернового состава имеющихся заполнителей и возможность его корректировки.

Под зерновым составом понимается количество отдельных зерновых фракций заполнителя, прошедших через набор сит с квадратными отверстиями (от крупных к мелким) (рис. 13).

Результат просеивания графически оценивается по полученной кривой. Такая оценка на примере гравийного песка (рис. 14) из месторождения первоначального русла Эльбы представлена на рис. 15. На сито с наибольшими отверстиями, расположенное сверху, помещают определенное количество гравийно-песчаной смеси, которое просеивают до прекращения прохождения зерен через сито. Затем взвешивают фракции (массу отдельных классов). Эти фракции суммируют непрерывно для получения полного остатка на сите и выражают его в процентах от массы. В результате вычитания этой суммы из 100% получают остаток, который характеризует количество зерен, прошедших через сито. Полученное значение наносят в координатной системе над указанием размера ячейки сита и получают линию просеивания. Рис. 15 показывает существующую связь между кривой просеивания и соответствующим материалом (проведение опыта см. 6.2.2). Как ни показательна линия просеивания, она имеет тот недостаток, что свойство здесь выражено не понятием, а линией.

Рис. 14. Песчано-гравийная смесь из месторождения древнего русла Эльбы

Поэтому принято выражать любую линию просеивания числом зернистости (K), которое получается делением суммы всех остатков на ситах на 100:

$$K = \frac{\Sigma y_R}{100}.$$

Число зернистости (K — число) заполнителей определяют на основе примера, представленного на рис. 15:

Ординаты остатков	*Остатки, %*
$Y_{R0,25}$	100—18=82
$Y_{R0,5}$	100—32=56
Y_{R1}	100—44=56
Y_{R2}	100—59=41
Y_{R4}	100—73=27
Y_{R8}	100—84=16
Y_{R16}	100—94=6
$Y_{R31,5}$	100—100=0
ΣY_R	296

Фракция зерна, мм	Набор сит: Отверстие, мм	Масса фракции, г	Остаток на ситах, г	Остаток на ситах, %	Проход, %
> 31,5	31,5	0	0	0	100
16 ... 31,5	16	300	300	6	94
8 ... 16	8	500	800	16	84
4 ... 8	4	550	1350	27	73
2 ... 4	2	700	2050	41	59
1 ... 2	1	750	2800	56	44
0,5 ... 1	0,5	600	3400	68	32
0,25 ... 0,5	0,25	700	4100	82	18
0 ... 0,25	0	900	5000	100	0

Рис. 15. Ситовой анализ

На основе этих данных строится кривая просеивания заполнителя бетона. Изображение классифицированной песчано-гравийной смеси иллюстрирует кривую просеивания

$$K = \frac{\Sigma y_R}{100} = 2{,}96.$$

Метод иллюстрируется рассмотренным выше примером на рис. 16 и приведенным предварительным расчетом остатков на ситах.

Кривые ситового анализа с очень большим содержанием мелких частиц лежат на диаграммах выше, чем кривые с более высоким содержанием крупных составляющих. Число K соответственно больше у крупных зерновых составляющих, чем у мелких.

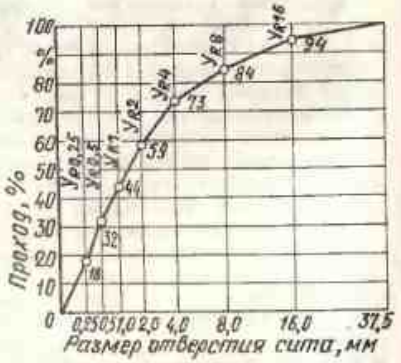
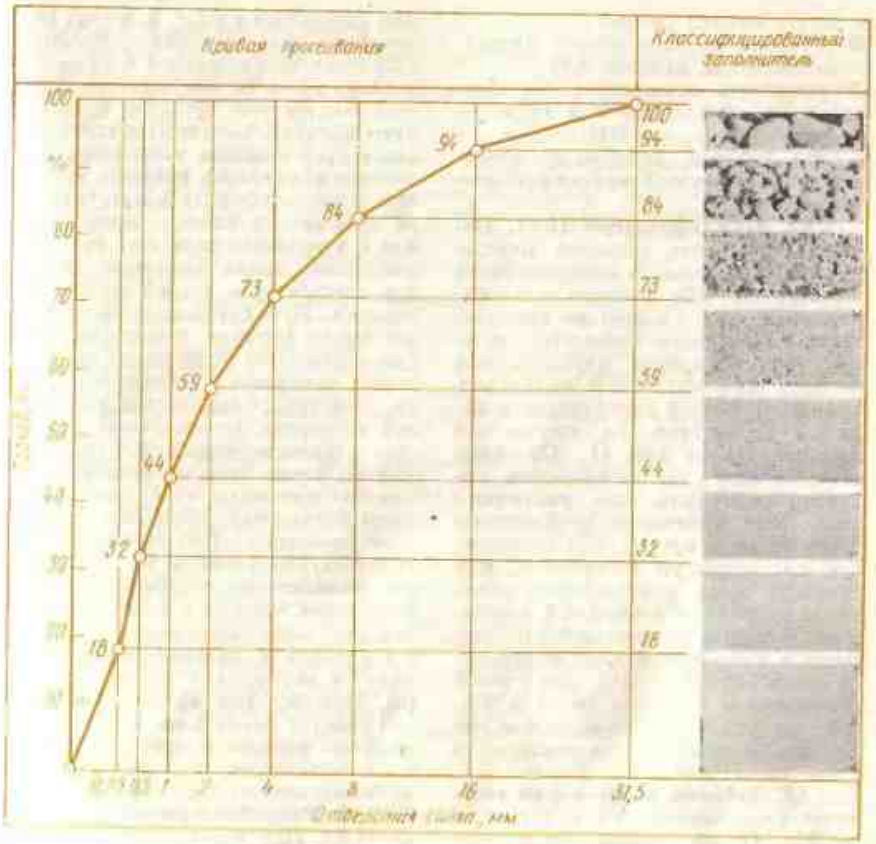


Рис. 16. Определение числа K в смеси заполнителей (на примере рис. 15)



Знание кривой ситового анализа или числа K заполнителей следует рассматривать как предпосылку для изготовления бетона хорошего качества (см. разд. 4).

2.4. Добавки

Добавками называют химически активные вещества в жидком или порошкообразном состоянии, которые добавляются при замешивании бетонной смеси и влияют на определенные свойства бетонной смеси или затвердевшего бетона.

Названные выше компоненты бетонной смеси (цемент, вода и заполнители) используют для изготовления обычного бетона, добавки же могут быть введены с целью получить бетон с заданными свойствами для достижения определенного экономического и технологического эффекта. Наибольший полезный эффект при этом возможен в том случае, если требуемое качество бетона почти достигнуто и без их применения.

Механизм их действия делается понятным только после прочтения гл. 3 и 4. С помощью добавок, вводимых в бетон, можно изменить свойства бетонной смеси:

- улучшать ее обрабатываемость (пластификаторы BV);
- замедлять или ускорять процессы твердения (VZ — замедлители, BE — ускорители)

и затвердевшего бетона:

- улучшать морозостойкость (воздухововлекающие добавки LP);
- уменьшать агрессивное воздействие среды (уплотнители и гидрофобизирующие добавки DM).

Вид добавок, принцип их действия и наблюдаемый эффект приведены в табл. 5.

2.4.1. Пластификаторы (BK). Вода, как жидкость, обладает определенной вязкостью и поверхностным натяжением. Обе физические характеристики обеспечивают ее смачивающую способность. Вследствие сложного молекулярного строения она остается довольно вязкой жидкостью. Сравнение формы образующихся капель и периметров их смачивания представлено на рис. 17. Основные составляющие пластификаторов содержат молекулы мыл различного типа. Вода благодаря прибавлению таких веществ приобретает повышенную смачивающую способность, она делается более жидкой. Благодаря этому описанные в разд. 4.2 зависимости между консистенцией бетонной смеси и количеством воды изменяются таким образом, что для равной консистенции бетонной смеси и эталона требуется меньше воды или при том же количестве воды достигается более пластичная консистенция.

2.4.2. Добавки, влияющие на твердение (замедлители VZ и ускорители BE). Путем применения определенных химикатов процесс гидратации, описанный в разд. 3, может быть замедлен или ускорен. Механизм твердения многосторонен и сложен и поэтому здесь не обсуждается. Большой интерес для практики представляют добавки, вводимые в соответствии с требованиями технологии. При сильном замедлении процесса твердения можно избежать конструктивного оформления рабочих швов строения и уменьшить опасность усадки и накопления тепла. Ускорение твердения способствует ранней распалубке изделий. При бетонировании в зимнее время быстрое выделение тепла при гидратации желательно во избежание замерзания «молодого» бетона. Действие большинства ускорителей твердения, используемых в качестве противоморозных добавок, основано, кроме того, на том, что они заметно понижают точку замерзания воды затворения, позволяя тем самым проводить бетонирование при температурах ниже 0° С. Применение большинства ускорителей осложняется тем, что они в качестве активной составляющей содержат хлориды кальция и натрия, которые приводят к коррозии стальной арматуры. Поэтому при выборе ускорителей следует уделять особое внимание решению вопроса о применимости их в железобетоне и предварительно напряженном железобетоне.

2.4.3. Воздухововлекающие добавки (LP). При низких отрицательных температурах нарушение в бетоне

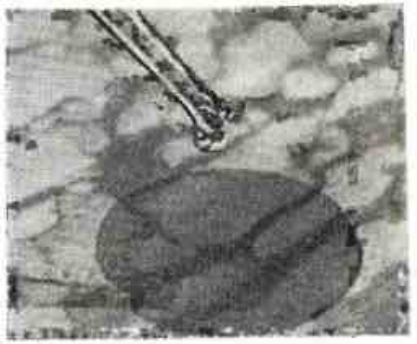


Рис. 17. Способность к смачиванию различными жидкостями

Большая капля воды способна смочить только маленькую поверхность (справа), гораздо меньшая капля другой жидкости смачивает большую поверхность (слева)

Таблица 5. Добавки к бетону

Группа добавок	Принцип действия	Полезный эффект	Побочные явления	Товарное наименование
Пластификатор (BV)	Улучшение смачивания водой	Облегчение работ вследствие более пластичной консистенции смеси или более высокая прочность бетона; возможна также экономия цемента	Действует как замедлитель схватывания, повышает усадку, иногда дает воздушные поры	Малликан BV216 (суперпластификатор — разрабатывается)
Замедлитель схватывания (VZ)	Замедляются процессы растворения и гидратации в цементном клее	При бетонировании возможны длительные перерывы в работе	Улучшает обрабатываемость, уменьшает тепловыделение и образование трещин	Родозал VZ
Ускоритель схватывания (BE)	Ускоряются растворение цемента и процессы его гидратации	Из-за ускорения процесса твердения возможно сокращение сроков строительства	Действует как защита от мороза. Коррозия стали при введении хлоридов	Церерапид S липоит S хидроранид
Воздухововлекающие (LP)	Образование в бетоне замкнутых сферических пор	Более высокая морозостойкость путем создания демпферного пространства	Действует как пластификатор	LP гриноал 69 линопласт PP17
Уплотнители (DM)	Уменьшение капиллярного подсоса жидкости	Повышение сопротивляемости против агрессивных сред и мороза	Иногда действует как ускоритель схватывания	Родозал D экстра сартоуниверсаль (баумулье)

происходит из-за того, что вода замерзает в капиллярных порах и вследствие приблизительно 9%-ного объемного расширения возникает гидравлическое давление, разрушающее вышележащие слои бетона. Если удается создать в бетоне сферические воздушные поры (рис. 18), то возникает буферное пространство для объемного расширения замерзающей воды, вследствие чего опасные напряжения в структуре снижаются или полностью снимаются. Вещества, с помощью которых во время перемешивания образуются поры, являются пенообразователями. Они состоят из сложных мыл и лигносульфонатов. Размер пор должен быть меньше или составлять 0,3 мм (см. разд. 3.3 и 4.4).

2.4.4. Уплотнители и гидрофобизующие добавки (DM) препятствуют полному насыщению капиллярных пор водой. Механизм их действия может быть различным в зависимости от использования гидрофобизующих (водоотталкивающих) веществ или набухающих добавок, или веществ со скрытогидравлическими свойствами.

Когда во вступлении мы говорили о том, что опытный бетонщик должен относиться к применению добавок как к «высшей школе» технологии бетона, то под этим подразумевали ряд особенностей, связанных с их использованием. Так, дозировка жидких и порошкообразных веществ требует применения механизмов или устройств, обеспечивающих точность дозирования добавок более высокую, чем принятая в обычных бетоносмесительных установках, так как вводимое количество добавок весьма мало. Ошибка в дозировке добавок может вызывать катастрофические последствия. Особая точность требуется также при контроле состава добавок.

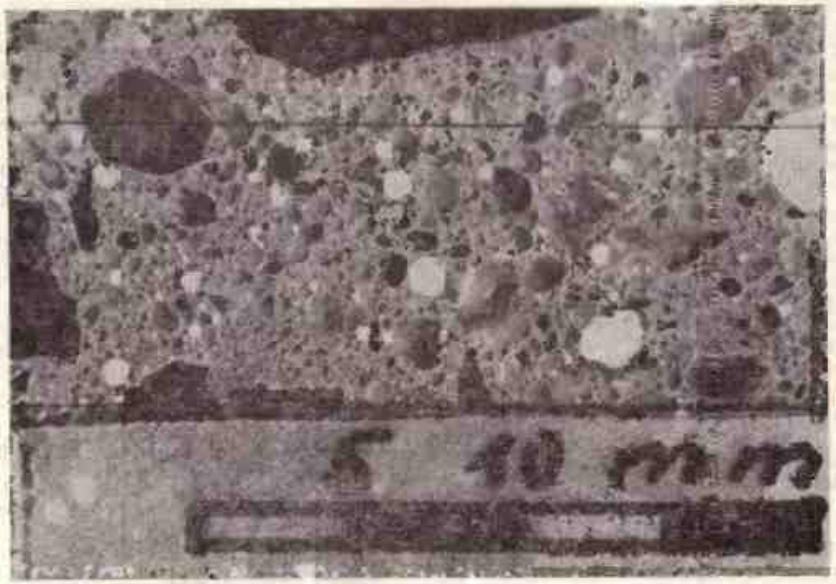


Рис. 18. Шаровые поры, образуемые воздухововлекающими добавками
На аншлифе они заполнены контрастирующим составом

Итак, на основании изложенного можно сделать выводы:

● Для изготовления бетона необходимо использовать цемент, воду и заполнители. При этом можно применять и добавки. Последние не являются, таким образом, обязательными компонентами бетона, а служат вспомогательными средствами, при использовании которых опытным бетонщиком достигается технический и экономический эффект.

● Добавки в бетон влияют на определенные свойства бетонной смеси или затвердевшего бетона, но не создают их*. Наибольший эффект от введения добавок проявляется лишь тогда, когда основные компоненты — цемент, вода и заполнители — выбраны заданного качества и в оптимальном соотношении для получения желаемых свойств.

● Добавки к бетону не чудодейственные вещества, исправляющие недостатки проектирования и дефекты выполнения бетонных работ.

* Некоторые добавки придают бетону новые свойства; например, гидрофобность, способность твердеть на морозе и др. (Примеч. научн. ред.).

Путь от цементного клея к цементному камню 3

Бетон представляется в основном как трехкомпонентное вещество, состоящее из трех основных составляющих: цемента, воды и заполнителей. Однако при дальнейшем рассмотрении нагляднее представлять бетонную смесь и бетон двухкомпонентными системами.

Бетон состоит из:

● цементного клея (цемент+вода), переходящего в совершенно новое качество — цементный камень, и

● заполнителей — каменных кусков и зерен различной величины, скрепляемых и объединяемых цементным клеем.

Свойства бетона как в состоянии бетонной смеси, так и в затвердевшем виде находятся под сильным влиянием этих двух компонентов. Большее влияние при этом оказывает цементный клей. О нем и его свойствах идет разговор в этом разделе.

3.1. Сущность процесса гидратации

Под гидратацией понимают реакции клинкерных составляющих с водой (присоединение воды), причем образуются твердые новообразования (гидраты), которые заполняют первоначально залитый цементом и водой объем плотным наслоением зерновых частиц, вызывая тем самым упрочнение.

Таким образом, без воды твердение невозможно. В этом и состоит большое значение влажного хранения изготовленного бетона. Первоначально жидкий или пластичный цементный клей превращается в результате гидратации в цементный камень. Первая стадия этого процесса называется загустеванием, или схватыванием, дальнейшая—упрочнением, или твердением.

Твердение цемента — очень сложный физико-химический процесс, который здесь будет рассмотрен упрощенно. Гидратацию рассмотрим в двух аспектах: как пространственный процесс (какие объемы занимают новообразования и какую структуру они имеют) и как химический процесс (каков состав новообразования).

3.1.1. Гидратация как пространственный процесс. Ответ на вопрос о том, какие образования возникают при гидратации, дан на рис. 19, где представлены продукты гидратации, возникающие в разное время. Одновременно показана кинетика нарастания прочности.

Можно различить следующие процессы.

Цементные частицы в виде дробленых зерен окружены водой затворения, объем которой относительно велик (50—70 объемных процентов). Этот объем заполняется новообразованиями, чтобы возникла прочная структура (цементный камень). Благодаря химическим реакциям с водой уже через несколько минут возникают как на поверхности зерен, так и в воде иглообразные кристаллы *а*. Через 6 ч уже образуется так много кристаллов, что между цементными зернами возникают пространственные связи (*б* — в нижней части рисунка два крупных кристалла образуют мост между двумя зернами цемента).

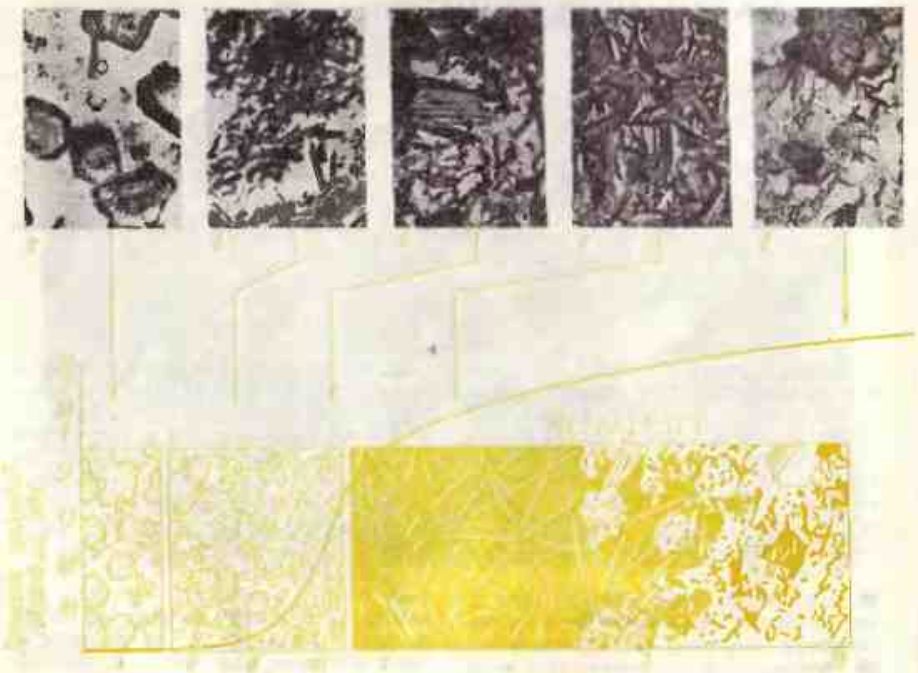


Рис. 19. Продукты гидратации и прочность цементного камня

Схема процесса гидратации (внизу) иллюстрируется данными электронной микроскопии. Увеличение примерно в 2000 и 10 000 раз

К этому моменту практик говорит, что цемент «схватывается». Через 8—10 ч весь объем между постепенно уменьшающимися зернами цемента заполнен скелетом иглообразных кристаллов, который вследствие возникновения из C_3A называется также «алюминатной структурой». Будучи до сих пор пластичной, масса начинает застывать, и происходит быстрое нарастание прочности. В оставшихся пустотах возникают одновременно, но сначала гораздо менее интенсивно продукты гидратации клинкерных минералов C_3S и C_2S. Последние образуют гомогенный чрезвычайно тонкопористый ворс из очень малых кристаллов, так называемую силикатную структуру *в*. Значение этой структуры все более увеличивается. Она является собственно носителем прочности цементного камня и приблизительно через сутки начинает вытеснять алюминатную структуру. В возрасте 28 сут (обычный срок испытания цемента и бетона) обнаруживается только силикатная структура *г*.

Кроме того, видны и неиспользованные цементные зерна (*е* — сверху, в середине). К этому времени процесс гидратации еще не закончен, в ряде случаев он может продолжаться годы. Возникновение продуктов гидратации рассматривают как гелеобразование, а продукты гидратации — как гель. Скорость, с которой протекают эти процессы, зависит от:

- крупности цементных зерен (тонины помола цемента);
- минерального состава клинкера цемента;
- количества воды, которым замешивается цемент;
- температуры гидратации;
- введения добавок (разд. 2.4).

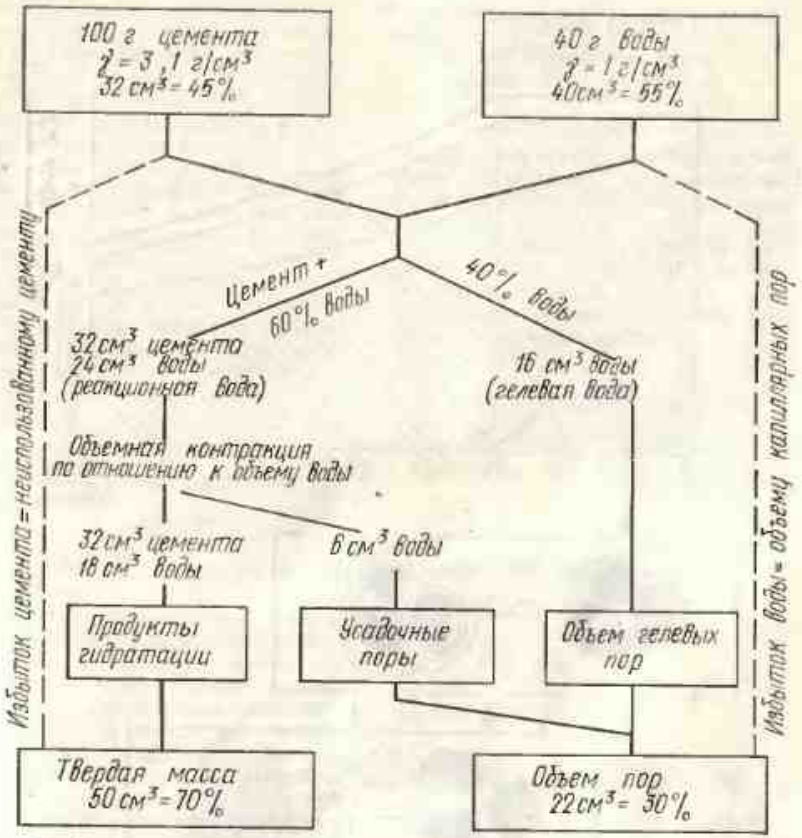


Рис. 20. Гидратация цемента в цементный клей (представлена на примере объемных изменений цементного клея, состоящего из 100 г цемента и 40 г воды — $В/Ц = 0{,}4$)

Для полной гидратации цементного зерна необходимо присутствие 0,4-кратного количества воды от его массы. Из нее только 60% (т. е. 0,25 массы цемента) связывается химически. Остальные 40% исходной воды остаются в порах геля (гелевые поры) слабо связанными. Размер гелевых пор около $3 \cdot 10^{-7}$ мм. Они неизбежны и служат причиной тонкопористого строения гелевой массы. При химическом связывании вода, в какой-то мере, претерпевает объемную контракцию, которая составляет приблизительно $^1/_4$ ее первоначального объема. Поэтому плотный объем геля (без пор) на такую величину меньше суммы объемов исходных компонентов цемента и воды. Этот процесс называют усадкой, а освобождающийся в цементном камне объем — объемом усадки. При наличии воды именно этот объем пор заполняется водой. При полной гидратации цементного клея получаем гель, объем которого примерно на 30% состоит из пор. Схематически объемные изменения представлены на рис. 20.

До сих пор мы исходили из того, что цементный клей состоит из 1 ч. массы цемента и 0,4 ч. массы воды. На практике это не всегда так. Если количество цемента больше, то количество воды будет недостаточным, чтобы полностью гидратировались це-

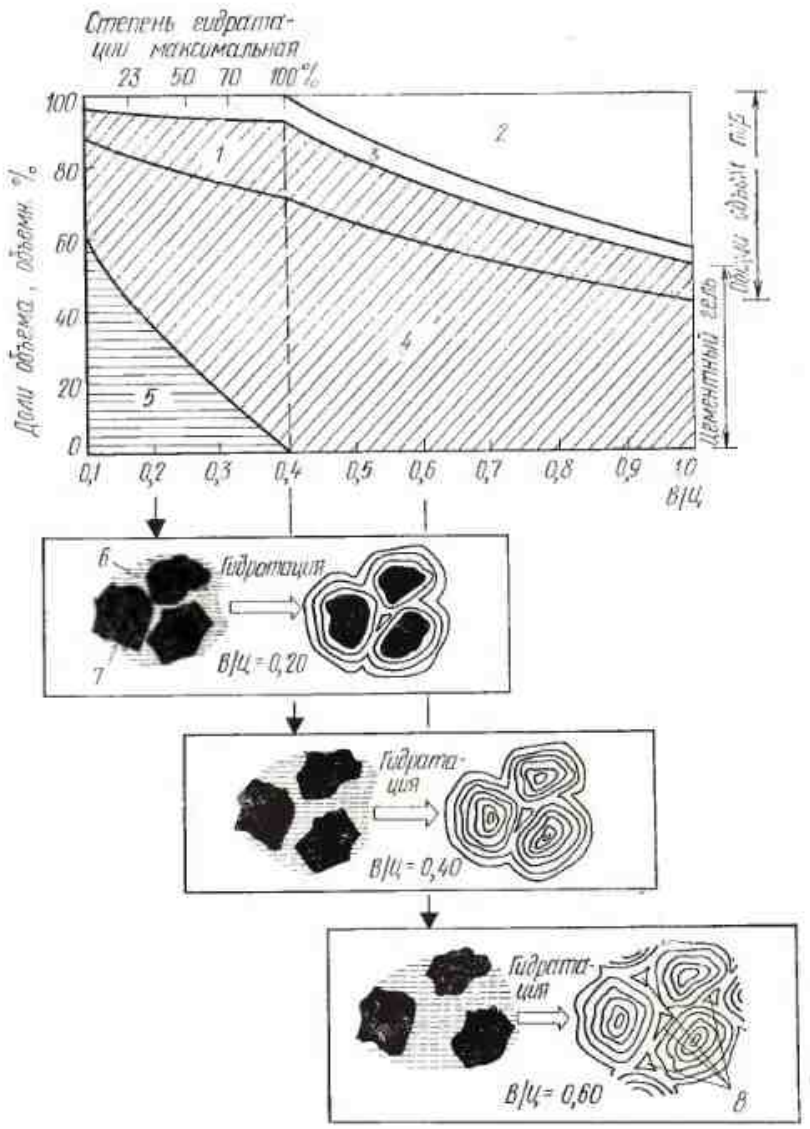


Рис. 21. Объемные соотношения в цементном камне при различном *В/Ц* и максимально возможной степени гидратации (диаграмма и схема)

1 — объем гелевых пор; *2* — объем капиллярных пор; *3* — объем усадочных пор; *4* — масса геля; *5* — неизмельченный цемент; *6* — вода; *7* — цементное зерно; *8* — капиллярные поры (вода)

ментные зерна, и в цементном камне останутся непрореагировавшие зерна цемента. При большем количестве воды часть ее не участвует в процессе гидратации и образует в цементном камне так называемые капиллярные поры диаметром около 10^{-3} мм, которые на несколько порядков больше гелевых пор. Примерно таких же размеров достигают и пустоты, возникающие в результате уже упомянутой усадки. Таким образом, соотношение масс воды и цемента в значительной мере определяет структурные отношения в цементном камне. Пользуясь этим соотношением, можно определить важнейшие физические свойства цементного камня. Поэтому соотношение

$$\frac{\text{масса воды}}{\text{масса цемента}} = \text{водоцементное отношение } (В/Ц)$$

имеет определяющее значение в технологии бетона.

На рис. 21 представлены объемные соотношения при различных значениях *В/Ц* и предельно возможной степени гидратации. Можно видеть, что суммарная пористость цементного камня тем больше, чем больше значение *В/Ц* (другими словами, чем меньше цемента в цементном клее). Эти схемы и диаграмма приведены с целью наглядного представления для различных *В/Ц*, хотя и не вполне отвечают действительности.

Все изложенное здесь позволяет вывести некоторые важные закономерности, характерные для цементного камня:

- процесс гидратации протекает постепенно;
- получающийся в результате цементный камень, хотя и является твердым телом, но имеет тонкопористую структуру;
- в цементном камне различают поровое пространство усадки и геля (которые неизбежны) и капиллярное поровое пространство (возникающее в увеличивающемся объеме, если цементный клей содержит более 0,1 кратного по отношению к цементу количества воды, т. е. если он подвержен влиянию водоцементного отношения).
- По значению *В/Ц* цементного клея можно оценить пористость возникающего из него цементного камня и сделать выводы о его физических свойствах.

3.1.2. Гидратация как химический процесс. Твердение, представленное как пространственный процесс, теперь рассмотрим как химический процесс. Из разд. 2 известно, что цемент в основном состоит из четырех клинкерных минералов: C_3S, C_2S, C_3A, C_4AF. При затворении цемента водой, протекают следующие процессы:

для C_3S

$$2\,(3CaO \cdot SiO_2) + 6\,H_2O \rightarrow 3CaO \cdot 2SiO_2 \cdot 3H_2O + 3CaO\,(OH)_2 + 502 \text{ Дж/г};$$

для C_2S

$$2\,(2CaO \cdot SiO_2) + 4H_2O \rightarrow 3CaO \cdot 2SiO_2 \cdot 3H_2O + Ca\,(OH)_2 + 260 \text{ Дж/г};$$

для C_3A

$$3CaO \cdot Al_2O_3 + 6H_2O \rightarrow 3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 6H_2O + 867 \text{ Дж/г};$$

для C_4AF

$$4CaO \cdot Al_2O_3 \cdot Fe_2O_3 + 2Ca\,(OH)_2 + 10H_2O \rightarrow 3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 6H_2O + 3CaO \cdot Fe_2O_3 \cdot 6H_2O + 419 \text{ Дж/г}.$$

Возникающие таким образом продукты гидратации представляют собой уже упомянутый гель. Для простоты обозначают их так же, как и клинкерные минералы, из которых они возникли (например, силикат кальция — гидросиликат кальция). Продукты гидратации отдельных минералов имеют специфические свойства, знание которых необходимо для дальнейшего понимания процесса твердения.

Анализ уравнений реакции позволяет сделать некоторые важные заключения. Во-первых, при гидратации возникают совершенно новые вещества. В процессе взаимодействия клинкерных минералов C_3S и C_2S с водой образуются гидросиликаты кальция и, кроме того, гашеная известь [$Ca(OH)_2$], остающаяся внутри це-

ментного камня. Этому явлению мы обязаны тем, что помещенная в цементный клей сталь не ржавеет, благодаря чему стало возможным существование железобетона. Кроме того, следует помнить и о том, что при гидратации выделяется тепло. По интенсивности тепловыделения клинкерные минералы располагаются в такой последовательности:

C_2S	206 Дж/г
C_4AF	419 Дж/г
C_3S	502 Дж/г
C_3A	867 Дж/г

Это практик обязательно должен знать. И особенно следует помнить об этом при выборе цемента для возведения определенных конструкций и при выборе той или иной технологии изготовления бетонных сооружений. Продукты гидратации клинкерных минералов различаются также по прочности. Из рис. 22 видно, что главными носителями прочности являются силикаты кальция. Особенно интересно, что клинкерный минерал с быстрым нарастанием прочности (C_3S) выделяет большее количество тепла (502 Дж/г), чем клинкерный минерал с более медленным нарастанием прочности (C_2S — 206 Дж/г).

Продукты гидратации клинкерных минералов различаются и по химическому составу. Рассмотрим следующую особенность C_3A. Если помимо обильного количества воды добавить еще и гипс, произойдет реакция

$$3CaO \cdot Al_2O_3 + 3CaSO_4 + 32H_2O \rightarrow$$
$$\rightarrow 3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 3CaSO_4 \cdot 32H_2O.$$

Продукт гидратации называется эттрингитом и раньше из-за своей палочковидной формы и вредного влияния назывался «цементной бациллой». Для этой реакции характерно, что присоединение 32 молекул воды вызывает сильное приращение объема по сравнению с объемами исходных компонентов: C_3A и гипса. Увеличение объема безопасно до тех пор, пока оно происходит в пластичной матрице. В свежезамешенном цементном клее образование эттрингита вызывается с целью регулирования скорости твердения. По этой причине к цементу при помоле добавляется гипс, о чем говорилось уже в разд. 2.

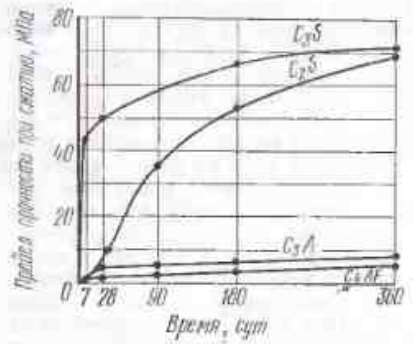


Рис. 22. Нарастание прочности клинкерных минералов

Механизм действия можно себе представить следующим образом. Очень быстро возникающие кристаллы эттрингита образуют оболочки вокруг цементных зерен. При этом затрудняется доступ воды и замедляется процесс гидратации. Без добавки гипса получился бы мгновенно схватывающийся цемент — «быстряк». Объемное расширение опасно, когда оно происходит в уже затвердевшем цементном камне (бетоне). Дело в том, что эттрингит может образовываться из продуктов гидратации C_3A в результате сульфатной агрессии (т. е. проникания растворимых сульфатов) по следующей формуле:

$$3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 6H_2O + 3CaSO_4 +$$
$$+ 26H_2O \rightarrow 3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 3CaSO_4 \cdot$$
$$\cdot 32H_2O.$$

При этом наблюдается 4,6-кратное увеличение объема. Подобные реакции в затвердевшем цементном камне приводят к возникновению напряжений, нарушению структуры и ее разрушению (сульфатная коррозия). Поэтому для бетонных объектов, подверженных сульфатному воздействию, следует применять цементы, бедные C_3A, чтобы ограничить или исключить образование эттрингита.

Итак,

- при гидратации клинкерных минералов C_3S и C_2S образуется помимо гидросиликатов кальция гашеная известь $Ca(OH)_2$. Она предотвращает развитие коррозии стали, помещенной в цементный камень;
- в процессе гидратации клинкерных минералов выделяется разное количество тепла;
- в результате гидратации клинкерных минералов образуется искусственный камень с различной прочностью;
- продукт гидратации C_3A неустойчив по отношению к сульфатам. Возникает эттрингит, причем изменение объема может привести к разрушению цементного камня (сульфатная коррозия);
- в зависимости от поставленных задач в строительстве применяются цементы с различной долей каждого из клинкерных минералов, причем в качестве основных критериев при выборе служат четыре приведенных выше.

3.2. Концентрация гелевидной составляющей

Понятие «концентрация гелевой составляющей» должно служить ключом к более доступному восприятию всех дальнейших зависимостей. Процессы гидратации вызывают образование гелевой составляющей, свойства которой очень сильно влияют на качество бетона, рассматриваемого в следующем разделе. Они зависят от степени превращения цементных зерен исходного цементного клея в массу геля. Ее называют степенью гидратации. Она составляет 100%, если цементные зерна полностью превращены в массу геля. Последняя заполняет объем воды и цементных зерен. Из предыдущего раздела уже известно, что 100%-ной гидратации достичь невозможно, если в цементном клее меньше воды, чем это соответствует

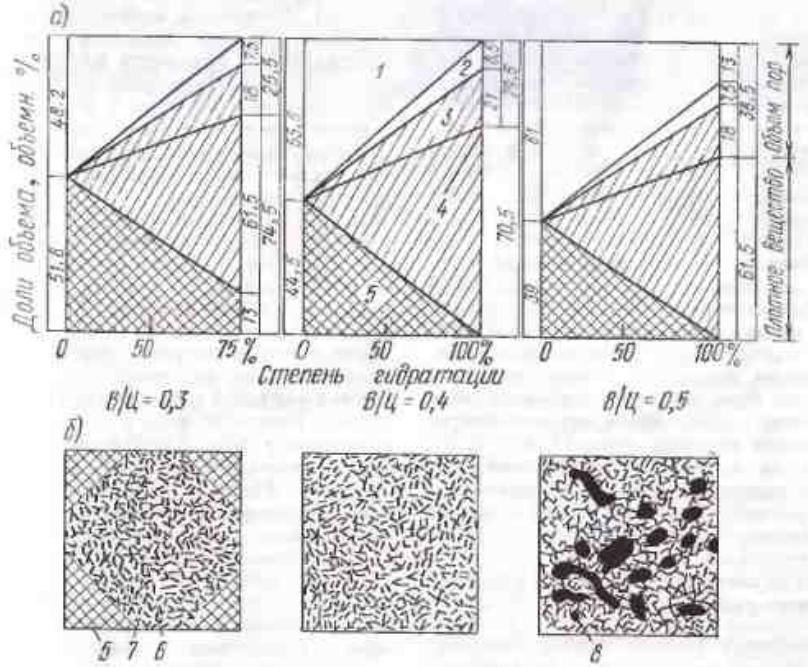


Рис. 23. Объемные соотношения *а* и структура цементного камня *б* в зависимости от *В/Ц*

1 — объем капиллярных пор; 2 — объем усадочных пор; 3 — объем гелевых пор; 4 — объем геля; 5 — неиспользованный цемент; 6 — гелевая пора; 7 — гелевые частицы; 8 — капиллярные поры

$В/Ц=0,4$. Но и при достаточном количестве воды никогда нельзя рассчитывать на 100%-ную гидратацию, так как она обычно достижима только через 1—5 лет (при анализах «римского бетона» в нем находились гидравлические составляющие, которые через 2000 лет еще не подверглись 100%-ной гидратации). На рис. 23 показан характер изменения объемных соотношений с увеличением степени гидратации, т. е. с увеличением времени твердения, для трех значений $В/Ц$.

Конечное состояние отвечает при этом данным, приведенным на рис. 21 соответственно. Для этого конечного состояния на рисунке схематически представлены возникающие структуры.

Скорость гидратации является функцией ряда факторов, и поэтому довольно трудно описать определенные свойства цементного камня, зависящие от нескольких переменных. Однако результаты исследований показали, что затруднения можно преодолеть, если использовать понятие «концентрация гелевидных составляющих» — отношение объемов плотного вещества новообразованного цементного геля (т. е. без пор) к заполняемому объему использованного цемента и воды затворения. Таким образом, концентрация гелевидных составляющих служит мерой степени заполнения массой геля объема между цементными зернами. Главнейшие физические свойства цементного камня можно представить в зависимости от концентрации гелевидных составляющих. Время, в течение которого может быть достигнута определенная степень концентрации, зависит от следующих условий:

- вида цемента (состава клинкерных минералов и тонины помола);
- значения $В/Ц$ цементного клея;
- температуры гидратации;
- вводимых добавок.

Следовательно, можно сформулировать вывод.

Физические свойства цементного камня находятся в прямой зависимости от концентрации гелевидных составляющих. Время достижения определенной концентрации зависит от использованного вида цемента, значения $В/Ц$; температуры, при которой протекает гидратация, введения добавок. Оно сокращается для быстро реагирующих цементов, при повышенной температуре и меньшем $В/Ц$ (меньший объем для заполнения новообразованиями).

3.3. Свойства цементного камня

До сих пор мы рассматривали основы гидратации и некоторые специальные свойства продуктов гидратации отдельных клинкерных минералов. Теперь предстоит обсудить вопрос об изменении свойств цементного камня, образующегося в результате накопления продуктов гидратации клинкерных минералов. Рассмотрим важнейшие: прочность, водонепроницаемость, морозостойкость, устойчивость против действия химически вредных веществ, усадку и ползучесть, тепловыделение.

3.3.1. Прочность цементного камня. Элементарное представление о возникновении прочности цементного камня можно составить по нашим воспоминаниям об игре с песком в детстве: чем мельче песок, смешанный с определенным количеством воды, тем прочнее изготовленные из смеси образцы (рис. 24).

Степень влияния тонких слоев на прочность сцепления может быть определена по трудности отделения друг от друга двух сложенных влажных стеклянных пластин. И в цементном геле пленки воды на поверхности гелевых частичек играют аналогичную роль, причем благодаря огромной удельной поверхности гелевых частиц (200—300 м²/г, а песок имеет поверхность 20—30 см²/г) цементный камень достигает прочности 100 МПа и выше. Помимо действия водных пленок другие поверхностные силы также участвуют в создании прочности. Не последнюю роль играет и сцепление гелевых частиц друг с другом.

Существует однозначная связь между концентрацией гелевидных составляющих и прочностью цементного камня. Эта связь настолько сильна, что даже при различных значениях $В/Ц$ в цементном клее она не нарушается (рис. 25). Необходимо, однако, учитывать, что цементный

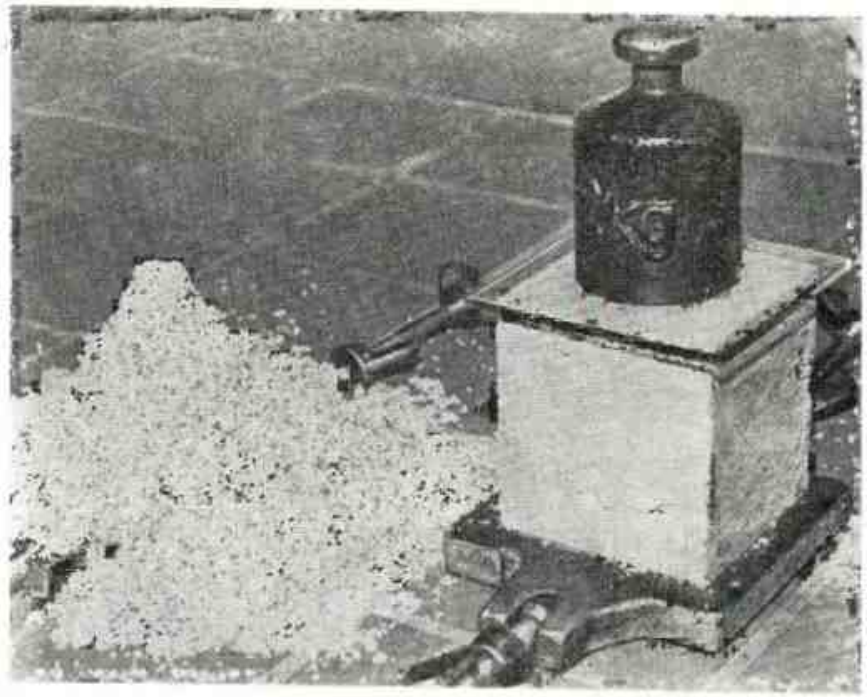


Рис. 24. Сила когезии влажных песчинок с зернами различных размеров (справа 0,1 мм, слева 1,5 мм)

Этот песок смешивали с 20 массовыми процентами воды и уплотняли. Когезионные силы крупного песка оказались недостаточны, чтобы сохранить форму кубика, между тем мелкий песок позволяет выдерживать еще дополнительную нагрузку

клей с большими значениями $В/Ц$, т. е. с более высоким содержанием воды, исчерпывает свою гидратационную способность при меньшей концентрации гелевых составляющих, чем цементный клей с малым $В/Ц$. Обратите внимание на то, что на горизонтальной оси отложена концентрация гелевых составляющих, а не время, как на рис. 26, в основе которого лежат значения, взятые из рис. 25. Здесь одинакова концентрация гелевых составляющих и, следовательно, одинаковая прочность, которая из-за различных значений $В/Ц$ наблюдается в различное время (представлена пунктиром).

Анализ рис. 20, 21 и 23 показывает, что цемент только тогда полностью будет гидратирован, когда он затворен водой, количество которой соответствует не менее 40% массы цемента ($В/Ц=0,4$), при меньшем количестве воды цемент гидратируется неполностью.

Возникает вопрос, каким образом все же достигается такая высокая прочность (рис. 25, 26, 46) при $В/Ц<0,4$. Попробуем дать объяснение. Как видно из рис. 26, концентрация гелевых составляющих K_3 недостижима в цементном клее с $В/Ц=0,4$ даже после 28 сут. У цементного клея со значением $В/Ц=0,32$ прочность только немного увеличится, так как 100%-ная гидратация невозможна из-за недостатка воды: негидратированные зерна цемента сохранятся в массе геля. Напротив, цементный камень с $В/Ц=0,4$ будет гидратироваться далее, концентрация гелевых составляющих будет продолжать расти, достигнет значения K_3, и тем самым соответственно будет достиг-

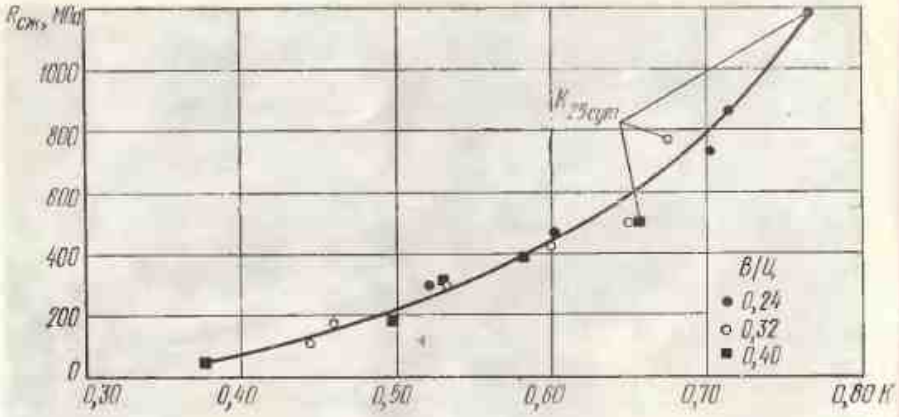


Рис. 25. Зависимость предела прочности при сжатии цементного камня от концентрации гелевидных составляющих

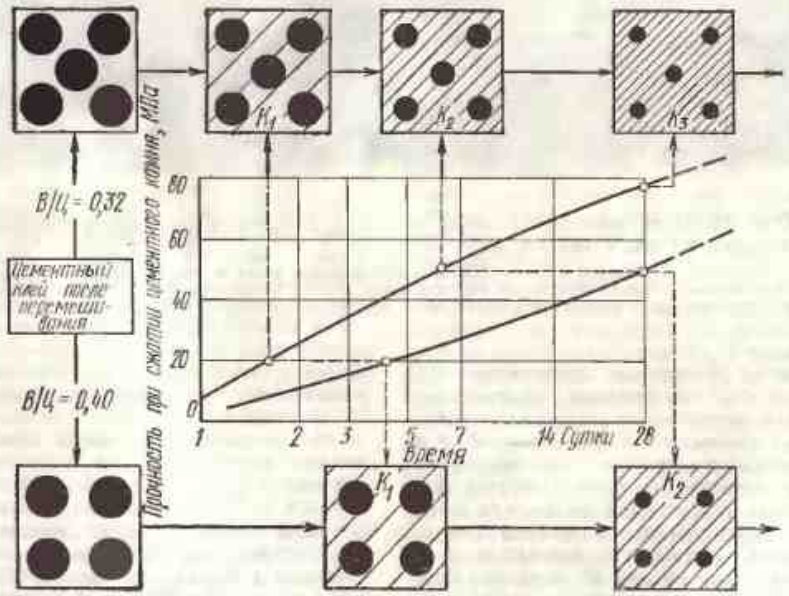


Рис. 26. Зависимость предела прочности при сжатии цементного камня и концентрации гелевидных составляющих (K_1, K_2, K_3) от времени твердения

нута высокая прочность. Наивысшая возможная концентрация гелевых составляющих соответствует значению, которое достигается при полной гидратации цементного камня с $В/Ц = 0{,}4$. И при меньших $В/Ц$ максимально достижима только эта концентрация гелевых составляющих. При этом видно, что значения $В/Ц < 0{,}4$ целесообразно принимать лишь тогда, когда необходимо повышение прочности в короткие сроки. Способ-

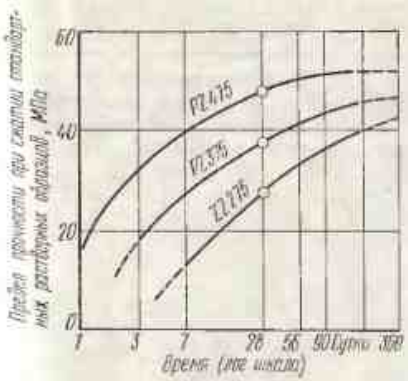


Рис. 27. Нарастание прочности при различных марках цемента

ность цемента к твердению при этом полностью не используется, поскольку часть его выполняет функции заполнителя.

Существуют цементы с различной прочностью (см. разд. 2), которая достигается в зависимости от различного количества клинкерных минералов и их характеристик, тонкости помола. Цементы высоких классов прочности получают обычно при высоком содержании C_3S (и соответственно малом содержании C_2S) в клинкере и очень тонком помоле. Часто из одного и того же клинкера получают цементы различных классов прочности только из-за того, что их по-разному измельчают.

Действие этих двух факторов легче всего представить на модели концентрации гелевидной составляющей: тонкомолотый цемент со своей намного большей реакционной поверхностью и высоким содержанием высококачественного C_3S (рис. 22) должен давать более быстрое нарастание концентрации гелевидных новообразований, чем цемент с более грубым зерном и малым содержанием C_3S. Так происходит представленное на рис. 27 нарастание прочности цементов различных прочностных классов. В связи с этим возвратимся еще раз к рис. 22, из которого видно, что минералы C_3S и C_2S обеспечивают различное нарастание прочности, но что приблизительно через год они имеют одинаковую прочность. Это подтверждается и рис. 27: через 28 сут твердения прочность образцов резко различается, через год эта разница уменьшается наполовину, а в дальнейшем — еще больше. Шлакопортландцементы (обозначение ZZ см. разд. 2.1) по тонине помола и скорости взаимодействия нельзя непосредственно сравнивать с портландцементом, так как из-за присутствия шлака они реагируют медленнее. Последующее твердение этих цементов весьма эффективно. Известны результаты длительных испытаний, которые свидетельствуют о том, что шлакопортландцемент низкого класса прочности после трех лет имел существенно более высокую прочность, чем портландцемент высокого класса прочности.

Еще один фактор влияет на скорость роста концентрации гелевидных составляющих — температура. При этом не имеет значения, произво-

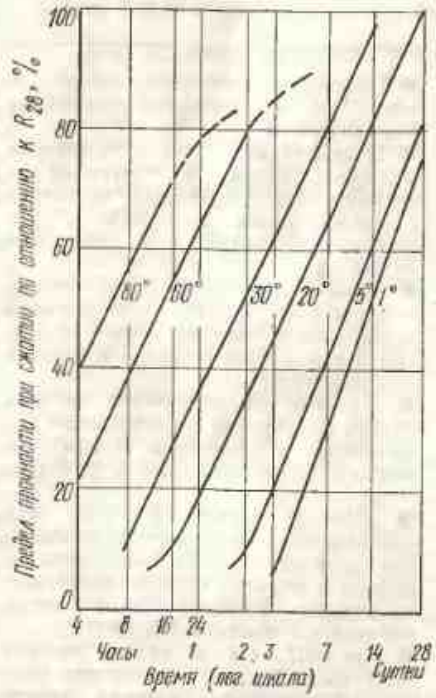


Рис. 28. Влияние температуры на скорость твердения бетона, приготовленного на портландцементе

шло ли повышение температуры за счет поступления тепла извне или за счет собственного тепловыделения при гидратации. При температурах ниже 5° С гидратация практически не происходит. С повышением температуры она протекает быстрее, и это обстоятельство используют на заводах по изготовлению бетона. Бетонную смесь нагревают различными методами, чаще всего паром. За счет ускоренного твердения бетона производительность увеличивается. Однако важно следить, чтобы при высоких температурах вода не удалялась из бетона, так как иначе гидратация прекращается. Напротив, низкие температуры замедляют твердение, что удлиняет сроки распалубки в зимний период строительства. В этом случае целесообразно использовать добавки, ускоряющие твердение (см. разд. 2.4). Влияние температуры на твердение бетона на портландцементе видно из рис. 28. Следующими выводами можно завершить этот важный раздел.

● Прочность цементного камня зависит от концентрации гелевидных составляющих.

● В цементных клеях с различным водосодержанием концентрация гелеобразных составляющих нарастает с неодинаковой скоростью (более высокое значение $В/Ц$ замедляет скорость).

● При одинаковой длительности твердения достигается более высокая концентрация гелевых новообразований и тем самым большая прочность при меньших $В/Ц$.

● Максимально возможная концентрация гелевидных составляющих наблюдается у полностью гидратированного цементного камня с $В/Ц = 0{,}4$.

● При значениях $В/Ц < 0{,}4$ эта максимальная концентрация вследствие незначительности заполняемого объема и избытка цемента достигается раньше. Поэтому очень быстро набираются высокие прочности.

● При $В/Ц > 0{,}4$ в случае полной гидратации (цемент использован полностью) прочность, которая может быть достигнута, будет тем ниже, чем выше значение $В/Ц$.

● Путем повышения температуры твердение цементного камня может быть сильно ускорено, низкие температуры замедляют твердение.

3.3.2. Водонепроницаемость, морозостойкость и морозосолестойкость (сопротивляемость действию противогололедных реагентов). Эти свойства цементного камня определяются плотностью бетона, от которого зависит его водонепроницаемость и малая степень насыщения водой. И здесь концентрация гелевых новообразований дает ключ к пониманию стойкости бетона, но еще больше открывает возможность к пониманию зависимостей для пор, представленных соответственно на рис. 21. Размеры гелевых пор очень незначительны. Поэтому находящаяся в них вода оказывается под большим влиянием поля сил, действующих на поверхности стенок этих пор. Отсюда следует, что вряд ли вода может через них протекать. При обычных температурах замораживания вода в порах также не может замерзать, так как точка ее замерзания зависит от давления пор. Поэтому играют роль только капиллярные поры, которые, правда, достаточно велики, чтобы принимать и пропускать воду. Из рис. 21 следует, что капиллярные поры при завершенной гидратации образуются только при $В/Ц > 0{,}4$. Таким образом, чисто теоретически можно заключить, что всякий цементный камень водонепроницаем и морозостоек, если он образовался из цементного клея со значением $В/Ц \leqslant 0{,}4$. Проведенные опыты, однако, показали, что эти свойства наблюдаются и при более высоком $В/Ц$; таким образом, ограниченное количество капиллярных пор еще безвредно.

Водонепроницаемость бетонного изделия в зависимости от его толщины наблюдается уже при $В/Ц = 0{,}60—0{,}70$. При использовании уплотняющих веществ в отдельных случаях возможны и более высокие значения водоцементного отношения.

Более строгие требования к $В/Ц$ предъявляют морозостойкость и морозосолестойкость — сопротивляемость противоморозным химическим реагентам (обычно неорганическим солям). Рис. 29 показывает, как противогололедные реагенты способствуют разрушению бетона при замораживании. При воздействии мороза,

Рис. 29. Влияние солей, применяемых, против обледенения, на морозостойкость бетона

Слева показан бетон, подвергавшийся около 10 лет кроме мороза действию реагентов. Справа на рисунке показан бетон достаточно морозостойкий, не подвергавшийся действию таких реагентов

без одновременного использования противогололедных реагентов, цементный камень без искусственных воздушных пор при $В/Ц = 0{,}50$ достаточно устойчив. Если использованы воздухововлекающие добавки, допустимо значение $В/Ц = 0{,}6$.

Более низкие значения $В/Ц$ необходимы, если на замерзшие бетонные поверхности нанесены противогололедные реагенты (например хлористый магний). Они хотя и вызывают таяние льда на поверхности бетона, но при этом отнимают необходимое для этого тепло от бетона, который в нижележащих слоях, куда соль не поступает, замерзает еще сильнее («морозный шок»). По этой причине (см. рис. 29) в строительстве бетонных дорог приходится назначать $В/Ц = 0{,}42$ (без воздухововлекающих добавок) или $В/Ц = 0{,}45$ (с воздухововлекающими добавками).

Суммируя сказанное, следует отметить, что

Водонепроницаемость и морозостойкость бетона снижаются с повышением $В/Ц$, поэтому необходимо учитывать верхние пределы $В/Ц$.

При введении добавок $В/Ц$ можно повышать.

3.3.3. Сопротивляемость химически вредным веществам. Вещества, оказывающие любое действие на бетон, попадают в поровую систему цементного камня главным образом в растворенном виде с водой — с агрессивными грунтовыми и поверхностными водами или с выпадающими осадками. Структура цементного камня может разрушаться вследствие увеличения объема продуктов взаимодействия, выщелачивания твердых составляющих или возникновения гелеобразных не связанных друг с другом продуктов.

Наиболее частая причина разрушений — действие сульфатов. Взаимодействие последних с C_3A цемента уже рассматривалось в разд. 3.1. Помимо этого, вредное действие оказывает большое количество кислот и солей, особенно агрессивная углекислота (CO_2), ионы магния и алюминия.

Этот вопрос в настоящей работе мы не можем рассмотреть очень подробно. Как уже указывалось в предыдущем разделе, в данном случае одним из основных условий возникновения коррозии является то, что агрессивная жидкая среда проникает в цементный камень до того, как она начнет свое разрушающее действие. С увеличением плотности цементного камня уменьшается проникание агрессивной среды.

Вторым условием может быть меньшее содержание в цементном камне веществ, с которыми реагирует агрессивная жидкая среда. Поэтому, например, при сульфатной коррозии выбирают цемент, содержащий по возможности минимальное количество C_3A.

Значение $В/Ц$, при котором обеспечивается стойкость цементного камня к агрессии, зависит от концентрации агрессивных веществ (степень агрессивности воды) и колеблется максимально между 0,45 и 0,65 (см. с. 76).

Цементный камень сопротивляется химически агрессивной жидкой среде тогда, когда он обладает достаточной плотностью вследствие

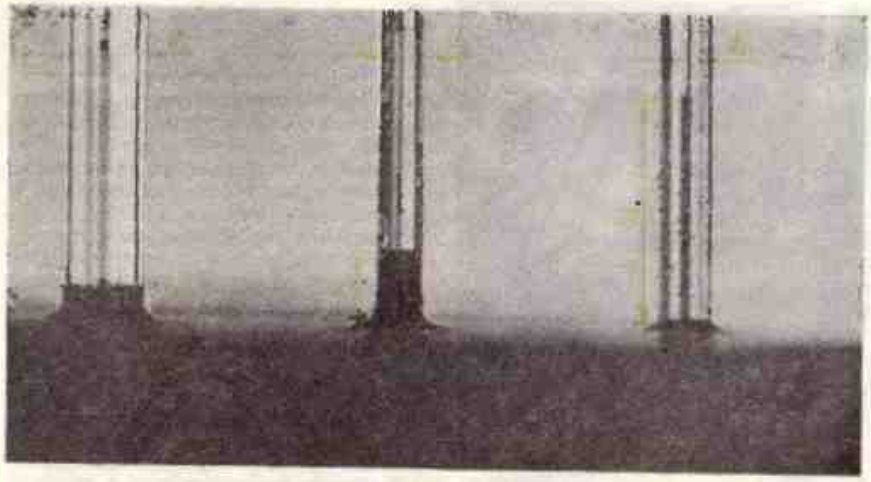


Рис. 30. Действие капиллярных сил (на примере стеклянных трубочек различного диаметра)

низкого значения В/Ц и содержит минимальное количество того соединения, с которым реагирует агрессивное вещество.

3.3.4. Усадка и ползучесть. Под усадкой понимают изменение объема, вызванное высыханием, а под ползучестью — изменение формы цементного камня, вызванное внешними силами.

И эти свойства цементного камня объясняются его строением.

Усадка. Рис. 30 возвращает вас на урок физики в среднюю школу. В сосуде с водой стоят открытые снизу трубочки различного диаметра. Вода в них поднимается на разную высоту. Для рассматриваемого случая важно подчеркнуть, что здесь действует сила, поддерживающая воду в таком положении. Ее называют капиллярной силой. Она тем больше, чем тоньше капилляры. Этот пример, хотя и в сильно искаженном виде, можно отнести к цементному камню. В результате сухого хранения цементного камня вода уходит из пор, и сила, которая задерживала воду, теперь действует в обратном направлении, — она создает в цементном камне напряжение, вызывающее уменьшение объема.

Для практических целей в строительстве мы измеряем усадку по степени изменения длины (укорочение призмы). Наблюдаемое внутреннее напряжение тем больше, чем меньше поры, из которых ушла вода. Но поскольку при малых порах, т. е. большой концентрации гелевидных составляющих, наблюдается высокая прочность цементного камня, то сопротивление изменению формы будет также велико. Следовательно, не обязательно будет наблюдаться большая усадка. Таким образом, мы видим, что взаимоотношения весьма сложны. На рис. 31 сделана попытка представить эту связь наглядно. Гелевые частицы, изображенные в виде шаров, в насыщенном водой состоянии окружены прочно удерживающейся водной оболочкой. Первоначально удаляется вода, находящаяся в пустотах, и только позже — вода оболочек.

● Высыхание сравнительно большого количества воды пустот в цементном камне с различным *В/Ц* первоначально не вызывает существенного различия в усадке. Окруженные водной оболочкой гелевые составляющие несколько сближаются, но, в сущности, остаются в том же положении. Поэтому после 28 сут твердения размер

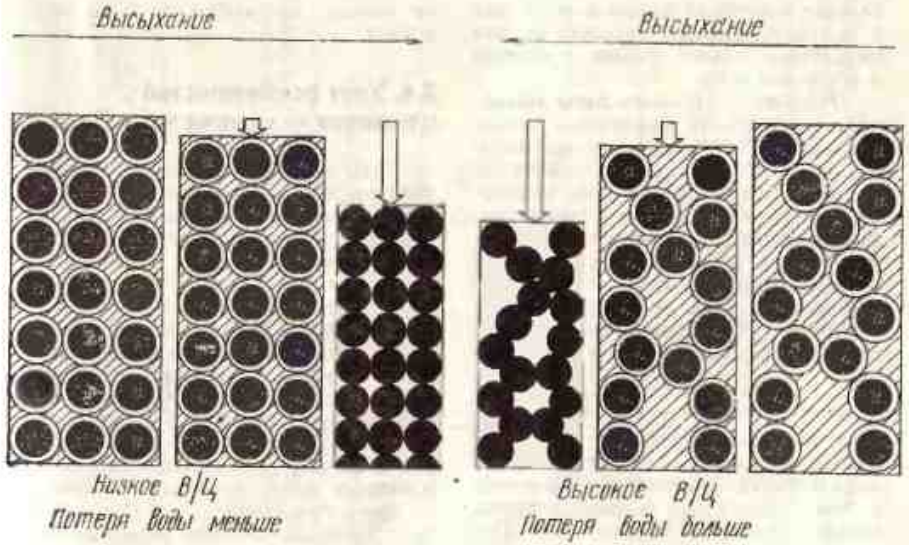


Рис. 31. Схематическое изображение усадки

усадки при различных значениях *В/Ц*, несмотря на сильно различающуюся потерю воды, все же почти одинаков.

● Только после высыхания водных пленок наступает при высоких *В/Ц* более сильная усадка, так как менее плотно расположенные гелевые частички могут сильно уплотниться, что при низком *В/Ц* из-за исходной высокой плотности уже невозможно. Поэтому при более длительном хранении цементного камня с более высоким *В/Ц* обнаруживается значительная усадка.

Это схематическое объяснение подтверждается результатами измерения усадки у цементного камня с различным *В/Ц* на рис. 32. На усадку, кроме того, влияют:

● минеральный состав цемента (высокое содержание C_3S приводит к малой усадке, а высокое содержание C_3A к более сильной);

● тонина помола цемента (тонкомолотый цемент даст более сильную усадку, чем грубомолотый);

● карбонатизация, (превращение $Ca(OH)_2$ цементного камня в результате соединения с CO_2 воздуха в $CaCO_3$);

● Внешние климатические воздействия (чем суше и теплее климат, тем больше усадка).

Важно знать, что усадка может снизиться при попадании влаги в цементный камень. Первоначальный объем цементного камня, однако, при этом набухании не достигается. Размеры усадки выражают как относи-

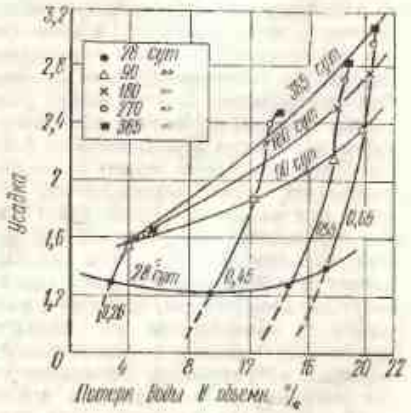


Рис. 32. Усадка цементного камня в зависимости от потери воды и возраста при *В/Ц*, равном 0,26; 0,45; 0,55; 0,65

тельное изменение длины в мм/м или в %. Максимальное значение ее для цементного камня равно примерно 4 мм/м или 0,4%.

Ползучесть. Намного легче объясняется ползучесть цементного камня, так как здесь существует однозначная связь. Соответственно цементный камень деформируется тем меньше, чем выше концентрация гелевых новообразований, т. е. чем он прочнее. Естественно, мера ползучести зависит и от прилагаемого извне усилия. При этом играют роль те же факторы, с которыми мы встречались при рассмотрении прочности цементного камня.

Усадка и ползучесть зависят от множества факторов, например от вида цемента, значения *В/Ц*, климата и действующих сил, влияние которых может быть противоположным. Поскольку здесь мы касаемся специальных проблем, то неясные практические вопросы следует разрешать экспериментально в лабораторных условиях.

3.3.5. Тепловыделение твердеющего цементного камня. Известно, что в результате гидратации выделяется тепло (см. разд. 3.1), количество которого зависит от характеристики минералов клинкера. Вследствие этого неизбежного явления твердеющий цемент и изготовленный из него бетон нагреваются. Повышение температуры тем значительнее, чем крупнее бетонное изделие. В этом может убедиться каждый строитель при распалубке массивных фундаментных блоков. Тепловыделение может быть желательным, когда бетонирование ведется при низких температурах (зимнее строительство). Большей же частью оно нежелательно, так как вызывает в твердеющем бетоне температурные напряжения, ведущие к разрывам. В зависимости от области применения можно в определенных границах регулировать тепловыделение направленным подбором минерального состава клинкера. Для предупреждения разрывов на стройке обычно принимают специальные конструктивные и технологические решения, на которых в данной книге мы не имеем возможности останавливаться.

3.4. Учет особенностей цементов — основа их выбора

Виды цементов, их важнейшие характеристики, на основании которых решают вопрос о применении цементов, представлены в табл. 6, а некоторые (далеко не все!) области их использования — в табл. 7.

Прочность бетона — главное требование, которое предъявляется к качеству бетона. Высокому классу прочности бетона соответствуют и высокие прочностные характеристики цементов (см. табл. 1 и 2). Такая же зависимость характерна и для бетонов с низкой прочностью. Поскольку прочность цементного камня зависит от прочности цемента и *В/Ц*, существует большая область варьирования этими факторами, которая может быть сужена (см. разд. 4.4 и 4.5). Однако, как видно из рис. 27, высокомарочный цемент целесообразно применять преимущественно там, где требуется достичь высокой прочности в короткий срок.

Цемент с высокой прочностью характеризуется значительным содержанием C_3S и высокой тонкой помола. В результате бурно протекающей гидратации происходит большое выделение тепла. По этой причине массивные бетонные конструкции следует изготовлять из шлакопортландцемента, даже в тех условиях, когда трудно получить требуемую прочность. Для дорог большой протяженности и т. д. предпочтительнее использовать цементы с малой усадкой. Это обычно (не всегда!) цементы, для которых в стандарте указаны верхние границы усадки (PZ2 и PZ3). Применение ZZ4 невозможно, так как в дорожном строительстве предъявляются высокие требования к прочности. Если ожидается действие сульфатов, выбирают цементы, бедные C_3A. Естественно, что бетонный комбинат, на котором бетон подвергается тепловлажностной обработке, будет применять цемент, пригодный для тепловлажностной обработки (особенно специально изготовленный для этой цели PZ 4/450). Эти соображения привели к тому, что были раз-

Таблица 6. Наиболее важные характеристики цементов

	Портландцемент										Шлакопортландцемент				Пуццолановый цемент ZZ8/275
	PZ1 375	PZ1 425	PZ1 475	PZ2 325	PZ2 375	PZ3 375	PZ4 450	PZ7 375	PZ8 375	ZZ1 275	ZZ2 275	ZZ3 275	ZZ4 275	
Максимальное содержание, % добавок	Без молотых добавок							20		20—40		40—80	55—80	30—60
C_3A	Требования отсутствуют				3	8	Требования отсутствуют			Требования отсутствуют			6	Требования отсутствуют
Предел прочности при сжатии, МПа, спустя 1 сут	Требования отсутствуют		15,5	Требования отсутствуют			30	Требования отсутствуют		Требования отсутствуют				
3 сут	17,5	22,5	Требования отсутствуют	15	17,5		Требования отсутствуют	17,5		То же				
7 сут	Требования отсутствуют									12,5				
28 сут	37,5	42,5	47,5	32,5	37,5	37,5	45	37,5	37,5	27,5				
Способность к тепловой обработке	Да						Нет			Да			Нет	Да
Усадка, мм/м	Требования отсутствуют		0,8				Требования отсутствуют			Требования отсутствуют			0,8	Требования отсутствуют

Таблица 7. Области использования цементов

Область использования	Портландцемент									Шлакопортландцемент				Пуццолановый цемент ZZ 8/275
	PZ1 375	PZ1 425	PZ1 475	PZ2 325	PZ2 375	PZ3 375	PZ4 450	PZ7 375	PZ8 375	ZZ 1 275	ZZ 2 275	ZZ 3 275	ZZ 4 275	
Бетоны высоких прочностных классов (B 600, B 450, B 300)	×	×	×	×	×	×	×	×	×					
Бетоны средних прочностных классов (B 160, B 225)	×			×	×	×		×	×	×	×	×	×	×
Бетоны низких прочностных классов (B 120, B 80, B 50)														
Массивные бетонные изделия с прочностью: высокой				(×)	(×)	(×)								
низкой										×	×	×	×	×
Бетоны с малой усадкой				×	×	×				×	×	×	×	
Бетоны, которые будут подвержены действию сульфатов				×	×	×							×	

работаны указания TGL 28101/01 (портландцементы) и TGL 28101/02 (цементы с добавками при помоле).

Поскольку цемент влияет на бетон и своим качеством и своим количеством, данные здесь рекомендации не могут быть исчерпывающими, и их следует дополнить выводами, приведенными в разд. 4.

Цементный клей + заполнитель = бетон

4

Бетон — конгломератный строительный материал, который в свежеприготовленном состоянии представляет собой смесь из цементного клея (цемент и вода) и заполнителей. Цементный клей в процессе твердения превращается в цементный камень.

4.1. Функции цементного клея и заполнителей

Цементный клей, а также цементный камень выполняют функции клеящего вещества, т. е. скрепляют компоненты, называемые заполнителями.

Чтобы существовала связь между рыхло упакованными зернами заполнителя (рис. 33,*д*), цементным клеем должна быть покрыта не только поверхность всех зерен (см. рис. 33,*б*), но и заполнены оставшиеся пустоты между ними (см. рис. 33,*в*). Тогда бетон будет иметь вид, представленный на рис. 33,*г*. С научных позиций эту взаимосвязь принято рассматривать как принцип Кеннеди, который положен в основу определения вещественного состава бетона. Поэтому понимание принципа Кеннеди существенно важно для практика. Особенно необходимо применить этот принцип к изучению обеих форм бетона: и бетонной смеси, и затвердевшего бетона.

Бетонную смесь (или свежий бетон) после тщательного перемешивания исходных компонентов транспортируют, формуют и уплотняют. Это возможно в том случае, если смесь обладает определенными свойствами, которые обычно описываются понятием «консистенция».

Затвердевший бетон (или просто бетон) должен обнаруживать такие свойства, чтобы возведенное из него сооружение могло выполнять заданные функции в течение длительного срока: быть прочным, водонепроницаемым, устойчивым к климатическим и химическим воздействиям и т. д.

Все свойства бетонной смеси и бетона зависят от природы и количества цементного клея. Отсюда можно было бы сделать вывод, что свойства бетонной смеси и бетона станут тем лучше, чем больше цементного клея содержится в бетонной смеси. Однако это мнение неверно. Поскольку цементный камень имеет пористую структуру, он характеризуется и другими, а не только желаемыми свойствами. Они тем сильнее передаются бетону, чем больше в нем цементного камня. Рассмотрим некоторые свойства, которые необходимо учитывать.

- Цементный камень скрепляет зерна заполнителя, обладающие большей прочностью. Однако это положение действительно только для тяжелого бетона, но не для легкого! Чтобы скрепить зерна камня, согласно *принципу Кеннеди*, требуется определенное положение, при котором обеспечивается их наиплотнейшая упаковка, и прочность бетона несколько снизится.
- Цементный камень в зависимости от *В/Ц* только относительно водонепроницаем. Слишком большое содержание цементного камня в бетоне может в отдельных случаях снижать водонепроницаемость, морозостойкость и химическую сопротивляемость бетона.
- Бетон обнаруживает усадку и ползучесть тем заметнее, чем больше цементного клея он содержит.

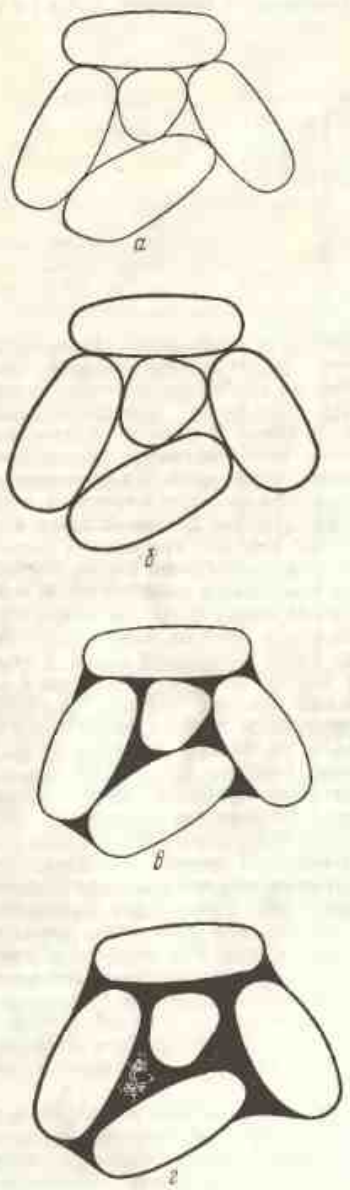


Рис. 33. Цементный клей + заполнитель = бетон

Представлено в соответствии с принципом Конеди:
а — плотно упакованные зерна заполнителя; *б* — поверхности зерен смочены цементным клеем, при условии сохранения контактов; *в* — пустоты между зернами заполнены цементным клеем, что является предпосылкой для получения плотного и прочного бетона; *г* — строение тяжелого бетона как комбинации *а*, *б* и *в**

* Изображение «г» не вполне отражает комбинацию *а*, *б* и *в* (*Прим. перев.*).

● При гидратации цемента выделяется тепло. Бетон в процессе твердения нагревается тем сильнее, чем больше цементного клея он содержит.

● Цементный клей стóит значительно дороже заполнителей. Материальные затраты окажутся тем меньше, чем меньше содержание цементного клея (но при этом должна быть обеспечена хорошая обрабатываемость смеси).

Из этих главных предпосылок вытекают основные положения технологии бетона. Цементный камень необходим для создания прочности, но его избыток сказывается отрицательно. Можно сравнить технологию бетона с дорогой альпиниста в горах. Отклонения от маршрута опасны. Отсюда вытекает основное положение:

технико-экономические показатели бетона тем выше, чем меньше цементного клея ему необходимо для обеспечения заданных характеристик.

4.2. Бетонная смесь, ее свойства и возможность их изменения

Свежезамешенную бетонную смесь различными методами транспортируют, формуют и уплотняют. С учетом особенностей технологии используют соответствующее оборудование, которое может успешно работать только в том случае, если бетонная смесь обладает определенными свойствами. Существует множество терминов для обозначения свойств бетонной смеси: обрабатываемость, уплотняемость, формуемость и т. д. Все эти понятия объединены в одно понятие «консистенция». Разработаны единые пока-

Обозначение	Описание	Рисунок
V_1	Жесткий (сухой)	
V_2	Жесткий до мягкого (слегка влажный)	
V_3	Мягкий (мягкий до пластичного, влажный)	
V_4	Мягкий до жидкого (текучий, мокрый)	
V_5	Жидкий (жидкий)	

Рис. 34. Ступени консистенции бетона по TGL 21—093 (дано описание по TGL 0—1045)

Рис. 35. Плохо уплотненный бетон

Существует противоречие между интенсивностью уплотнения и консистенцией бетонной смеси. Бетонная смесь, уплотнявшаяся по предписанной технологии, была слишком жесткой. Недостаточно покрытая бетоном арматура быстро ржавеет и делает и без того малопрочный бетон менее прочным

1 — бетон хорошо уплотнен, *2* — бетон недостаточно хорошо уплотнен, *3* — недостаточно защищенная арматура

затели определения консистенции* (рис. 34). Методы и результаты измерения определения консистенции изложены в разд. 6.4.

Для конкретных условий транспортирования, формования и уплотнения рекомендуется выбирать определенную консистенцию бетона. В основном консистенция зависит от:

- содержания цементного клея;
- зернового состава заполнителей.

Важность учета этих факторов вытекает из того, что большинство претензий к бетонным сооружениям можно отнести за счет проектирования слишком жестких бетонных смесей, которые либо были недостаточно уплотнены, либо потребовалось увеличить количество воды для достижения необходимой консистенции. Поэтому прежде всего рассмотрим связь между технологией и требуемой консистенцией. Зная эти факторы, практик сможет целенаправленно получать смесь необходимой консистенции.

4.2.1. Технология и требуемая консистенция бетонной смеси. Такие технологические этапы, как транспортирование, формование и уплотнение (последние два практически неразделимы), предъявляют к консистенции бетонной смеси определенные требования. Если консистенция наи-

* В СССР согласно ГОСТ 10181—62 «Бетон тяжелый. Методы определения подвижности и жесткости бетонной смеси» различают подвижные бетонные смеси, которые характеризуются осадкой конуса, выражаемой в см, и жесткие смеси, характеризующиеся продолжительностью уплотнения в сек на техническом вискозиметре (*Примеч. ред.*)

Рис. 36. Расслаивающийся бетон

Существует опять-таки противоречие между интенсивностью уплотнения и консистенцией бетонной смеси: бетонная смесь, уплотнившаяся по предписанной технологии, была слишком пластичной. Текстура бетона неоднородна и свойства бетона (прежде всего прочность, усадка, ползучесть) сильно различаются

менее пластичная (т. е. изменяется в направлении *V*1), то хорошее уплотнение бетона невозможно (рис. 35) или происходит зарастание формующих агрегатов. Предельно высокая пластичность (изменение в направлении *V*5) приводит к разбрызгиванию, и, что еще хуже, к расслоению смеси (рис. 36). При этом чувствительность к колебаниям консистенции у различных технологических схем различна. Так, например, формовочные машины для изготовления бетонных камней и панелей очень чувствительны к консистенции бетонной смеси, а глубинный вибратор перекрывает большой спектр консистенций. Ступени консистенции от *V*1 до *V*5 рекомендуются для следующих технологических схем:

*V*1 — бетонная смесь этой консистенции используется только на бетонных заводах с интенсивно действующими вибрационными устройствами (обычно вибростолы), когда арматуры в изготавливаемых изделиях немного;

*V*2 — смесь этой консистенции применяется на бетонных заводах, а также на стройках с массивными изделиями, которые содержат небольшое количество арматуры, в качестве уплотнителей используются вибраторы и трамбовки;

*V*3 — бетонная смесь этой консистенции встречается на стройках наиболее часто. При этом можно укладывать изделия небольших размеров с грубым армированием. При слишком длительном вибрировании здесь может наступать расслоение. Уплотняют смесь также штампованием и трамбованием;

*V*4 — бетонную смесь этой консистенции применяют только в тех случаях, когда уплотнение затруднено (труднодоступные участки). Бетонная смесь этой консистенции укладывается без вибрирования или с кратким вибрированием. Крупные составляющие заполнителей седиментируют (см. рис. 36);

*V*5 — бетонная смесь этой консистенции требует очень незначительного уплотнения или вообще не требует его. Применение интенсивно действующих разжижителей сильно увеличило область применения смеси этой консистенции. Против явления расслаивания можно бороться применением более мелкозернистых заполнителей.

К транспортированию бетонной смеси также предъявляется ряд важных требований. Например, ленточные транспортеры следует применять только для бетонных смесей со ступенями консистенции *V*1 и *V*2. Транспортирование по трубам (гидравлическим способом или пневмотранспортом) годится для консистенции *V*3 и *V*4. Особенно сложна перевозка смеси автотранспортом. Здесь применяемые консистенции смеси зависят от типа машины, времени транспортирования и температуры.

Требования к консистенции бетонной смеси могут быть сформулированы следующим образом:

- состав бетонной смеси следует проектировать с учетом не только

требований, предъявляемых к свойствам бетона, но и технологических условий ее транспортирования и обработки.

4.2.2. Влияние цементного клея на консистенцию бетонной смеси. Влияние цементного клея обусловлено его ролью «смазки» зерен заполнителя. Предположим, что зерновой состав постоянен. Тогда бетонная смесь будет тем подвижнее, чем выше содержание в ней цементного клея. Консистенция, таким образом, с увеличением количества цементного клея будет изменяться в направлении $V1 \rightarrow V5$. Это изменение очень четко показано на рис. 37.

Способность цементного клея создавать смазку, однако, зависит еще и от соотношения его составляющих — воды и цемента, т. е. от значения *В/Ц*. Определенное количество цементного клея обладает при более высоком значении *В/Ц* (из-за большего содержания воды) более сильным разжижающим действием. Приводимые ниже данные (разд. 4.2.5), однако, покажут, что консистенция смеси может быть представлена в виде зависимости только от одного водосодержания.

4.2.3. Зерновой состав заполнителей в бетоне и его значение для консистенции бетонной смеси. После того как мы выявили влияние цементного клея на консистенцию бетонной смеси, интересно уточнить, какую роль играет зерновой состав заполнителя. И здесь можно сделать выводы на основе данных (изложенных в начале раздела) о зерновом составе заполнителя, который может быть определен линией просеивания и выведенным из нее *К*-числом. Зерновой состав песчано-гравийных смесей может существенно колебаться в пределах одного месторождения и тем более различных месторождений. Это особенно проявляется во фракциях отдельных зерновых классов. Говорят о крупнозернистых или мелкозернистых песках или гравийно-песчаных смесях (см. разд. 2.3). Изменение зернового состава оказывает решающее влияние на общую площадь поверхности всех песчаных и гравийных зерен определенного количества заполнителя. Если это не совсем убеди-

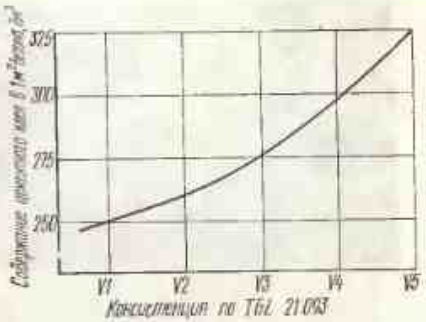


Рис. 37. Зависимость между консистенцией и содержанием цементного клея в бетонной смеси (предпосылка — одинаковый состав заполнителей)

тельно, то поясним нашу мысль следующим примером.

Возьмем кубик со стороной ребра 10 см. Площадь его составляет 600 см². Если из этого кубика изготовить (без потерь на разрезание) 8 кубиков с размером ребра 5 см, то размер общей поверхности удвоится. При многократном повторении этой операции удается выявить взаимосвязь между длиной ребра и общей поверхностью (рис. 38).

Наукой о бетоне установлен оптимальный зерновой состав, который графически представлен областями, ограниченными линиями просеивания. Они составлены для заполнителей с наибольшими зернами. На рис. 39—41 показаны эти линии для максимальных размеров 8, 16 и 63 мм соответственно. Наиболее часто применяемая в строительстве смесь с максимальным размером 31,5 мм рассмотрена более подробно на рис. 42, чтобы можно было непосредственно найти составы зерновой смеси и линии просеивания. На примере связи между размером зерна и площадью поверхности (см. рис. 38) видно, что эти линии просеивания имеют сильно отличающиеся суммарные площади поверхности. Кроме того, они свидетельствуют о различном объеме пустот.

Теперь вернемся к рис. 33, к принципу Кеннеди. Совершенно ясно, что количество цементного клея, необходимое для смачивания зерен и запол-

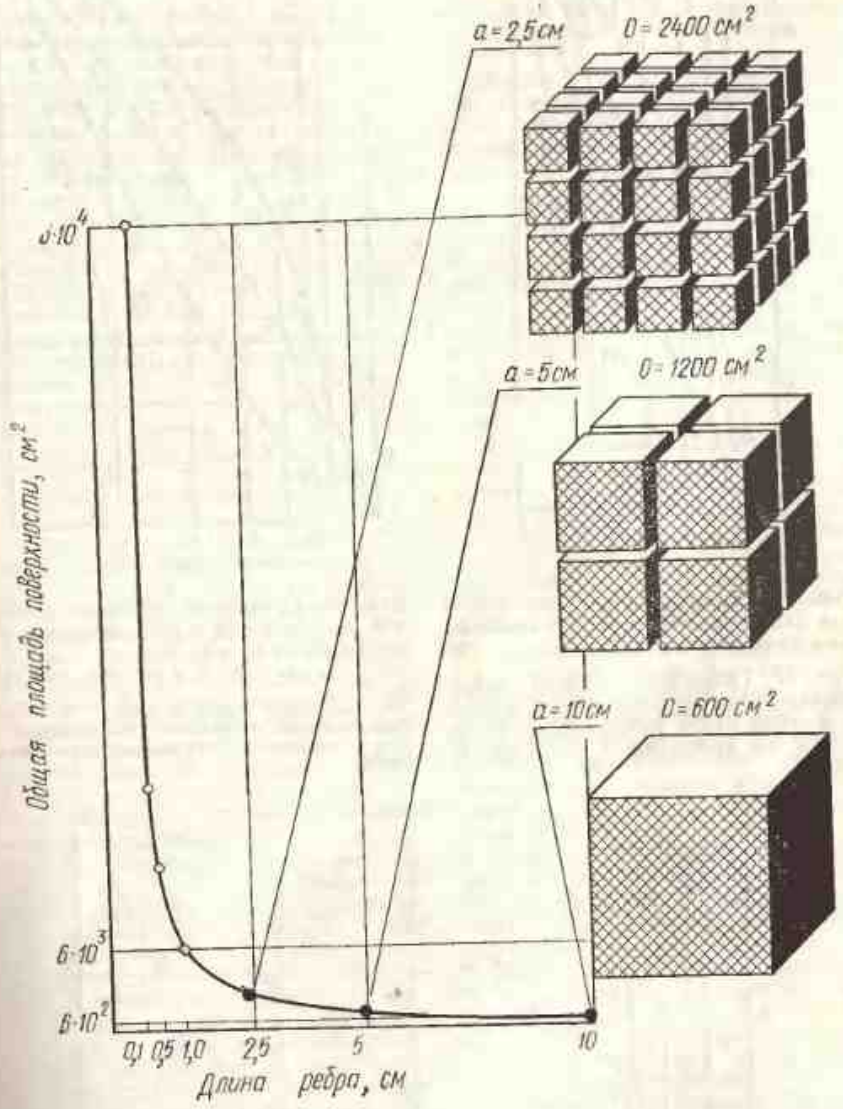


Рис. 38. Зависимость длины ребра кубика постоянного объема от общей площади поверхности (как аналогия с заполнителями различного зернового состава)

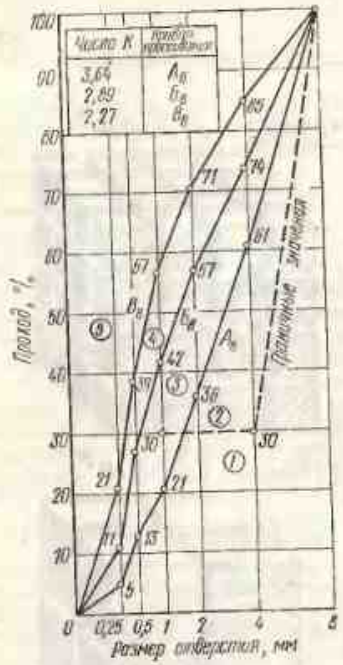


Рис. 39. Граничные ситовые линии для заполнителей бетона с наибольшим размером зерна 8 мм

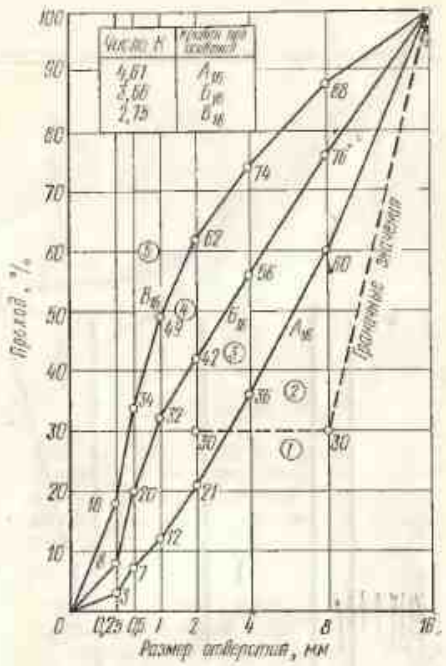
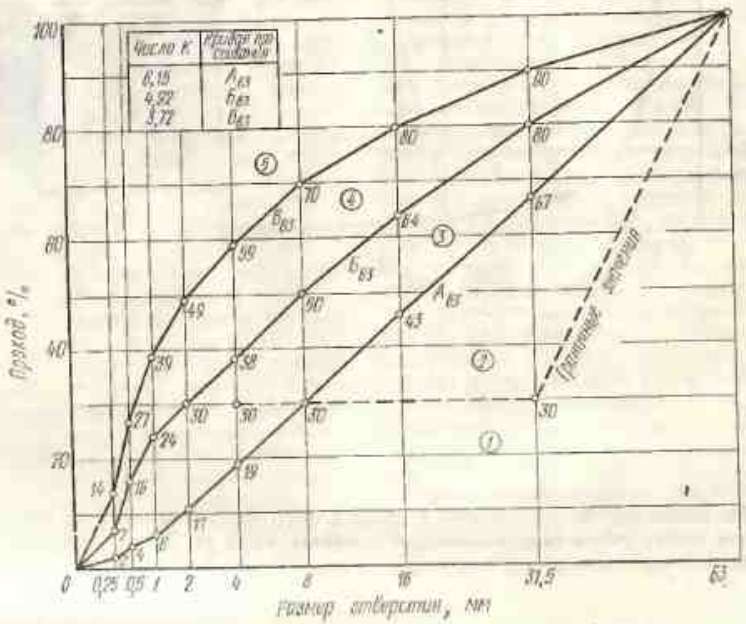


Рис. 40. Граничные ситовые линии для заполнителей с наибольшим размером зерна 16 мм

Числа на рис. 39—42 в кружках обозначают:

1 — непригоден: слишком грубый; *2* — благоприятен как исключение; *3* — благоприятен; *4* — пригоден; *5* — непригоден: слишком мелок

Рис. 41. Граничные ситовые линии заполнителей с наибольшим размером зерна 63 мм (обозначения те же, что и на предыдущих двух рисунках)



нения объема пустот, очень сильно зависит от зернового состава заполнителей. В благоприятной области между линиями просеивания *А* и *Б* (см. рис. 39—42) расположены оптимальные значения площади поверхности зерен заполнителя и объема пустот. Потребность в цементном клее остается в допустимых границах. В допустимой области, между *Б* и *В*, и объем пустот и удельная площадь поверхности выше; потребность в цементном клее соответственно увеличивается. Зерновые составы, находящиеся выше линии *В*, мелкозернисты. При таких составах и соответственно повышенном расходе цементного клея, хотя и можно достичь достаточного уплотнения, бетон обходится слишком дорого. Кроме того, ухудшается ряд его технических свойств, например, усадка и ползучесть увеличиваются.

Зерновые составы, лежащие в области ниже линии просеивания *А*, слишком грубы. Из-за очень малой поверхности зерен они дают слабое связывание и склонны к расслоению. Чтобы иллюстрировать сказанное, рассмотрим рис. 43, на котором представлены результаты опыта по определению количества цементного клея в условиях зернового состава $Б_{32}$ и консистенции *V3* (середина). Если смешать то же самое количество цементного клея с зерновым составом, характеризующимся линией просеивания $А_{32}$ (наверху справа) и $В_{32}$ (наверху слева), то получатся смеси с весьма различной консистенцией. Та же тенденция обнаруживается, если при сравнимых зерновых составах исключить самую крупную фракцию. При меньшем размере крупного зерна смесь из крупных зерен заполнителя становится идентичной широкому спектру более мелких зерен, которые требуют для склеивания дополнительного количества цементного клея. И этот пример иллюстрируется тем же рисунком. Итак, суммируя все сказанное, можно сделать вывод.

Количество цементного клея, необходимое для получения требуемой консистенции, определяется зерновым составом заполнителя и верхней границей крупности зерна. Оно увеличивается с уменьшением размера зерен (тенденция от *А* к *В*, или уменьшение числа *К*) и с уменьшением предельно большого размера зерна.

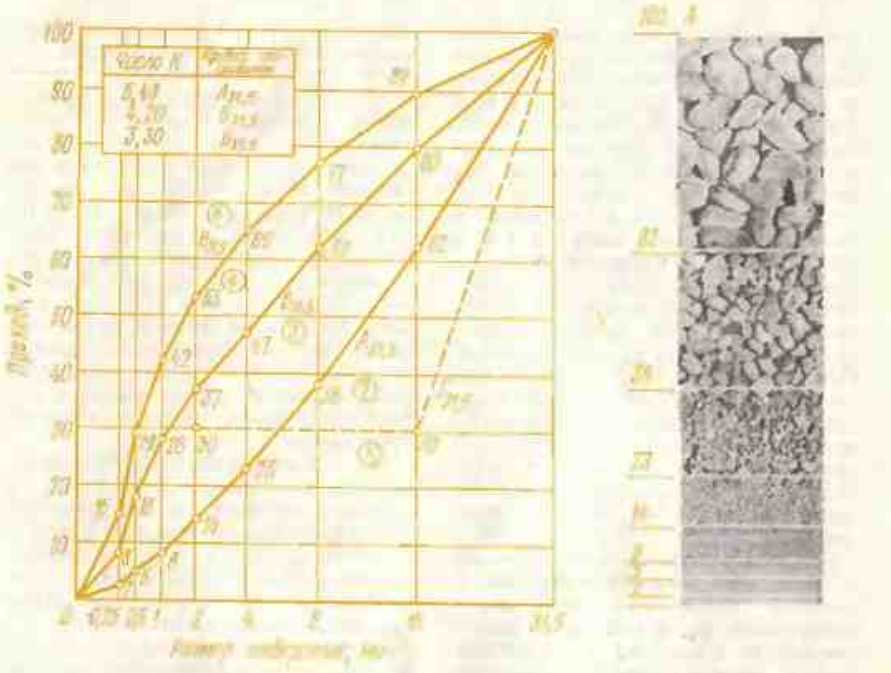
Добываемый из песчано-гравийных месторождений гравийный песок очень редко отвечает граничным областям. При этом благоприятная или применимая область (см. рис. 39—42) не столь узка, как можно было бы себе представить из рис. 42. Преобладает богатый песком гравий, например, такой, для которого установлены кривая просева и *К*-число (см. разд. 2.3). Таким образом, путем введения других заполнителей можно исправить состав такого гравийного песка и сделать его применимым или благоприятным в пределах областей просеивания.

4.2.4. Улучшение зернового состава. Для получения заполнителя, у которого зерновой состав отвечает линии просеивания, лежащей в благоприятной области, т. е. между граничными ситовыми линиями *А* и *Б* или, по крайней мере, в применимой области между граничными линиями *Б* и *В*, используют три метода:

- гравийный песок и щебень подвергают классификации на возможно большое число фракций; затем из них составляют смесь заполнителей. Этот метод очень трудоемок и применяется только для получения бетонов очень высокой прочности или, если это требуется, для очень «чувствительной» технологии;
- смешивают гравийный песок наибольшей и наименьшей крупности. Этот прием не нашел широкого распространения из-за того, что песчано-гравийные смеси слишком мелки;
- смешивают песчано-гравийную смесь, которая рассматривается как основное составляющее, с определенной группой крупных зерен, чаще всего щебнем (так как у гравия крупные составляющие редки).

В смесях, приготовленных по первым двум методам, представлены зерна всех классов. Это можно установить по линии просеивания, которая поднимается во всех областях (постоянная линия просеивания). При использовании третьего метода вполне возможно, что смешивают песок фракции 0—2 со щебнем фракции 16—32, т. е. в заполнителе нет зерен крупностью от 2 до 16 мм.

В подобном случае линия просеи-



24	38	14
24	27	23

Рис. 42. Граничные линии просеивания для заполнителей с наибольшим размером зерна 32 мм

Представлено на примере классифицированных и неклассифицированных зерновых смесей

Приближенные значения площади поверхности и объема пустот указывают на требуемое количество цементного клея (принцип Кеннеди). Значение чисел в различных областях см. на рис. 39

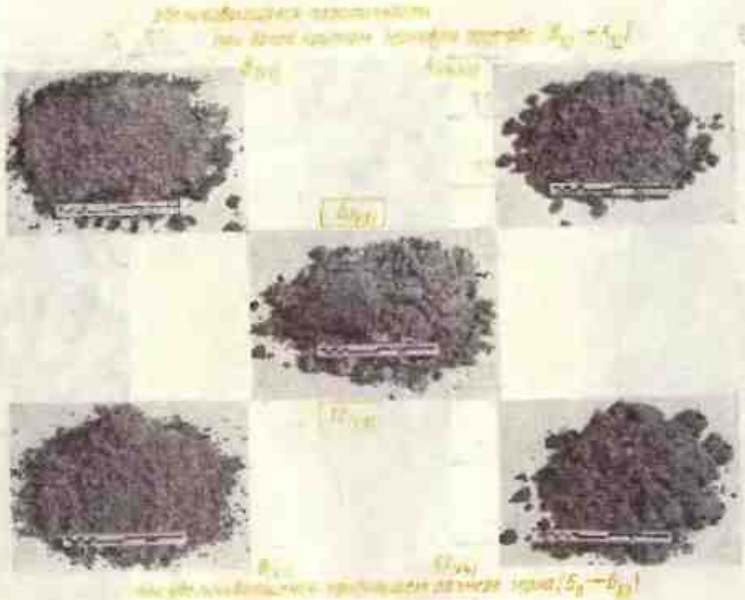


Рис. 43. Влияние зернового состава (граничные сита *а*, *б* и *в*) и наибольшего зерна (8; 32; 63 мм) на консистенцию бетона при равном количестве цементного клея

вания смеси в области 2—16 мм идет горизонтально и ее обозначают как непредставительную, а соответствующую смесь — как «выпадающую». Подобные смеси равнозначны обычным, но могут давать существенное экономическое преимущество. Они требуют при своем применении большего практического опыта. Области применения данных смесей также обозначены на рис. 39—42.

Бетоносмесительные установки могут использоваться с учетом этих трех методов; при этом предусматривается раздельное хранение отдельных фракций заполнителя, которые должны быть расположены так, чтобы все виды материала непосредственно могли доставляться к дозировочным и смесительным устройствам. Теперь возникает вопрос: сколько требуется каждой зерновой разновидности? Эта задача решается так же, как в физике и химии при наличии жидкости различной температуры или концентрации для получения смеси с определенной температурой или концентрацией. Этот расчет можно перенять, если необходимый зерновой состав определяется с помощью числа *K*.

Например, имеется песчано-гравийная смесь и щебень и известны числа *K* (см. раздел 2.3): определяются щебень K_x, гравийно-песчаная смесь K_y. Благоприятное для бетона значение *K*-числа обозначим как желательную величину $K_{жел}$. Количество щебня рассчитывают по формуле

$$X = \frac{K_{жел} - K_y}{K_x - K_y}.$$

Чтобы не иметь затруднений со знаками, обозначают крупную смесь через *x*, а мелкую через *y*. Количество песчано-гравийной смеси равно:

$$y = 1 - X.$$

При работе с заполнителями, представляющими собой зерна трех разных размеров, с *K*-числами K_x, K_y и *K*, действительны уравнения:

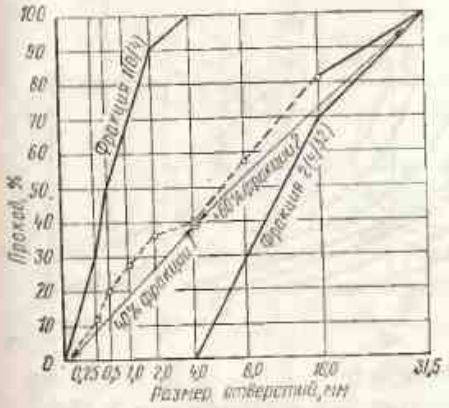


Рис. 44. Система улучшения кривой просеивания методом частичных добавок

$$Z = Z_0 \text{ (оценивается и задается)}$$

$$X = \frac{K_{жел} - K_y(1 - Z_0) - K_z Z_0}{K_x - K_y};$$

$$Y = 1 - (X + Z_0).$$

В разд. 4.6.3 приведен пример расчета. Эти формулы применимы, если установлено, что заполнитель содержит мелкую фракцию (1—2 мм) постоянного состава.

Некоторые практики предпочитают другой метод определения составляющих компонентов заполнителя, пользуясь оценкой и результатами экспериментов. Опытный практик при этом работает удивительно быстро. Покажем это на примере. Зерновой состав заполнителя (*1* и *2*) представлен на рис. 44. Выберем часть материала (например 40%), умножим на значение всех ординат (полные проходы) и полученные данные нанесем на рис. 44. Эта часть материала должна быть возможно более близкой к требуемой линии просеивания. Аналогично поступают и с материалом 2, но ординаты наносят с конца ординаты графика для материала. При желании по такой схеме можно смешивать и большее количество материалов. Практически полученные результаты сводят в таблицу (см. пример в разд. 5.3, табл. 1). Естественно, что эту методику можно обосновать теоретически, опираясь на законы геометрии.

4.2.5. Водосодержание бетонной смеси. Ряд исследователей и практиков сводят взаимосвязь консистенция — цементный клей только к содержанию воды и рассматривают количество цемента как граничное условие. Это упрощает теоретические

Таблица 8. Водопотребность 1 м³ бетона в зависимости от требуемой консистенции и данного зернового состава

Область консистенции	Степень уплотнения	$А_8$	$Б_8$	$В_8$	$А_{16}$	$Б_{16}$	$В_{16}$	$А_{31,5}$	$Б_{31,5}$	$В_{31,5}$	$А_{63}$	$Б_{63}$	$В_{63}$
1	1,41	160	178	147	139	160	183	133	152	171	123	139	163
2	1,28	166	184	205	145	166	189	137	158	177	127	145	169
3	1,18	176	194	217	155	176	200	145	167	188	135	155	180
4	1,09	192	212	235	170	192	217	159	181	207	148	170	197
5	1,03	204	227	250	181	204	232	171	197	223	159	184	211
K-значение		3,64	2,89	2,27	4,61	3,66	2,75	5,48	4,20	3,30	6,15	9,92	37

Примечание 1. При использовании щебня с крупностью зерен 8 мм водопотребность бетона повышается приблизительно на 5%, а щебня с крупностью зерен 4 мм — на 7—10%.

Примечание 2. При содержании измельченных материалов (цемент + добавки 0-0,25) выше 350 кг/м³ водопотребность увеличивается для каждых 10 кг/м³ на 1 л/м³.

Примечание 3. В бетоне искусственными воздушными порами (свыше 1,5%) на каждый 1% содержания пор количество воды можно уменьшить примерно на 5 л/м³.

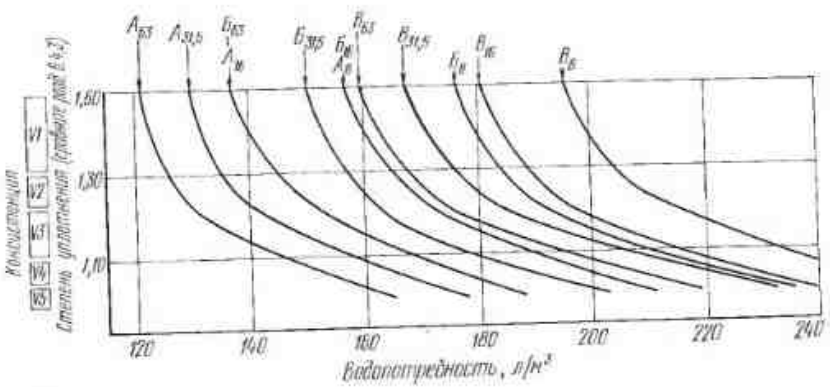


Рис. 45. Взаимосвязь между консистенцией и водопотребностью в зависимости от линий просеивания и ограничений крупности заполнителя

обобщения и приводит к достаточно удовлетворительным решениям. Таким путем можно в зависимости от зернового состава заполнителей и требуемой консистенции бетонной смеси, пользуясь данными табл. 8 или рис. 45, определить водосодержание 1 м³ бетона. При этом необходимо учитывать случаи корректировки, приведенные в табл. 8. Введение пластификаторов изменяет картину настолько, что необходимая консистенция достигается с меньшим водосодержанием, т. е. семейство кривых на рис. 45 сдвигается влево. Из-за различного механизма влияния этих веществ, однако, не удается достаточно точно указать корректирующие величины.

4.2.6. Заключение. Граничные линии просеивания и требования хорошего зернового состава заполнителей часто рассматриваются как догма, так как это требование сформулировано и в книгах, и в стандартах. Из принципа Кеннеди следует, что целесообразность возможно меньшего содержания в бетоне цементного клея требует поиска таких заполнителей, которые отличаются малыми площадями поверхности и малым объемом пустот. Эти правила можно было бы нарушить, но не следует забывать о последствиях. Если, например, использовать смесь заполнителей, линия просеивания которой лежит выше линии *В* в области 5 (см. рис. 39—42), то из нее можно изготовить бетон, но только с высоким содержанием цементного клея вследствие большой площади поверхности, так что бетон будет стоить очень дорого и ему будут присущи все технические недостатки, приведенные в разд. 4.4. При заполнителях с зерновым составом ниже граничной ситовой линии *А* (область *1*) увеличивающийся объем пустот действует подобным же образом. Кроме того, эти зерновые составы очень склонны к расслоению. Поэтому нормы и правила запрещают применение таких смесей заполнителей. На практике трудно находить пригодные природные смеси: особенно песчано-гравийные смеси в северных районах ГДР обнаруживают недостаток крупных составляющих. Поэтому приходится щебень из южных районов транспортировать на большие расстояния. И здесь хороший зерновой состав не догма, а необходимое требование, реализуемое путем сравнения технико-экономических показателей.

4.3. Бетон, его прочность и возможность влияния на нее

Прочность затвердевшего бетона зависит от:

- прочности цементного камня,
- прочности сцепления цементного камня с заполнителем.

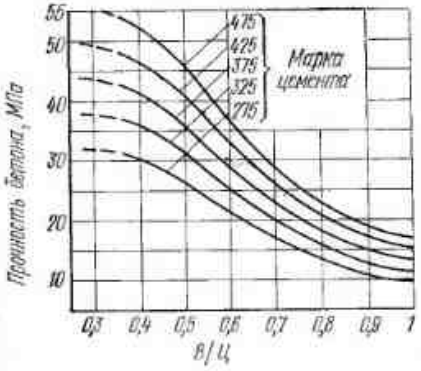


Рис. 46. Зависимость (по Вальцу) между *В/Ц*, стандартной прочностью цемента и прочностью бетона

Оба фактора, однако, можно свести к понятию концентрации гелевидных составляющих, которая была подробно рассмотрена в разд. 3. Концентрация гелевидных составляющих зависит от степени гидратации (другими словами, от возраста), значения *В/Ц* и марки прочности цемента. Если мы установим степень гидратации постоянной (т. е. при всех дальнейших рассмотрениях примем возраст и температуру соответственно равными 28 сут и 20° С), то прочность бетона можно рассматривать зависящей только от качества цемента и значения *В/Ц* (рис. 46). Дополним еще, что данные о прочности цемента всегда принимаются для *В/Ц* = 0,5. Тогда ясно, что при постоянной прочности цемента (например, PZ 375) можно в зависимости от *В/Ц* получать различную прочность бетона. При этом прочность цемента закономерно отвечает прочности бетона, если значение *В/Ц* в рецептуре бетона равно 0,5. Естественно, что бетонная смесь при этом должна быть практически полностью уплотнена. Это требование считается выполненным, когда остаточное содержание пор в свежем бетоне, зависящее от концентрации, составляет не более 1—3%.

Отсюда следует вывод:

прочность бетона при практически полном уплотнении, одинаковом возрасте и одинаковой температуре зависит только от марки прочности цемента и значения *В/Ц*. Количество цементного камня и заполнителя играет лишь второстепенную роль.

Диаграмма на рис. 46 выражает одну из главных закономерностей технологии бетона и служит в разд. 5 основой проектирования бетона.

Влияние формы зерен заполнителей на прочность бетона (круглое зерно гравийно-песчаного месторождения или угловатое зерно щебня, полученного искусственным дроблением) мы до сих пор не рассматривали. Несомненно, такое влияние существует, и мы можем проследить его на примере опыта по сжатию бетонного образца. После того как достигнут предел прочности при непрерывном нагружении образца, можно наблюдать типичное разрушение в виде отслоения боковин (рис. 47).

Характер разрушения делается понятным, если рассмотреть основные линии напряжения, возникающие в кубике (рис. 48). Горизонтальная составляющая напряжений, действующая на краевых плоскостях кубика, вызывает разрушение, обусловленное напряжением растяжения и среза. Подвергаемый давлению кубик разрушается от растяжения и среза. Это представляется парадоксом!

На возникающих плоскостях разрушения можно хорошо наблюдать влияние различной формы зерна. При наличии почти круглых зерен разрушение происходит преимущественно по площади контакта между зерном и цементным камнем, при шероховатых зернах щебня излом наблюдается чаще по зерну (рис. 49). Это явление можно объяснить тем, что связь между цементным камнем и зерном щебня вследствие большей шероховатости поверхности и лучшей сцепляемости при растяжении и срезе намного устойчивее, чем у цементного камня и зерна гравия, т. е. дробленый материал оказывается способным повышать прочность бетона. Противоположная тенденция наблюдается при увеличении водопотребности, но при той же консистенции смеси. Следовало бы применять дробленый материал только размером 4 или 8 мм. Дробленый песок, у которого пло-

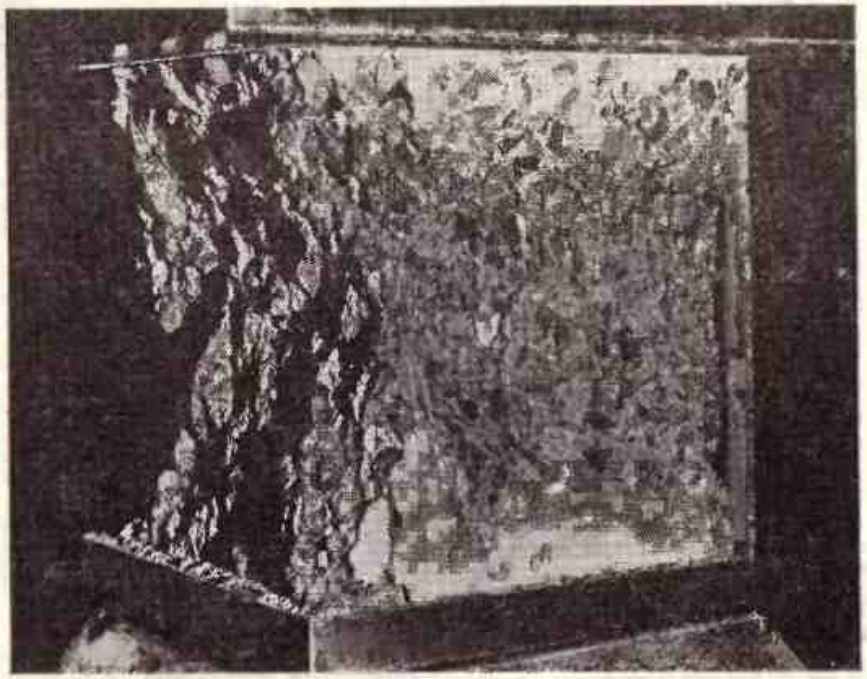
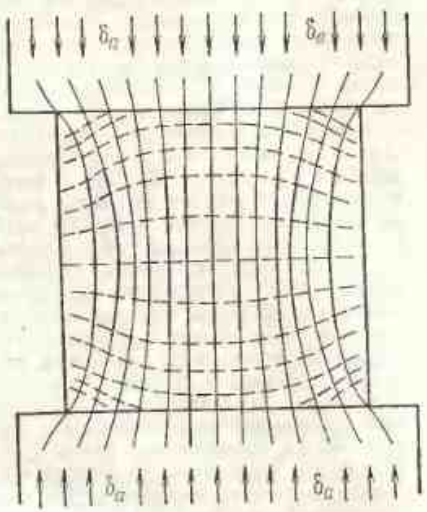


Рис. 47. Характер разрушения бетонного кубика при сжатии



щадь поверхности зерен почти на 40% больше, чем у природного песка, не рекомендуется применять, так как из-за этого сильно возрастает потребность в цементном клее.

Порода заполнителя может также существенно влиять на его сцепление с цементным камнем за счет реакций, протекающих на контакте между поверхностью породы и цементного камня. Известно особо хорошее сцепление цементного камня с известняком.

Из-за многообразия факторов, влияющих на прочность бетона, нецелесообразно корректировать зависимости, представленные на рис. 46. Характер этого влияния будет рассмотрен в разд. 5.2 и 6.4.1.

Рис. 48. Характер распределения напряжений при сжатии бетонного кубика (сплошные линии — сжатие, пунктирные линии — растяжение)

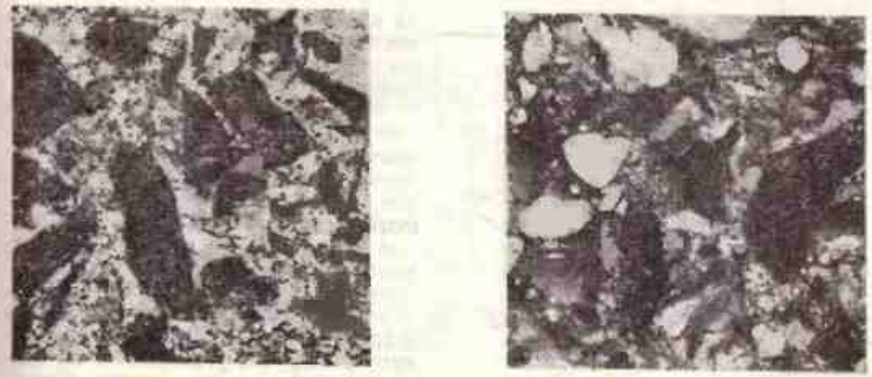


Рис. 49. Сечение разрушенного бетонного кубика (заполнители отвечают граничной линии просева $Б_{32}$); крупные фракции: слева — гравий, справа — щебень

4.4. Свойства бетонной смеси и бетона и многообразие вариантов использования исходных материалов

Консистенцию до сих пор мы рассматривали только в зависимости от количества цементного клея и зернового состава. Однако поскольку выбор консистенции определяет количество цемента, косвенно он влияет и на такие свойства бетона, которые изменяются в зависимости от количества цемента: тепловыделение, ползучесть, усадку. Через количество цемента консистенция влияет и на стоимость бетона. При установлении консистенции бетона, таким образом, надо учитывать и это обстоятельство, а не только технологические факторы и условия транспортирования, рассмотренные в разд. 4.2.1. Но и усадка, и ползучесть находятся под влиянием выбора консистенции. Эта взаимосвязь показана на рис. 50.

Тепловыделение твердеющего бетона, вызванное теплотой реакции гидратирующегося цемента, начинается в момент, когда возникает проч-

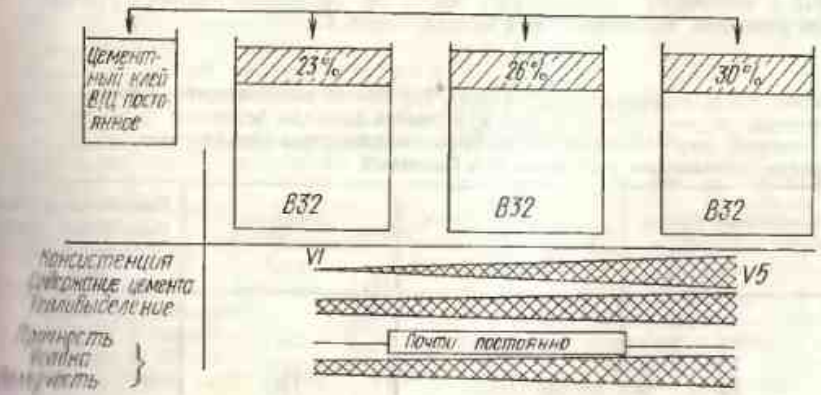


Рис. 50. Влияние различного количества цементного клея в бетоне (объемные проценты) на важнейшие свойства бетонной смеси и бетона ($В/Ц = 0{,}5$), заполнитель постоянный $Б_{32}$

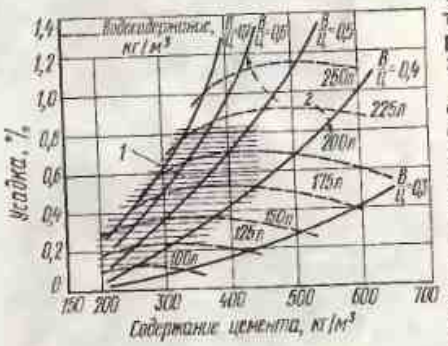


Рис. 51. Усадка раствора и бетона в зависимости от содержания цемента и *В/Ц*

1 — область бетонных смесей; *2* — область растворов

ность. У массивных изделий это тепло не может отводиться, что приводит к тепловому расширению. Но поскольку температура в бетоне повышается не равномерно, а наиболее интенсивно внутри (поверхность излучает тепло), это приводит к температурным напряжениям в бетоне и к растягивающим усилиям на его поверхности. Последние накладываются на усадочные напряжения. На важность выбора цемента с учетом его тепловыделения уже указывалось (см. разд. 3.3).

Прочность бетона как функция *В/Ц* и прочности цемента уже рассматривалась. Поскольку вид цемента и его прочность влияют также на тепловыделение и усадку, эти факторы необходимо учитывать при выборе цемента.

Усадку бетона следует отнести за счет потери влаги. Большинство обычных заполнителей для тяжелого бетона не дает усадки. Таким образом, причину следует искать в цементном камне. Существует однозначная связь между содержанием цементного камня в бетоне и усадкой (рис. 51). Установлено (см. рис. 32), что цементный камень может давать усадку до 4 мм/м. Применение заполнителей снижает усадку, об этом свидетельствует малая усадка бетона (от 0,1 до 0,8 мм/м). В результате того, что температурные и усадочные напряжения суммируются, они очень часто, особенно в дорожном строительстве, приводят к возникновению нежелательных усадочных трещин, которые появляются тогда, когда растягивающие напряжения превышают прочность при растяжении.

Ползучесть бетона имеет существенное значение только для изделий с предварительным натяжением. Поскольку она как понятие используется в связи с усадкой, мы не можем оставить ее совсем без внимания, однако подробно рассмотреть этот вопрос здесь не имеем возможности. Заполнители иногда влияют на ползучесть сильнее, чем на усадку. Как взаимно влияют друг на друга рассмотренные факторы в зависимости от крупности зерна, показано на рис. 52.

Таблица 9. Граничные значения крупности тонкомолотых зерен, водосодержания и содержания воздушных пор для бетонов с высокой морозостойкостью и сопротивляемостью воздействию противогололедных реагентов (по Бонзелю)

Наибольший размер зерна заполнителя, мм	Максимальное содержание* тонкомолотых зерен, кг/м³	Максимальное водосодержание, кг/м³	Минимальное общее содержание воздушных пор в объемных %
8	525	220	5
16	450	190	4
32	400	170	3,5

* Содержание молотых зерен должно быть ограничено, чтобы водопотребность оставалась в допустимых пределах и не происходило слишком большого обогащения цементного раствора у поверхности, что опасно при замораживании.

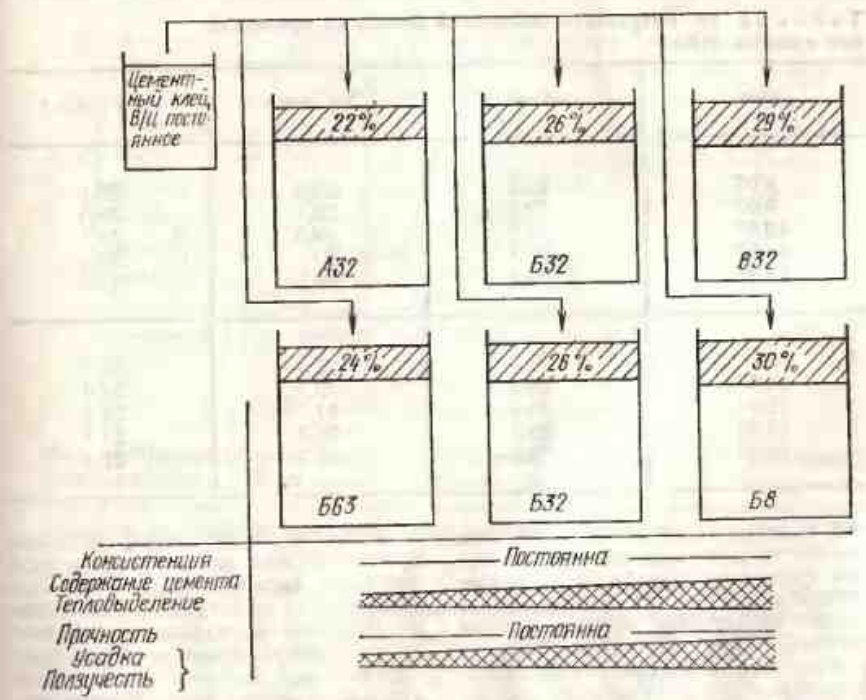


Рис. 52. Влияние различных заполнителей на потребность в цементном клее (объемные проценты) и важнейшие свойства бетонной смеси и бетона при постоянной консистенции (V_3)

Водонепроницаемость и связанные с ней *сопротивляемость морозу и агрессивным веществам* противосолевых добавок в первую очередь зависит от значения *В/Ц* (см. разд. 3.3 и табл. 12). Если требуется высокая морозостойкость, следует во всех случаях в качестве противоморозных добавок применять воздухововлекающие добавки (см. разд. 2.4). Кроме того, важно ограничивать содержание вида и добавки к цементу при помоле (табл. 9).

В соответствии с TGL—11357 агрессивные среды различают по степени агрессивности:

неагрессивные к бетону (I);
слабо агрессивные (II);
средне агрессивные (III);
сильно агрессивные (IV);
очень сильно агрессивные (V).

При степени агрессивности сред I—IV бетон можно предохранять снижением *В/Ц* и выбором подходящих цементов, причем следует сохранять минимально необходимые марки цемента.

При степени агрессивности среды V необходимо, кроме того, предусмотреть применение конструктивных мер.

4.5. Предел прочности бетона различных марок

Повсюду, где бы ни применялся бетон, его основным критерием является прочность. Об этом свидетельствует тот факт, что почти каждое бетонное изделие (а из железобетона и предварительно напряженного бетона всегда!) проверяется на прочность. При этом проектант должен в соответствии с маркой бетона задаваться определенной прочностью, так называемой расчетной прочностью при сжатии. Чтобы обеспечить надежность этих значений по ASMW—VW

Таблица 10. Результаты испытаний бетона на прочность при сжатии, МПа

День	1-я смена	2-я смена	3-я смена
8.07	21,2	23,6	25,1
9.07	22,7	23,1	23,5
10.07	20,3	22,9	24,1
11.07	19,8	23,3	25,3
12.07	23,9	24,7	24,3
15.07	26,7	22,4	23,7
16.07	25,2	22,1	24,9
18.07	24,4	21,8	23,2
19.07	26,2	23,8	23,4
20.07	25,9	24,7	21,5

968, введены контрольные значения прочности для каждого вида бетонной продукции. Однако их выбирают исходя не из средних показателей, а скорее из значения вблизи нижней границы. При построении графика для подбора рецептуры бетона нужно стремиться к определенному среднему значению, которое называют пределом прочности.

Чтобы понять взаимосвязи, а позже, в разд. 6.4.8, уметь провести анализ полученной прочности, рассмотрим здесь элементы статистического контроля качества.

4.5.1. Прочность бетона как статистическая характеристика. Если при непрерывном производстве на бетонном заводе или на строительной площадке из каждого замеса брать бетонную смесь и делать из нее кубы для испытания, то можно установить, что каждый куб имеет неодинаковую прочность и что отклонения при каждом испытании от среднего значения довольно велики. Поэтому приближенно из каждого 100-го замеса следует формовать куб для испытания. По результатам испытаний, внесенным в таблицы (так называемые карты), после нескольких операций можно найти наибольшее, наименьшее и среднее значения и очень грубо оценить истинно среднее значение прочности в МПа (табл. 10).

Более наглядно видны разбросы прочности, если их построить в виде диаграмм частотности (рис. 53). При этом методе регистрации с помощью математической модели — гауссовой кривой распределения — могут быть определены в дальнейшем и другие важные характеристики. Кривая распределения и характеризуемые ею зависимости изображены на рис. 54 на основе данных рис. 53. Так как разбросы прочности бетона от одного смесительного узла к другому существенно различаются, на том же рисунке изображены значения прочности бетона, взятого и из другого узла.

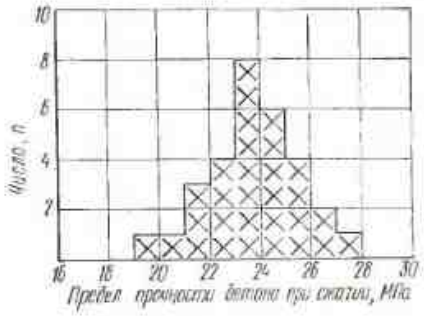


Рис. 53. Частотная диаграмма по результатам испытания при сжатии, представленным в табл. 10

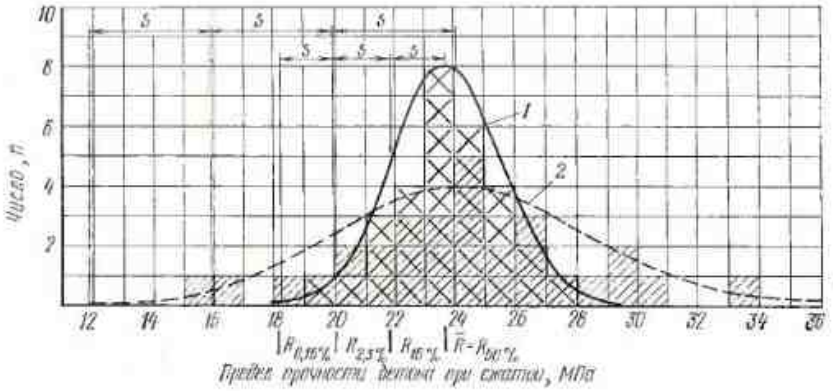


Рис. 54. Частотные диаграммы и математическая модель гауссовой кривой позволяют делать математико-статические прогнозы

Кривая *1* построена по рис. 53; кривая *2* — пример с большим разбросом показаний прочности, но приблизительно одинаковым средним значением $\bar{R}$

Уже упомянутые показатели:

- $\bar{R}$ (иногда R_{50}) как среднее значение, фиксированное проекцией на абсциссу вершины кривой. R_{50}% обозначает, что меньшее значение прочности имеют только 50% испытанных образцов.
- s (стандартное отклонение) представляет собой расстояние между вершиной и переломной точкой кривой. На основе этих исходных величин можно вывести три других важных критерия:
- R_{16}% — прочность, получаемая проектированием точки перелома кривой на абсциссу. Следует иметь в виду, что при оценке этой прочности отдельные результаты находятся в области ниже 16%;
- $R_{2,3}$% — значение прочности, соответствующее расстоянию $2s$ от вершины. Процентное выражение имеет аналогичное значение.

$R_{0,15}$% — значение прочности, соответствующее расстоянию $3s$ от вершины. Для определения трех последних значений прочности можно рекомендовать следующие формулы:

$$R_{16\%} = R_{50\%} \ldots s$$

$$R_{2,3\%} = R_{50\%} \ldots 2s$$

$$R_{0,15\%} = R_{50\%} \ldots 3s$$

4.5.2. Характеристика прочности бетона различных марок. В нормах и правилах для бетонных изделий назначается расчетная прочность, например для железобетонных изделий, работающих на изгиб, 60% требуемой марки; для марки В 300 с расчетной прочностью 18 МПа должна, естественно, обеспечиваться очень высокая статистически гарантированная надежность. Поэтому понятно, что ей соответствует очень надежное значение прочности $R_{0,15}$% (в первом приближении). На основе математико-статистических зависимостей, однако, невозможно при контроле качества ориентироваться на такое значение. Поэтому, согласно ASMW—VW 968, контрольная прочность $x_к$ должна быть обеспечена с 2,3%-ной вероятностью отказа ($R_{2,3}$%). Естественно, что существует теоретическая связь между расчетной прочностью и контрольным значением $x_к$.

Рассмотренные до сих пор значения прочности бетона имеют особое значение, так как практически из них выводятся пределы прочности R_z, на которые как на среднее значение ориентируется рецептура бетонной продукции. Использование $x_к$ в качестве контрольного значения позволяет практику определить надежность, с которой он выпускает продукцию, и тем самым при хорошей организации и тщательном контроле работать экономичнее.

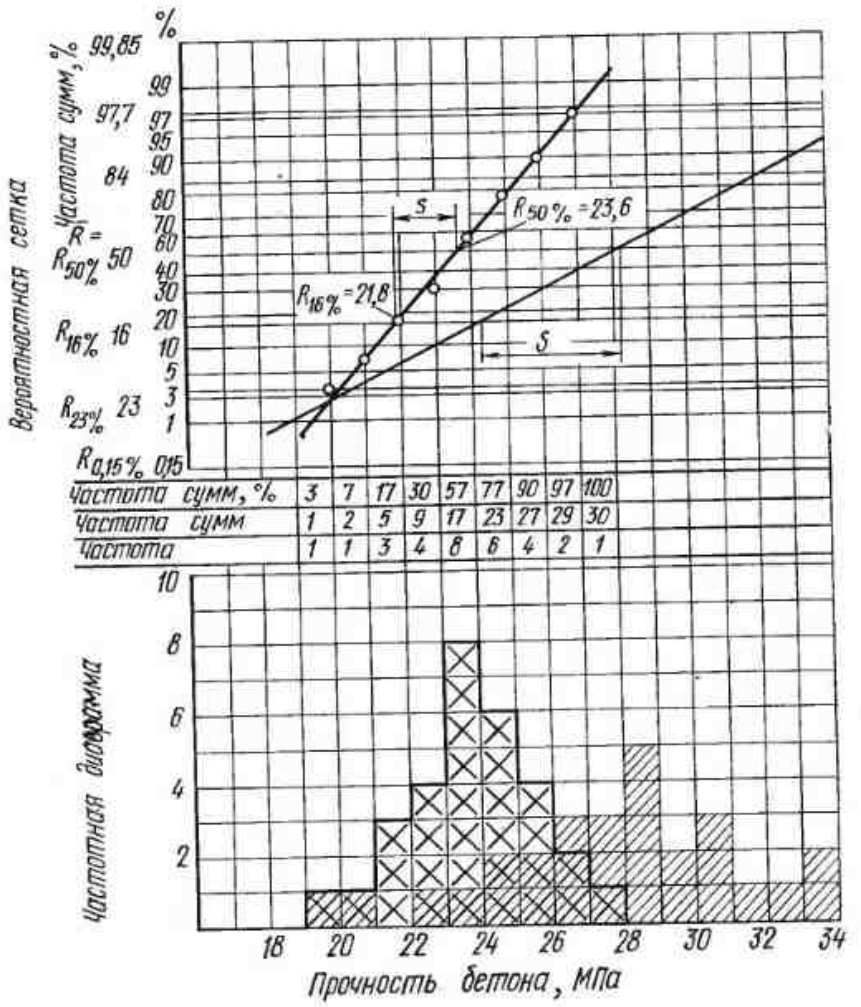


Рис. 55. Графический метод приближения для определения значения стандартного отклонения s из частотной диаграммы (тот же пример, что и на рис. 53 и 54)

Руководитель производства может в зависимости от разброса прочности устанавливать предел прочности R_z. Если у него нет опытных данных, он может выбрать из табл. 11 значения предела прочности, вычисленные по формуле $R_z = x_н + 2s_{макс}$ с максимальным разбросом прочностей бетона. Если же он располагает действительным разбросом прочности, определенным по результатам испытаний, например, месячной продукции на бетонном заводе, то он может взять за основу эти данные и использовать их в своей дальнейшей работе либо подставить в вышеприведенную формулу вместо $s_{макс}$ (не следует никогда работать со значениями s меньше 2,5 н/мм²).

Определить стандартное отклонение прочности на основании результатов испытаний — по существу значит определить качество бетона. Оно подсчитывается в разд. 6.4. Здесь же рассмотрим весьма наглядный, но приближенный графический метод с использованием данных, приведенных в табл. 10 и на рис. 53 и 54. Построенная по данным табл. 10 (см. рис. 53) гистограмма увеличена на три графы (см. рис. 55). В графе «частота» проставляют число испытаний на прочность в интервале; в графе «частота суммы» суммируют предыдущие значения в направлении слева направо и помещают в верхнюю строку истинное значение (т. е. последнее число из предыдущей строки), равное 100%. Обычным расчетом получают все остальные значения для «частоты суммы в %». Значение этой последней строки переносят в «вероятностную сетку» как точку пересечения частоты суммы (ординаты) и прочности (абсциссы), но на правой стороне каждого интервала прочности. Эти точки визуально можно соединить прямой. Точки пересечения полученных прямых со значением ординат 50 и 16% дадут интересующие нас значения прочности $\bar{R}$ и $R_{16\%}$. Стандартное отклонение можно измерить или посчитать по уравнению

$$s = \bar{R} - R_{16\%}.$$

Заштрихованная область иллюстрирует оценку результатов, полученных в других опытах, с гораздо бо́льшим разбросом прочности, а следовательно, и с бо́льшим стандартным отклонением результатов прочностных испытаний. Значение прочности $R_{2,3\%}$, которое при определении следует сравнивать с $X_н$, определяется по рис. 55.

Из приведенной формулы для определения R_z, как и из рис. 55, можно понять, как велико значение того, чтобы бетонный узел работал с малыми колебаниями прочностных показателей.

Обе представленные и обработанные на рис. 55 группы результатов испытаний имеют почти одинаковые значения $R_{2,3\%}$ и с точки зрения надежности результатов в этом отношении равноценны. Однако в обоих смесительных узлах одинаковая прочность бетона $R_{2,3\%}$ достигается при весьма различных средних значениях прочности. Более высокая средняя прочность была обеспечена при меньшем $В/Ц$, т. е. практически при более высоком содержании цемента.

Разброс результатов испытания образцов цемента на прочность показывает, насколько надежно работает предприятие. Учет разброса значений при определенной контрольной прочности и установление предела прочности R_z экономически стимулируют изготовление бетона более высокого качества, лучшую организацию производства и контроля.

Таблица 11. Значение прочности бетона, МПа, в зависимости от марки

Марка бетона В	Контрольная прочность $X_н = R_{2,3\%}$ по ASMW—VW968	Максимальный разброс экспериментальных данных $s_{макс}$	Предел прочности бетона R_z как среднее значение для составов бетона
120	10,5	3,5	17,5
160	14	4,5	23
225	19	5,5	30
300	24,5	6,25	37
450	36	7	50
600	46	7	60

Практическое проектирование бетона

5

5.1. Исходные данные и граничные условия

Теоретически существует почти неограниченное количество вариантов получения бетона с нужными свойствами. Однако практика, технологические условия и не в последнюю очередь существующие законоположения создают при решении этого вопроса определенные ограничения. Исходными для рассмотрения в основном являются три фактора: консистенция бетонной смеси, марка бетона и требуемые специальные свойства.

5.1.1. Цемент. Выбор типа и марки цемента обусловливает требуемые прочность и специальные свойства бетона. Марку цемента и бетона определяют в соответствии с рис. 46 (см. разд. 3.4 и табл. 7). Напомним при этом выводы, приведенные в разд. 3.3: в тех случаях, когда после очень краткого времени твердения требуется высокая прочность бетона, необходимо исходить из низких *В/Ц* и высокой прочности цемента. Высокие прочности достижимы при использовании только портландцемента, поскольку бетон из шлакопортландцемента характеризуется более низкой маркой 275. Часто забывают, что цементы после 28 сут хранения могут терять до 10—15% прочностных свойств (исключение составляет хранение в силосах). Это необходимо учитывать, если *В/Ц* определяют с помощью диаграммы рис. 46. Требования к теплоыделению, усадке и стойкости против воздействия химических веществ еще больше ограничивают возможность выбора цемента (см. разд. 3.6). И последнее ограничение вносит строительная площадка. Почти для каждого объекта необходим бетон определенной марки. Для такого бетона не будут брать новый цемент, а выберут цемент, пригодный для всех бетонных работ, в противном случае очень сложно организовать его хранение. Исключение делается только для особо ответственных строительных объектов.

Количество цемента, необходимое для изготовления 1 м³ бетона, также должно находиться в определенных пределах. Так, для железобетона и предварительно напряженного железобетона существует предельное минимальное содержание цемента, при котором обеспечивается необходимое уплотнение и тем самым предотвращается коррозия арматурной стали. По TGL 0—1045, минимальное содержание цемента должно составлять 270 кг/м³. Однако в зависимости от условий производства работ и условий эксплуатации могут быть более высокие или низкие значения расхода цемента. Для высотных зданий содержание цемента в изделиях, не подверженных воздействию атмосферных факторов, при марках В 100 и В 225, может быть снижено до 240 кг/м³. Для бетонов, подверженных химической агрессии, предусматриваются повышенные расходы цемента в соответствии с TGL 11357.

5.1.2. Заполнители для бетона. При выборе заполнителей в центре внимания обычно находятся две противоположные точки зрения: желание использовать местные каменные материалы и иметь каменные материалы оптимального зернового состава. Значение зернового состава было детально рассмотрено в разд. 4.2. Неудачный зерновой состав может быть, в определенных пределах, компенсирован повышенным количеством цемента (однако со всеми вытекающими из этого недостатками). Применение некачественных заполнителей для бетонов высоких марок ограничено. Высококачественный бетон требует и таких же исходных материалов.

Оптимальная кривая просеивания должна располагаться в середине между предельными кривыми просеивания *А* и *Б*. Хотя в направлении линии *А* площадь поверхности уменьшается, однако их уплотняемость (т. е. склонность зерен плотно упаковываться) сильно снижается, между тем как склонность к расслаиванию возрастает. Кроме того, следует всегда иметь в виду неоднородность заполнителя (напомним о происхождении гравийных месторождений, см. разд. 2.3).

Если стремиться к линии *А*, то можно попасть в область непригодности. Есть и другие граничные условия: часто в железобетонных изделиях используется густое армирование (расстояние в свету между стержнями 20 мм, т. е. равно наибольшему диаметру арматурной стали, если она имеет диаметр 20 мм). В этом случае должны быть выбраны такой зерновой состав и наибольший размер зерна, при котором преобладающее количество заполнителя меньше этих минимальных расстояний. Еще одно правило требует, чтобы соотношение наибольшего размера зерна и наименьшего размера изделия было 1 : 3 и более. К бетонной смеси, транспортируемой по трубам, предъявляются аналогичные требования (соотношение наибольшего размера зерна и диаметра трубы должно быть 1 : 3).

Граничные условия существуют и для мельчайших фракций заполнителя. В соответствии с предельными кривыми просеивания целесообразно применение незначительного количества мельчайших фракций (группа зерен 0—0,25). Для повышения обрабатываемости бетонной смеси мы заинтересованы иметь достаточное количество молотых составляющих (имеется в виду цемент + частицы заполнителя 0—0,25 мм). При наибольших размерах зерен 8, 16, 32 и 63 мм количество молотых составляющих (как пожелание, не как требование) целесообразно соответственно 525, 450, 400 и 325 кг/м³. Если при добавлении цемента и мелкозернистых составляющих заполнителя мы не получаем требуемых значений, полезно вводить соответствующие количества кварцевого песка или другого мелкозернистого материала. Опытные замесы помогают принять правильные решения.

5.1.3. Консистенция. Здесь мы полностью ссылаемся на разд. 4.2. Консистенцию следует определять с учетом аппаратуры для транспортирования, распределения и уплотнения бетонной смеси. Каждый бетонщик знает, что чем жестче бетон, тем сложнее его обработать. Поэтому снова и снова встречаемся с требованием повышать водосодержание. В действительности надо затрачивать не «больше воды» и не «больше цементного теста», иначе потребуется увеличить количество цемента.

Необходимое уплотнение в бетоне достигается или путем интенсивного уплотнения при малом расходе цемента, или путем значительного увеличения расхода цемента при неинтенсивном уплотнении. Расход цемента в обоих случаях приблизительно одинаков, но технические свойства бетона позволяют считать первый вариант предпочтительным, поэтому мы должны стремиться к выбору бетонной смеси возможно более жесткой консистенции.

5.1.4. Водоцементное отношение. Значение *В/Ц* определяется маркой бетона и активностью цемента. Но такое значение *В/Ц* не обязательно отвечает требованиям заданной водонепроницаемости, морозостойкости и химической стойкости. Поэтому возможно, что в этих случаях прочность имеет второстепенное значение, а *В/Ц* подбирают с целью обеспечить эти специальные свойства.

5.2. Проектирование состава бетона

Проектирование состава бетона позволяет определить количество составляющих бетонной смеси на основе известных взаимосвязей. Эта работа начинается за письменным столом и заканчивается изготовлением опытного замеса в лаборатории.

Рекомендуются следующие параметры В/Ц в зависимости от области применения бетона:

Вид бетона	Максимальное значение $В/Ц$
Для бетонов с высокой водонепроницаемостью при толщине изделия:	
от 10 до 40 см	$\leqslant 0{,}60$
свыше 40 см	$\leqslant 0{,}70$
Для бетонов, испытывающих воздействие мороза:	
без воздухововлекающих добавок	$\leqslant 0{,}60$
с оптимальным количеством воздухововлекающих добавок	$\leqslant 0{,}60 \div \leqslant 0{,}70$
Для бетонов, испытывающих воздействие мороза и противогололедных реагентов:	
без воздухововлекающих добавок	$\leqslant 0{,}65$
с оптимальным содержанием воздухововлекающих добавок	$\leqslant 0{,}42$
Для бетонов в агрессивных средах:	$\leqslant 0{,}45$
при степени агрессивности II и III	$\leqslant 0{,}65$
то же, IV	$\leqslant 0{,}45$
при подводном использовании бетона	$\leqslant 0{,}40$
Для бетонов в железобетонных конструкциях	$\leqslant 0{,}80$

Проектант определяет требуемую марку бетона. Предприятие осуществляет монтаж наличного оборудования для транспортирования и обработки смеси и договаривается с поставщиками о необходимых материалах.

Таким образом собирают исходные данные для проектирования состава. Они могут быть еще уточнены в процессе дискуссии о заданной прочности. Для нового бетонного узла значение прочности бетона уточняется по данным табл. 11. Для существующего узла заданная прочность может быть снижена, если по минимальному стандартному отклонению ($s_{макс}$) доказана высокая однородность поставляемого бетона.

Технологические исходные данные можно определить исходя из конечной прочности бетона и прочности цемента (значение $В/Ц$), поступающих заполнителей (определение зернового состава), предполагаемой технологии переработки бетонной смеси (консистенция). Учитывая зерновой состав и консистенцию, можно определить водосодержание в расчете на 1 м³ бетона (см. табл. 7, рис. 42); содержание цемента определяется по $В/Ц$ и содержанию воды

$$Ц = \frac{В}{В/Ц}.$$

Метод расчета по абсолютным объемам бетонной смеси помогает вычислить недостающие величины. Метод прост, он построен на применении элементарных зависимостей между массой, плотностью и объемом, а также системы, представленной в табл. 12.

В этой системе принято несколько допущений: плотность цемента составляет в среднем 3,1 г/см³, но может колебаться между 3 и 3,2 г/см³. Работают или со средним значением, или определяют плотность опытным путем. Неизбежный объем пор в литых и пластичных бетонных смесях составляет 1%, а в жестких — до 3%. Его оценивают в среднем в 1,5%. Плотность заполнителей может существенно отклоняться от 2,65 г/см³, если велика доля щебня магматических пород, содержащих большее количество пород с основными минералами (так называемые черные породы — диорит, базальт, диабаз). Если преобладают кварцсодержащие породы, то плотность лежит всегда в пределах 2,60 и 2,65 г/см³. Рекомендованные оценочные значения вызывают небольшие ошибки и вообще не обязательно проверять плотность этих пород. Суммирование объемов (по массе) составляющих материалов 1 м³ бетонной смеси даст его обычную плотность. По этому показателю контролируют образцы, приготовляемые

Таблица 12. Система подбора объемов составляющих бетонной смеси

Масса, кг/1000 дм³	(:) (=) Плотность (=) (.) кг/дм³	Объем, дм³
Масса цемента (определена)	≈3,1	Объем цемента
Масса воды (определена)	1,0	Объем воды
Пористость бетонной смеси — оценка 1—3%		Объем пор в бетонной смеси
Масса заполнителей в бетоне	≈2,65	Остаточный объем для заполнителей (дополняется до 1000 дм³)
Сумма всех масс даст плотность бетонной смеси, кг/м³		Сумма всех объемов даст 1000 дм³ = 1 м³

из опытного замеса. Массовые доли определяют рецептуру (состав) смеси. Если приравнять количество цемента к единице, получим соотношение компонентов, составляющих смесь.

Имеются две причины для уточнения состава бетонной смеси в условиях стройки. Во-первых, редко делается замес только на 1 м³, а во-вторых, заполнители, которые хранятся чаще всего на открытом воздухе, имеют в зависимости от погоды существенную долю влаги. При определении состава бетонной смеси на стройке необходимо учитывать следующее обстоятельство. Типы смесителей обозначаются по их емкости (например, 500-литровый смеситель). Этот объем отвечает максимально возможному насыпному объему сухого материала (цемент+заполнитель), который может быть помещен в смеситель. Из соотношений между насыпной массой сухих материалов и объемом уплотненного бетона определяется коэффициент выхода. Максимальное значение для него 0,67. Производственную рецептуру бетонной смеси рассчитывают путем умножения долей компонентов смеси на объем смесителя и коэффициент выхода.

Необходимо учитывать и влажность заполнителей. При содержании в смесителе 10% влаги в нем находится только 90% заполнителя. Эта ошибка может быть исправлена. Гораздо хуже, если при этом в смесителе содержится больше половины всей потребной воды. Хорошо, когда среднюю влажность учитывают в производственной рецептуре и только от случая к случаю корректируют содержание воды.

Все полученные значения необходимо дополнительно проконтролировать путем опытного замеса, о чем уже говорилось ранее. Для того чтобы изложенный метод проектирования бетона можно было представить более наглядно, была составлена схема (рис. 56).

5.3. Пример проектирования бетона

5.3.1. Постановка задачи. Необходимо составить производственную рецептуру бетона марки Б 300. Должна быть изготовлена опорная стена. Расстояние между арматурой в свету 30 мм. Уплотняющими средствами служат обычные глубинные вибраторы. Агрессивных сред нет. В качестве материала используется цемент PZ 1/375 и заполнители (песок 0—2, гравий 2—3 и щебень 8—32). Рассев заполнителей дал результаты, изложенные в табл. 13. Состав перемеши-

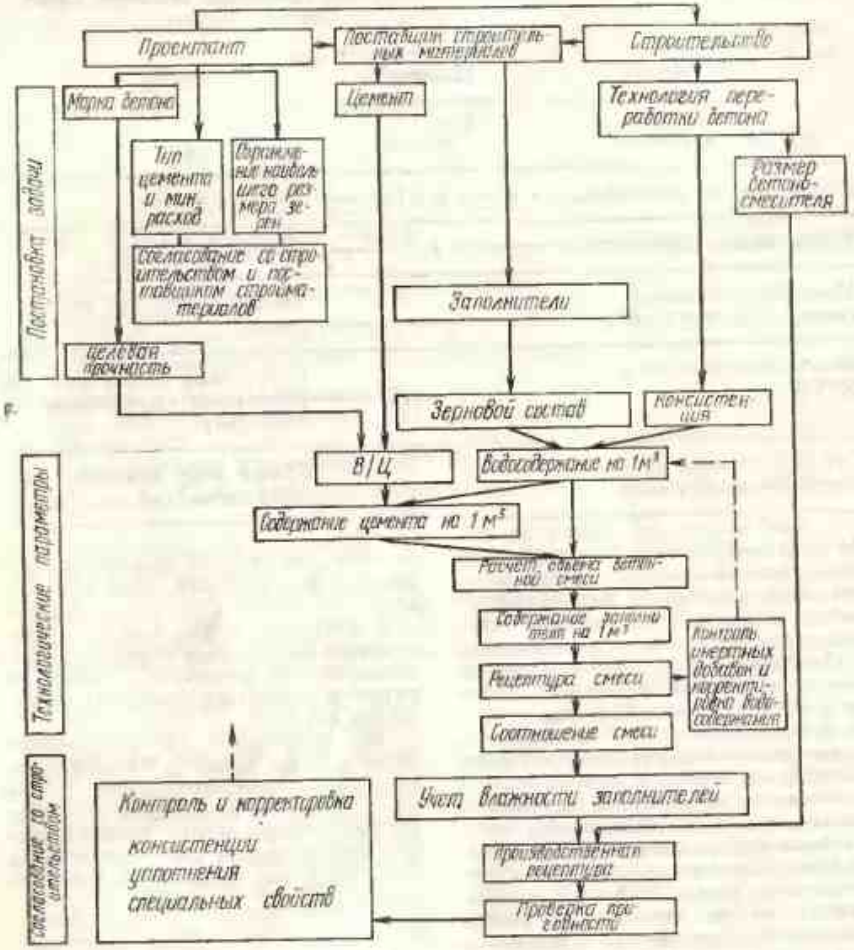


Рис. 56. Схема проектирования бетона

вается в смесителе MR-500, транспортируется дальей.

5.3.2. **Расчет технологических характеристик.** Заполнители выбирают в соответствии с конструктивными данными — расстоянием между стержнями арматуры; максимальная крупность зерна заполнителя принята 32 мм. Желательно подбирать заполнитель с оптимальной крупностью, которая характеризуется линией просеивания $А/Б_{32}$. С помощью числа K определим фракции:

$$K_{жел} = \frac{K_{А32} + K_{Б32}}{2} = \frac{5,48 + 4,20}{2} = 4,84.$$

K числа граничных линий просеивания составляет:

$$K_{0-2} = \frac{1}{100}(94 + 50 + 20 + 3) = 1,67\ (K_z);$$

Таблица 13. **Ситовой анализ заполнителей для бетона**

Заполнитель	Прошло частиц (по массе %) через сито, мм							
	0,25	0,50	1	2	4	8	16	31,5
Песок 0—2 ($\gamma_1 = 2,62$)	6	50	80	97	100	100	100	100
Гравий 2—8 ($\gamma_1 = 2,62$)	3	8	10	10	55	95	100	100
Щебень 8—32 ($\gamma_2 = 2,72$)	2	2	3	3	4	6	50	100

$$K_{2-8} = \frac{1}{100}(97 + 92 + 90 + 90 + 45 + 5) = 4,19\ (K_y);$$

$$K_{8-32} = \frac{1}{100}(98 + 98 + 97 + 97 + 96 + 94 + 50) = 6,30\ (K_x).$$

По формулам, приведенным в разд. 4.2.4, вычислим долю z. Из рис. 42 известно, что доля 0—2 в благоприятной области должна быть между 14 и 37%, а среднее значение должно соответствовать 25%. Поскольку, однако, и другие фракции содержат мелкие частицы (частицы мельче данного наименьшего зерна) для нашего расчета доля песка 0—2 составит 20%. Таким образом,

$$z = 0,2;$$

$$x = \frac{4,84 - 4,19 \cdot 0,8 - 1,67 \cdot 0,2}{6,30 - 4,19} = 0,55;$$

$$y = 1 - 0,55 - 0,2 = 0,25.$$

Следовательно, заполнители для бетона состоят из 20% песка 0—2 (z), 25% гравия 2—8 (y), 55% щебня 8—32 (x).

В связи с тем, что при дальнейшем расчете объемов компонентов бетонной смеси необходимо знать плотность заполнителя и остальных компонентов, которая отклоняется от обычно принимаемой 2,65 г/см³, определим плотность смеси

$$\gamma_2 = (0,20 + 0,25)\gamma_1 + 0,55\gamma_2 = 2,67\ г/м^3.$$

Очевидно, что ошибка при условии $\gamma = 2,65$ г/см³ мала.

Рассуждая аналогичным образом, вычислим долю z (песок 0—2). В расчет включены 20% всего заполнителя, прошедшего через сита (табл. 14). Часть y (гравий 2—8) вместе с z должна составлять 38—62% (см. рис. 42), т. е. в среднем 50%. Тогда для $y = 50 - 20 = 30\%$. Но так как и часть x (щебень 8—32) имеет зерно размером меньше 8 мм, то берем только 25% от y и это количество указываем в табл. 14. Остаток (часть x) составляет 55%. Результат тот же; вследствие субъективного подхода к расчету отдельные фракции могут изменяться в пределах ±5%. Если суммировать данные в графах табл. 14, то получим значения, характеризующие линию просеивания смеси, составленной из долей x, y и z.

Сравнение данных, приведенных в двух последних строках табл. 14, показывает хорошее совпадение.

Выбор консистенции и водосодержание. Рекомендованные в разд. 4.2.1 уплотняющие средства позволяют выбрать консистенцию V2 и V3. Однако из-за неудобства работы с вибраторами, по условиям задания, выбор более пластичной консистенции V3 представляется более правильным.

Соответственно данным, изложенным в разд. 4.2.6 (см. рис. 45, табл. 8), получаем путем интерполяции содержание воды 156 л/м³. Согласно примечанию 1 к табл. 8, необходимо с учетом доли щебня добавить 5% воды, т. е. $156 \times 1,05 = 164$ л/м³.

Предел прочности В/Ц и содержание цемента. В связи с тем, что при такой постановке задачи нет возможности непосредственно определить предел прочности бетона, воспользуемся для этой цели данными табл. 11 и выберем для бетона марки 300 пре-

Таблица 14. Зерновой состав, определенный по методу частичного добавления

Материал	Прошло частиц [по массе %] через сита [мм]							
	0,25	0,50	1	2	4	8	16	31,5
20% песка 0—2 (z)	1,2	10	16	19,4	20	20	20	20
25% гравия 2—8 (y)	0,8	2	2,5	2,5	13,8	23,8	25	25
55% щебня 8—32 (x)	1,1	1,1	1,6	1,6	2,2	3,3	27,5	55
100% смеси xyz	3,1	13,1	20,1	23,5	36	47,1	72,5	100
Желаемое как среднее между A_{32} и $Б_{32}$	5	11,5	18	25,5	35	50	71	100

дел прочности 37 МПа. В качестве стандартной прочности цемента принимаем значение 37,5 МПа. Это можно делать при условии, что сроки схватывания и разномерность изменения объема соответствуют нормативным, даже в том случае, если (!) отсутствуют результаты испытания на предел прочности, но при этом не допускается, чтобы цемент до использования хранился больше 28 сут (исключение допускается при хранении цемента в силосах). Таким образом, из рис. 46 получается значение $В/Ц=0{,}47$. Отсюда можно определить содержание цемента:

$$Ц = \frac{\text{Водосодержание}}{В/Ц} = \frac{164}{0{,}47} = 350 \text{ кг/м}^3.$$

По данным табл. 15 рассчитываем объем бетонной смеси и делаем две проверки. Полученное количество цемента должно быть больше минимального (270 кг/м³), что и достигнуто, а молотых зерен должно быть более 400 кг/м³. Это количество вычисляем из известных долей заполнителя с наименьшим зерном 0—0,25 мм в соответствии с результатами просева:

песок 0—2 для бетона . .	$1800 \cdot 0{,}20 \times 0{,}06 = 23$ кг/м³
гравий 2—8 для бетона .	$1880 \cdot 0{,}25 \times 0{,}03 = 14$ кг/м³
щебень 8—32 для бетона .	$1880 \cdot 0{,}55 \times 0{,}02 = 21$ кг/м³
цемент	350 »
Итого молотых составляющих	408 кг/м³

Таблица 15. Примерный расчет объемов компонентов бетонной смеси

Масса [кг/100 дм³]	Плотность [кг/дм³]	Объем [дм³]
350 кг цемента	3,1	113
164 кг воды	1	164
0 кг воздуха в бетонной смеси	(оценено в 2%)	20
1880 кг заполнителя	2,67	703
2394 кг — объем проектируемой бетонной смеси		1000 дм³

Таким образом, требование о наличии молотых составляющих выполнено, теперь необходимо в соответствии с примечанием 2 к табл. 8 добавить к имеющемуся количеству воды еще

$$B' = (408 - 350)\frac{1}{10} = 6 \text{ л/м}^3.$$

Тогда, корректируя количество цемента и воды, получаем:

$$B = 164 + 6 = 170 \text{ л/м}^3;$$

$$Ц = \frac{170}{0{,}47} = 360 \text{ кг/м}^3.$$

Аналогичным расчетом объемов получаем количество заполнителей 1850 кг/м³ и объемную массу бетонной смеси 2300 кг/м³.

Состав смеси и соотношение в смеси. По полученным расчетным объемам бетонной смеси можно составить рецептуру смеси, кг/м³:

Цемент 1/375	360
Вода	170
Песок 0/2 $1850 \times 0{,}20$	370
Гравий 2/8 $1850 \times 0{,}25$	460
Щебень 8/32 $1850 \times 0{,}55$ . . .	1020

Обычно получают соотношение компонентов в смеси, которое удобно записать в следующем виде:
цемент : заполнитель : вода.

В данном случае это соотношение (по массе, кг) будет: 360 : 1850 : 170, или, принимая массу цемента за единицу, 1 : 5,14 : 0,47.

Производственная рецептура. Фактическое количество бетонной смеси, необходимое для предусмотренного смесителя принудительного действия (*MR* 500) объемом 500 л и с коэффициентом выхода 0,67, вычисляют путем умножения этих значений $0{,}5 \times 0{,}67 = 0{,}33$. При совершенно сухих заполнителях тогда потребуется 120 кг цемента, 56 кг воды, 123 кг песка 0—2, 153 кг гравия 2—8, 340 кг щебня 8—32.

В связи с тем, что заполнители хранятся под открытым небом, надо учесть влажность, которая обычно составляет, %:

для песка . . 4÷10 (в среднем 7%)
для гравия . . 2÷4 (в среднем 3%)
для щебня . . 0÷2 (в среднем 1%)

При большом содержании мелких фракций гравия и щебня влагосодержание может быть и выше, в сущности, это зависит от крупности зерна и открытой пористости (см. разд. 4.1). Поскольку влажность в производственной рецептуре не учитывается, при взвешивании получаем:

123 кг массы = 8,6 кг воды + 114,4 кг песка	0—2
153 кг массы = 4,6 кг воды + 148,4 кг гравия	2—8
340 кг массы = 3,4 кг воды + 336,6 кг щебня	8—32

Таким образом, кроме дозированного количества воды (56 л) в смеситель добавлено еще (8,6+4,6+3,4) = 16,6 л. Тогда полное водосодержание будет 72,6, и $В/Ц$ вместо 0,47 становится теперь 72,6/120 = 0,6. Это приводит к 25%-ной потере прочности, и мы получаем только В 225. Консистенция при этом изменяется с *V*3 на *V*5. Если учитывать определенную влажность заполнителей, то получим следующую производственную рецептуру, кг:

цемента *PZ* 1/375	120
воды (56—16,6)	39
песка 0—2 (123+8,6)	132
гравия 2—8 (153+4,6) . . .	158
щебня 8—32 (340+3,4) . . .	343

Возможные ошибки дозировки еще достаточно велики. При изменении погоды следует корректировать водосодержание, тем не менее когда принимаются средние значения влажности, можно избежать резкого ухудшения качества бетона.

Рецептуру следует уточнять путем отбора бетонной смеси непосредственно из смесителя (см. разд. 6.4.7) и последующего анализа ее.

Методы испытания

6

Чтобы изготовить высококачественный бетон, необходимо определить ряд показателей компонентов бетона и сопоставить эти показатели с предъявляемыми требованиями.

Работы, связанные с испытанием, необходимо частично проводить на месте изготовления бетона — даже в том случае, когда там нет полностью оборудованной лаборатории. В связи с этим качество исходных материалов определяется дважды: их поставщиком и изготовителем бетона. Кроме того, необходимо оценить некоторые свойства исходных материалов для проектирования бетонной смеси (например, зерновой состав заполнителей). Для изготовляемого бетона очень важно знать также оценку его качества. На данном этапе практик из получателя превращается в поставщика бетона для строительства.

В последующих разделах мы не описываем все необходимые методы. Выбраны лишь те, которые представляют непосредственный интерес для производства и проведение которых не требует сложных технических мероприятий. Чтобы и практик, не имеющий специального образования в области испытания бетона, смог пользоваться этими методами, весь процесс испытания разделен на отдельные этапы:

- А — сущность метода;
- Б — методика испытания;
- В — приборы (или оборудование) и вспомогательные средства;
- Г — проведение испытания;
- Д — оценка результатов испытания;
- Е — пример расчета;
- Ж — причины возможных ошибок опыта.

6.1. Испытание цемента

Из разд. 2 известно, с какой высокой точностью должны дозироваться исходные материалы для изготовления цемента и как высоки технологические затраты, чтобы получить высококачественное вяжущее. Небольшие изменения в соотношении исходных материалов или неполный обжиг клинкера могут привести к опасному явлению — неравномерному изменению объема (за счет свободной извести или окиси магния). Малые ошибки в добавке гипса вызывают слишком быстрое схватывание смеси. Оба примера выбраны из множества других, характеризующих недостатки, чтобы обосновать относительно большое количество методов испытания цементов: определение тонкости помола, сроков схватывания, равномерности изменения объема, прочности, усадки, теплоты гидратации. Если технологией производства предусмотрено отсылать пробы на испытание в центральную лабораторию, то там производится полное испытание. В тех случаях, когда это не требуется по ASMW—VW 1184/02, необходимо провести только следующие испытания.

6.1.1. Отбор пробы

А. *Сущность метода*

Испытуемая проба должна быть представительной, т. е. характеризовать большую массу цемента. Поэтому отдельные пробы следует отбирать в таком количестве, чтобы они отвечали этому требованию. Эти пробы объединяют в среднюю пробу.

Пробу отбирают с двумя целями: получить необходимое количество цемента для проведения испытания и в течение более длительного хранения проводить в более поздние сроки дальнейшие испытания, если имели место нарушения в строительстве, требующие выяснения обстоятельств.

Б. *Методика испытания*

TGL 28 102/01, вып. 7.74.

В. *Приборы и вспомогательные средства*

Пробоотборник, делитель пробы по TGL 21 369; герметически закрывающийся сосуд для хранения пробы (объемом 5 л); смесительная чашка; ручная лопатка.

Г. *Проведение испытания*

1. При доставке цемента в мешках число отбираемых проб определяют в зависимости от количества мешков:

Число мешков в одной поставке	*Минимальное число проб для отбора*
До 20	5
21—40	6
41—80	7
81—160	8
161—320	9
321 и более . . .	10

Пробы массой 2 кг каждая отбирают отборником из середины мешка (нетронутого), затем тщательно смешивают и делят прободелителем на конечную пробу массой не менее 10 кг.

При доставке цемента в емкостях пробу отбирают следующим образом. Перед подачей из верхнего отверстия отбирают немного отдельных проб массой 2 кг каждая, тщательно перемешивают в общую пробу и массу доводят прободелителем минимум до 10 кг

Число транспортировок в одной поставке	*Минимальное число опробуемых емкостей*
До 15	4
16—25	5
26 и более . . .	6

2. После отбора пробы цемент помещают в герметизированные емкости и надежно маркируют.

3. Составляют протокол отбора и к пробе прилагают его копию, в которой должны быть указаны название цемента, изготовитель или поставщик, поставляемое количество, сроки поставки, день и час взятия пробы, масса пробы и число отдельных проб, номер транспортного средства, фамилия отборщика, подпись взявшего пробу.

Д. *Оценка результатов испытания*

Е. *Пример расчета отпадает.*

Ж. *Причины возможных ошибок опыта*

1. Недостаточное число отдельных проб.
2. Плохое перемешивание общей пробы.
3. Использование недостаточно герметизированных емкостей.

6.1.2. Определение сроков схватывания цемента

А. *Сущность метода*

Начало и конец схватывания — важные характеристики обрабатываемости цемента. Они определяются погружением стальной иглы в цементное тесто нормальной густоты. Количество необходимой для этого воды предварительно определяют путем погружения специального пестика.

Б. *Методика испытания*

Согласно TGL 28 103/02, вып. 7.74.

В. *Приборы и вспомогательные средства*

Игла Вика (TGL 28 103/02); сито 1 мм (TGL 0—4188); кольца из жесткой резины (TGL 26 103/02); стеклянная пластина примерно размером 12×12 см; стеклянный сосуд диаметром 10 см и высотой 15 см; измерительный цилиндр вместимостью 200 см³; весы с разновесами массой по 2 кг; чаша и мешалки (TGL 28 103/02) для ручного перемешивания или специальный смеситель для ме-

ханического перемешивания по TGL 28 103/01; шпатель, ложка; секундомер.

Г. *Проведение испытания*

1. Температура в помещении и приборах должна быть 20±2° С, относительная влажность — не менее 50%.

2. Приготовляют прибор Вика (рис. 57) для измерения нормальной густоты. Вставляют в тесто чистый и сухой пестик 5, снимают дополнительную массу 7, слегка смазывают стеклянную пластинку, прикрепляют пестик так, чтобы маркировка подающего стержня совпадала с нулевым делением миллиметровой шкалы 2.

3. Перемешивают цементное тесто.

Примерно 400 г цемента (при ручном перемешивании) или 600 г (при механическом перемешивании) просеивают через сито 1 мм, оставшиеся комки растирают пальцами.

Перемешивание вручную

Для определения нормальной густоты цементного теста берут 300 г цемента, 75 см³ воды (т. е. 25% по массе) и перемешивают в чаше приблизительно 30 сек, сначала осторожно, а затем энергично — всего 3 мин.

Механическое перемешивание

В емкость для смешивания заливают 125 г воды, добавляют 500 г цемента и сразу же начинают перемешивать. Перемешивание продолжается в течение 60 сек с малой частотой вращения (140 об/мин). Количество воды может быть увеличено «на глаз» в течение первых 30 сек. Количество введенной воды фиксируют в ходе испытания. Переключают на большую скорость и перемешивают еще 120 сек (всего в течение 3 мин).

4. На стеклянную пластинку помещают резиновое кольцо и накладывают лопаткой цементное тесто.

5. Кольцо и пластинку ударяют о стол 4—6 раз; излишки цементного теста снимают шпателем.

6. Наполненное резиновое кольцо со стальной пластиной подвигают под прибор.

7. Не позднее 5 мин после начала перемешивания осторожно подводят пестик к середине поверхности цементного теста и при соприкосновении его поверхностью опускают.

Рис. 57. Прибор Вика́, с помощью которого определяют время схватывания цемента

1 — штатив; *2* — миллиметровая шкала; *3* — стеклянная пластинка; *4* — кольцо из твердой резины; *5* — пестик; *6* — игла; *7* — дополнительный пригруз

Прибор при этом следует предохранять от сотрясений.

8. Считается, что цементное тесто имеет нормальную густоту, когда пестик через 30 сек после опускания на глубину 5—7 мм не доходит до стеклянной пластинки (рис. 58, *а*). Если нормальная густота не достигнута, должна быть изготовлена новая проба цементного теста с корректированием количества воды (обычно водосодержание колеблется от 23 до 30% по массе). Количество воды для получения теста нормальной густоты указывают с точностью 0,5%.

9. Если нормальная густота теста достигнута, снимают пробу и укрывают увлажненным стеклянным сосудом, чтобы предохранить от испарения.

10. Снимают пестик, укрепляют чистую и сухую иглу *6* и увеличивают массу пестика *7* до нормы.

11. Устанавливают иглу на стеклянную пластинку, как в п. 2, на нулевую точку.

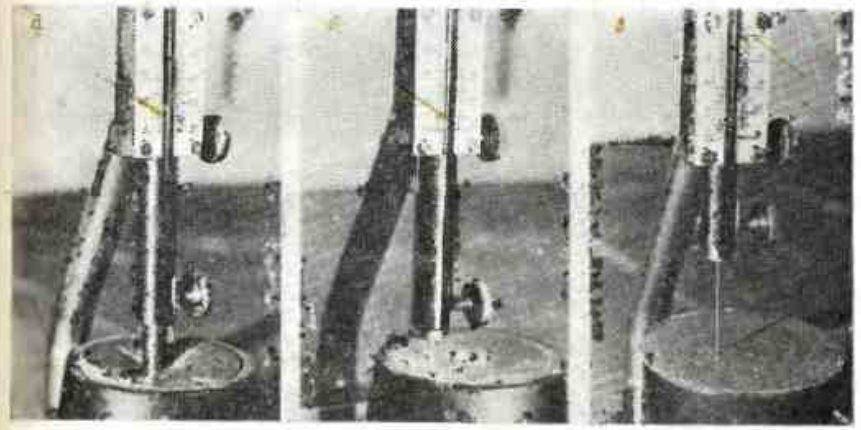


Рис. 58. Определение на приборе Вика́нормальной густоты *а*; начала схватывания *б* и конца схватывания *в*

12. Спустя 55 мин открывают резиновое кольцо (п. 9) и снова помещают на прибор.

13. Подводят иглу к поверхности цементного теста и отпускают. До тех пор пока игла опускается до пластинки, опыт повторяют каждые 10 мин, погружая сухую чистую иглу каждый раз в новое место. В промежутке между опытами покрывают поверхность стеклянным сосудом.

14. Считается, что начало схватывания достигнуто, когда игла останавливается на высоте 3—5 мм над стеклянной пластиной (рис. 58, *б*). Определяют время от начала перемешивания и данные заносят в журнал.

15. Резиновое кольцо с тестом отделяют от стеклянной пластинки и, перевернув, кладут на пластинку, а затем снова укрывают.

16. Иглу юстируют так, чтобы стрелка конуса стояла на нуле шкалы.

17. Для определения конца схватывания подвигают пластинку с резиновым кольцом под иглу и опускают ее каждые 10 мин в различных местах поверхности. Фиксируют время, в течение которого игла опустится в тесто только на 1 мм (рис. 58, *в*). Это время, отсчитанное от начала перемешивания, фиксируют в журнале как конец схватывания.

Д. *Оценка результатов испытания*

Полученные сроки сравнивают со стандартными TGL 28 101 (начало схватывания должно быть не ранее 1 ч, конец — не позже 12 ч). Если полученные сроки не совпадают со стандартными, следует приостановить использование цемента.

Е. *Пример расчета*

Отпадает.

Ж. *Причины возможных ошибок опыта*

1. Пестик или игла грязные или погнуты.
2. Падающий шток заедает.
3. Не учтена дополнительная масса.
4. Игла и (или) пестик не юстированы.
5. Цементное тесто плохо перемешано.

6.1.3. РАВНОМЕРНОСТЬ ИЗМЕНЕНИЯ ОБЪЕМА

А. *Сущность метода*

Изготовленные из цементного теста нормальной густоты цементные лепешки кипятят в воде. По степени изменения внешнего вида лепешки (разрывы, искривления) дают заклю-

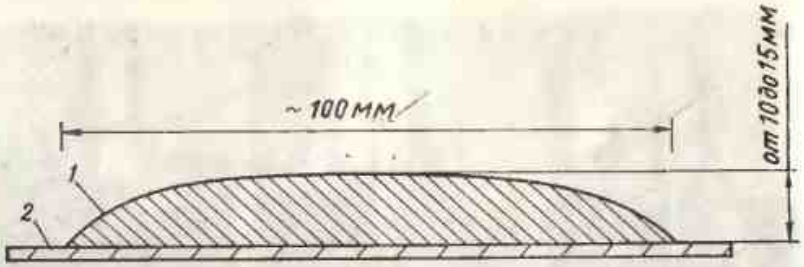


Рис. 59. Разрез цементной лепешки
1 — цементная лепешка; *2* — стеклянная пластинка

чение о равномерности изменения объема. Кипячением определяют наличие свободной извести.

Б. *Методика испытания*

TGL 28 103/03, вып. 7.74.

В. *Приборы и вспомогательные средства*

Сито 1 мм (TGL 0—4188); чаша для перемешивания; ложка; измерительный цилиндр вместимостью 200 см³; стеклянные пластинки размером примерно 12×12 см; сосуд для кипячения; подставка; кипятильник; точные весы с разновесами 2 кг, точностью 0,1 г; эксикатор для внешнего хранения (TGL 103/04); смесительная чаша; мастерок (TGL 28 103/02 и /04).

Г. *Проведение испытания*

1. Температура помещения, приборов, цемента и воды должна быть 20° С±2. Относительная влажность не менее 50%.

2. Примерно 300 г цемента просеивают через сито 1 мм, встречающиеся комки растирают между пальцами.

3. Осторожно перемешивают 200 г цементного теста с количеством воды, установленным для нормальной густоты (по разд. 6.1.2), в течение 30 мин и затем 3 мин перемешивают интенсивно.

4. Поверхность двух стеклянных пластин слегка смачивают минеральным маслом.

5. Две пробы цементного теста (по 75 г каждая) скатывают в шарики и помещают на пластинки.

6. Стеклянные пластинки встряхивают в горизонтальном направлении, пока не получатся лепешки диаметром около 90 мм и толщиной в центре около 10 мм (рис. 59).

7. Лепешки на пластинках сразу оставляют твердеть во влажной среде с не менее чем 80%-ной влажностью.

8. Через 24±2 ч лепешки извлекают из влажной среды, осторожно освобождают от пластин-подставок и помещают на подставку ровной стороной кверху.

9. Подставку с лепешками погружают в сосуд с холодной водой.

10. В течение 15 мин доводят воду до кипения. Во время опыта вода должна покрывать лепешку; при необходимости доливают горячую воду.

11. Лепешку до охлаждения оставляют в воде, затем извлекают и немедленно оценивают ее внешний вид и произошедшие с ней объемные изменения.

Д. *Оценка результатов испытания*

Считается, что опыт с кипячением прошел успешно, если лепешки сохраняют острые грани, не имеют радиальных разрывов, идущих до края, и не имеют сетки трещин, различимых глазом либо с увеличительным стеклом (рис. 60), или объемных изменений.

Искривления должны иметь максимальный размер 2 мм (рис. 61). Это можно определить с помощью линейки. Трещины от усадки, если они появляются иногда до кипения в первые часы после изготовления (рис. 62), не являются указанием на отсутствие равномерности изменения объема.

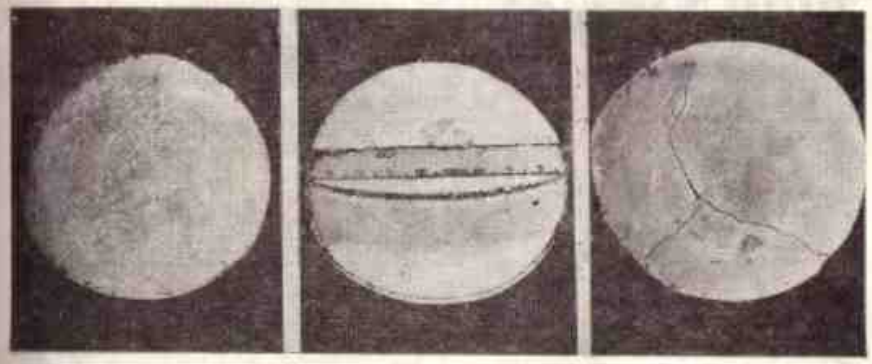


Рис. 60. Цементная лепешка с трещинами из-за неравномерности изменения объема. Испытания на равномерность изменения объема не выдержала

Рис. 61. Цементная лепешка с изогнутой нижней стороной. Испытания на равномерность изменения объема не выдержала

Рис. 62. Цементная лепешка с усадочными трещинами. Причина — сквозняк. Эти разрывы не позволяют судить о качестве цемента

Радиальные разрывы, показывающиеся иногда через некоторое время после кипячения, могут происходить от усадочных напряжений, возникающих при хранении на воздухе. Эти разрывы не являются признаком некачественного цемента.

Если первое испытание кипячением не выдержано, необходимо его повторить с цементом, уложенным на 3 суток слоем 30 мм на воздухе при температуре 20±2° С и относительной влажности не менее 50% (второй опыт с кипячением). Результат этого опыта считать окончательным.

Е. *Пример расчета*

Отпадает.

Ж. *Причины возможных ошибок опыта*

1. Слишком малая влажность в эксикаторе может привести к трещинам от усадки.

2. Изгиб и рассыпание лепешки могут быть вызваны местным перегревом при кипячении.

6.2. Испытание заполнителей

Заполнители существенно влияют на технические свойства и стоимость бетона (см. разд. 4.2 и 4.4). Поэтому обеспечение необходимых параметров должно быть проверено многочисленными стандартными испытаниями. Особое значение при этом имеют контрольное просеивание и оценка влажности. Плотность (удельный вес, объемная масса, насыпная масса), а следовательно, и объем пор зерна (доля пор) или насыпную объемную массу (доля пустот), водопоглощение и водонасыщение требуется определять реже. Дальнейшие испытания сводятся к оценке размера зерен (индекс формы, нарушение формы), прочности (на удар, при сжатии, на истираемость) и наличия вредных примесей, определяемых отмучиванием (при этом удается определить содержание легких частиц, гуминовых кислот, сернистых соединений, растворимых хлоридов).

Рассмотрим методы испытаний, чаще других нужные практику, которые играют непосредственную роль при изготовлении бетона и позволяют решить вопрос, принимать поступающий заполнитель или отказаться от него.

6.2.1. Отбор пробы заполнителя

А. *Сущность метода*

Для того чтобы проба заполнителя была представительной, ряд от-

Таблица 16. Данные о необходимом количестве суммарных проб для тяжелых заполнителей

Наибольший размер зерна, мм	Количество суммарной пробы, кг, определяемой	
	многократно (*А*)	однократно (*Б*)
8	4	4
16	20	10
31,5	64	32
63	96	48

дельных проб объединяют в одну общую пробу.

Б. *Методика испытаний*

ASMW—VW 1199, вып. 12.74.

В. Приборы и вспомогательные средства

Пробоотборники по TGL 23 158/01 (например, ковши, лотки); емкость для сбора проб (TGL 23 158/01 и /03) с плотно закрывающейся крышкой (вместимостью около 10 л); делительный крест или другие делители проб по TGL 21 369; жесть или фольга для подкладки; весы; разновесы на 50 кг с точностью 20 г.

Г. Проведение испытания

1. Если в отдельных стандартах не приведены иные указания, необходимо для одной проверки иметь не менее трех отдельных проб, а для многократной проверки (чтобы получить несколько значений и среднее значение) — по меньшей мере пять отдельных проб, объединенных в одну (табл. 16).

2. Отбор пробы:

а) с действующего транспортера и на выходе из ситовой установки пробоотборником. Между отбором отдельных проб после пуска установки следует пропустить не менее 200 кг материала;

б) с неподвижного транспортера.

Отобрать пробу по всему сечению транспортера; до отбора следующей пробы нужно пропустить такое количество материала, которое соответствовало бы пятикратному количеству пробы. Перед первым отбором пробы пропустить не менее 200 кг материала.

3. Отбор пробы со склада:

а) из штабеля. Пробу отбирают только в исключительных случаях, так как заполнитель при отборе из штабеля расслаивается. Поэтому число отдельных проб по п. 1 должно быть пятикратным (15—25); пробы отбирают равномерно по всему штабелю за исключением нижней и верхней пятой части штабеля;

б) из силосов и бункеров. Пробу из силосов и бункеров отбирают в исключительных случаях. Отбор пробы производят, как указано в п. 4.

4. Отбор проб при отгрузке:

а) на выходе из силосов и бункеров (поступают так же, как указано в п. 2, а). Выходное отверстие открывают полностью или по крайней мере на ширину, отвечающую пятикратному наибольшему размеру зерна;

б) с транспортных устройств (подвижной состав).

Пробоотборником отбирают двойное по сравнению с п. 1 число отдельных проб (6—10); их раскладывают сначала равномерно в лари. Пробу из нижней и верхней частей конуса не берут.

5. Отдельные пробы ссыпают вместе на плотное чистое основание.

6. Если собранная суммарная проба существенно превышает необходимое количество, допускается пробу перерабатывать путем деления до необходимого количества.

7. Деление пробы крестовиной:

а) пробу укладывают лопатой или доской ровным слоем по площади круга;

б) квартуют пробу делительной крестовиной и противолежащие четверти удаляют (рис. 63);

в) убирают делительную крестовину и остаток тщательно перемешивают. Операцию повторяют, если это необходимо, до достижения необходимого количества материала в пробе.

8. Пробу помещают в сосуд для хранения, плотно закрывают и маркируют.

Д. Оценка результатов испытания

Отпадает.

Е. Пример расчета

Отпадает.

Ж. Причины возможных ошибок опыта

1. Недостаточное количество отдельных проб.

2. Отбор проб из верхней или нижней пятой части насыпного конуса или штабеля.

3. Мелкие фракции при отборе пробы не были включены.

6.2.2. Зерновой состав тяжелых заполнителей

А. Сущность метода

Зерновой состав определяют ситовом заполнителя через набор сит. При этом заполнитель классифицируют на отдельные фракции. Каждая фракция ограничена верхним и нижним ситом. Доли отдельных фракций, выраженные в массовых процентах, отнесенные к общей навеске, представляют данную зерновую фракцию.

Б. *Методика испытания*

TGL 24336/7, вып. 6.73.

В. *Приборы и вспомогательные средства*

Набор сит по TGL 7354 с крышкой и поддоном:

а) круглые сита диаметром 20 см (форма А) из сетки с размером отверстий по TGL 0—4188—1; 0,25; 0,5; 1; 2; 4 мм;

б) квадратные сита с ребром 500 мм (форма Б) и размером отверстий по TGL 8252: 2; 4; 8; (11,2); 16; (22,4), 31,5; 63; 125 мм. Весы с точностью взвешивания 0,05% навески по табл. 16. Устройства для просеивания: LSM 500 для сит Б (50×50 см) для зерен размером 2 мм — 63 мм; машина А (TGL 40—1140) для зерен размером меньше 4 мм или любые другие подходящие машины.

Сушильный шкаф; чаша для сушки; прибор для деления проб (делительный крест); плоская кисть; совок.

Г. *Проведение испытания*

1. Необходимо провести три определения (при систематических исследованиях для получения статистических оценок достаточно каждый раз проводить лишь одно определение).

2. Суммарную пробу с помощью делительного креста обновляют с учетом данных, приведенных в табл. 17 и высушивают при температуре

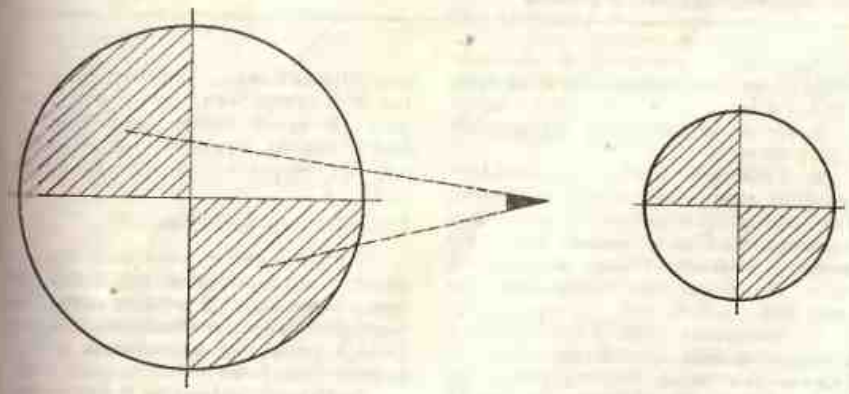


Рис. 63. Принцип деления пробы

Таблица 17. Масса конечной пробы и навески при просеивании

Наибольший размер зерна, мм	Масса конечной пробы, кг, при одном определении	Масса конечной пробы, кг, при трех определениях	Масса навески для одного определения, кг	Загрузка частями
63	30—48	60—96	15—24	2—3
31,5	20—32	40—64	10—16	2—3
16	6—10	12—20	3—5	1
8	1,5—2	3—4	0,7—1	1
2	0,2—0,3	0,4—0,6	0,1—0,15	1

Таблица 18. Оценка пробного просеивания песчано-гравийной смеси 0—32

Зерновой состав, мм	Номер сит						Среднее значение, %	Отверстие сита, мм	Проход, %
	1 [г]	2 [г]	3 [г]	1 [%]	2 [%]	3 [%]			
Навеска	10 450	12 260	11 070	—	—	—	—	—	—
0—0,25	1 801	2 244	2 002	17,3[1]	18,4	18,2	17,9	0,25	17,9
0,25—0,5	1 632	1 743	1 519	15,7	14,3	13,8	14,6	0,5	32,5
0,5—1	1 154	1 329	1 231	11,1	10,9	11,2	11,1	1	43,6
1—2	1 652	1 879	1 747	15,9	15,4	15,9	15,7	2	59,3
1—4	1 300	1 758	1 595	12,5	14,4	14,5	13,8	4	73,1
2—8	1 187	1 330	1 232	11,4	10,9	11,2	11,2	8	84,3
4—16	1 154	1 182	1 044	11,1	9,7	9,5	10,1	16	94,4
16—31,5	427	598	549	4,1	4,9	5	4,7	31,5	100[2]
Зерна размера >31,5	94	134	99	0,9	1,1	0,7	0,9	—	—
Масса	10 401	12 197	11 018	100	100	100	100	—	—
Потеря в весе	49	63	52	0,47	0,51	0,47	0,48	—	—

[1] В %, отнесенных к навеске, равной 100%.
[2] Количество зерен с размером, превышающим наибольший размер, складывается с количеством наибольшей фракции.

105° С до постоянной массы (см. разд. 6.2.5).

3. Путем взвешивания определяют массу сосуда.

4. Конечную пробу делят делительным крестом на четыре части. Из них три части помещают в сосуды и взвешивают. Рассчитывают массу навески и данные вносят в графу 1 табл. 18. Четвертая часть является запасной пробой (см. также п. 13).

5. Выбирают сита в соответствии с определяемым зерновым составом. Если состав таков, что работать с одним набором сит (формы В или А) невозможно, то сначала берут сита для крупных зерен, квадратные (формы В с отверстиями до 2 мм). Прошедшую пробу затем просеивают на более мелких круглых ситах (формы А). Результат заносят по форме табл. 18.

Механическое просеивание

6. Набор сит с поддоном закрепляют в просеивающей машине и навеску помещают на верхнее сито. При заполнителях с наибольшим зерном ≥31,5 мм пробу просеивают в 2—3 приема (см. табл. 17).

Закрывают крышкой и придерживаются следующего времени просева:

для зерен крупностью 2—31,5 мм	3±0,5 мин
то же, 2—>31,5 мм	2±0,5 »
» <2 мм	20±0,5 »

7. Подготавливают емкости соответственно числу фракций зерен.

8. После окончания механического просеивания снимают верхнее сито и путем ручного просеивания над темной бумагой проверяют, проходят ли еще зерна. Прошедшие зерна помещают на следующее мелкое сито. При больших отверстиях застрявшие зерна продавливают шпателем.

9. Остаток переносят с верхнего сита в чашу. Застрявшие на сите остатки удаляют постукиванием о твердую основу и кисточкой и также добавляют в чашу. При просеивании смеси частями отдельные порции с сит помещают в соответствующие чаши.

10. Со всеми остальными ситами поступают в соответствии с указаниями, приведенными в п. 9. Зерновые фракции помещают раздельно в тарированные емкости и взвешивают.

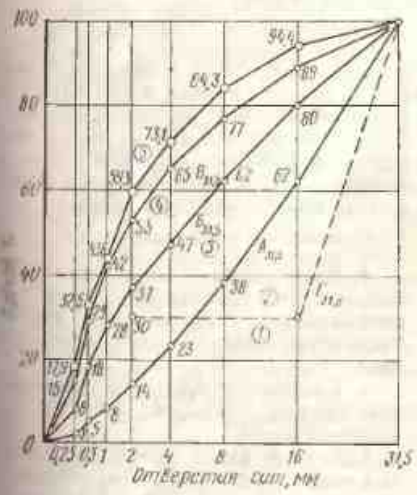


Рис. 64. Результаты ситового анализа по данным табл. 19. Сравнение с граничными линиями просева показывает, что испытанная песчано-гравийная смесь характеризуется слишком мелкими фракциями и должна быть отскорректирована (сравните разд. 4.2.4 и 4.6.3)

Значения массы зерновых фракций вносят в табл. 18. Массу (строка 11) определяют как сумму отдельных фракций, а потерю при просеивании рассчитывают как разность к навеске (строки 1—11). Если потери при просеивании превышают 1% навески, определение следует повторить.

Ручное просеивание

11. Контрольные сита в наборе или в отдельности встряхивают ручную или с помощью вспомогательных средств, например, с применением бегунов. В остальном поступают, как указано в пп. 9 и 10.

12. Повторяют опыт со второй и третьей пробами и вносят значения в графы 2 и 3.

13. Процентное значение фракций, отнесенное к навеске, рассчитывают и вносят в графы 4—6. Если значения массовых процентов для отдельных фракций в количестве до 20% отличаются более чем на 2%, между наибольшими и наименьшими значениями, то проводят четвертый просев, при соблюдении указанных выше условий.

14. В графу 8 заносят результаты просеивания через отдельные сита и суммируют средние значения фракций (графа 7); при этом наибольшие размеры зерен суммируют с наибольшими размерами фракционного состава и получают кривую просеивания (рис. 64).

15. Определяют потери при просеивании в процентах, отнесенные к навеске и показатели вносят в строку 12, графы 4—7.

Г. *Проведение испытания*

Определяют по TGL 22963 или TGL 29077 или путем сравнения предлагаемых областей просеивания (рис. 65) и получают соответствующие оценки: целесообразны, применимы или нецелесообразны.

Д. *Пример расчета*

См. табл. 18. Данные на рис. 64 показывают, что песчано-гравийная смесь находится выше линии просеивания B_{32} и должна быть улучшена добавлением более крупных зерен.

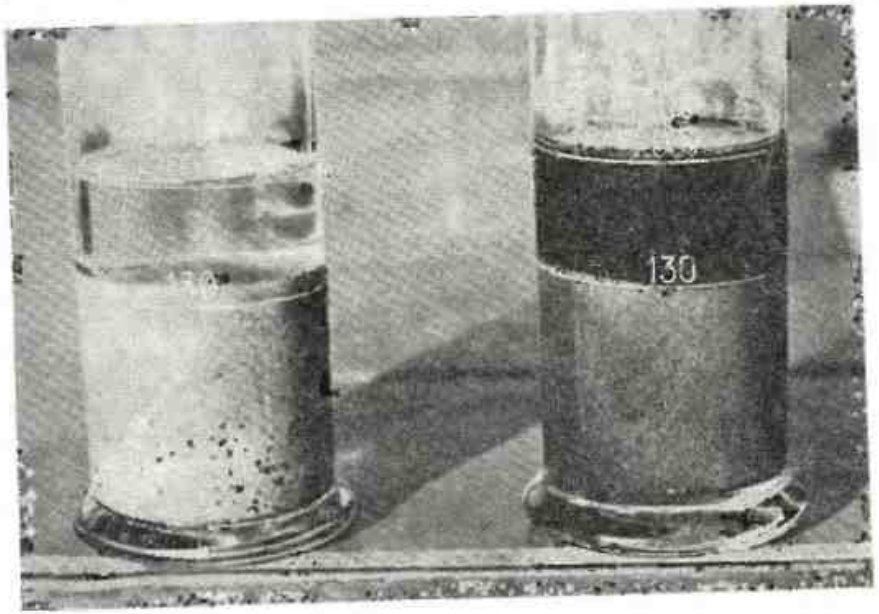


Рис. 65. Темная окраска пробы заполнителя при добавке натриевой щелочи свидетельствует о наличии гуминовых кислот (через 20 ч)

Е. *Причины возможных ошибок опыта*

1. Поврежденные сита
2. Сита недостаточно очищены.
3. Недостаточно времени для просеивания, особенно для мелких зерен.

6.2.3. Отмучиваемые составляющие

А. *Сущность метода*

Отмучиваемые составляющие представляют собой включения размером меньше 0,063 (63 мкм). Пробы заполнителя промывают над ситом с размером ячеек 0,063 мм. Наблюдаемые потери массы в процентах, отнесенные к сухой массе навески, представляют собой содержание отмучиваемых составляющих.

Б. *Методика испытания*

TGL 24336/20, вып. 6.73.

В. *Вспомогательные средства при испытании*

Сита с отверстиями 63 мкм (TGL 0—4188/01), круглые, диаметром 20 см; при необходимости используют защитное сито, например, 8 мм, 1 мм, 0,5 мм; мягкая кисточка; сушильный шкаф с минимальной температурой нагрева 110° С; сосуд для сушки и водного хранения; весы с точностью 0,1% взвешиваемого материала; ложка; делитель пробы.

Г. *Проведение испытания*

1. Необходимо провести два определения. При систематических исследованиях для статистической оценки достаточно сделать одно определение.

2. Суммарную пробу, разделенную делительным прибором, доводят до конечной пробы.

При этом масса конечной пробы для определения доли отмучиваемых составляющих при тяжелых заполнителях должна составлять в зависимости от максимального размера зерна:

Наибольшее зерно, мм	*Масса конечной пробы, примерно, кг*
8	4
16	8
31,5	16
>31,5	32

3. Конечную пробу высушивают в сушильном шкафу при температуре 105±5° С до постоянной массы.

4. Конечную пробу делят на четыре примерно равные части. Две части взвешивают (навески m_1); а две другие части — запасные.

5. Одну навеску (m_1) заливают водой, несколько раз перемешивают и дают ей постоять около 20 мин. Остающиеся частицы глины растирают между пальцами.

6. Сита с отверстиями 0,063, 1 и 8 мм следует насадить одно на другое. При большом количестве заполнителей размером 0—1 мм дополнительно используют еще сито с отверстиями 0,50 мм.

7. Пробу непосредственно перед испытанием интенсивно перемешивают и без осадка (можно частями) выгружают на верхнее сито. Остатки из сосуда смывают.

8. Последовательно, начиная с наибольшего сита, промывают заполнитель струей воды, пока осадок не освободится от отмучиваемых частиц, а проходящая вода не станет светлой.

9. Сито с отверстиями 0,063 мм при промывании дополнительно прочищают кисточкой.

10. Остатки со всех сит помещают в чашу, при этом остаток на сите 0,063 мм осторожно смывают водой.

11. После осаждения мельчайших частиц осторожно сливают светлую воду из чаши.

12. Чашу с остатками просева помещают в сушильный шкаф и высушивают до постоянной массы при температуре 105±5° С.

13. После ручного мокрого просеивания еще раз просеивают пробу сухим способом и определяют сухую массу суммарного остатка (навеска m_2). При механическом мокром просеивании такая операция отпадает.

14. Содержание отмучиваемых составляющих рассчитывают по формуле

$$a = \frac{m_1 - m_2}{m_1} 100,$$

где a — отмучиваемые составляющие, массовые %; m_1 — сухая масса исходной пробы (навеска, г; m_2 — сухая масса промытой пробы (навески), г.

15. Опыт по отмучиванию повторяют со второй пробой.

16. Если разница при $a > 1\%$ между двумя определениями более 10% наименьшего значения, необходимо сделать третье определение. Важно, чтобы округленное до 0,1% среднее арифметическое двух определений отличалось друг от друга менее чем на 10% при $a \leqslant 1\%$; необходимо третье определение, если разница в результатах выше 0,2%. Среднее значение получают тогда из обоих результатов, которые отличаются друг от друга менее чем на 0,2%.

Д. *Оценка результатов испытания*

По TGL 22 963.

Е. *Пример расчета*

При промывании песчано-гравийной смеси размером 0—8 мм получили следующие навески:

1. Опыт:

$$m_1 = 951{,}3 \text{ г};$$

$$m_2 = 934{,}1 \text{ г};$$

$$a = \frac{951{,}3 - 934{,}2}{951{,}3} \cdot 100;$$

$$a = 1{,}80\ \%.$$

2. Опыт:

$$m_1 = 962{,}4 \text{ г};$$

$$m_2 = 945{,}9 \text{ г};$$

$$a = \frac{962{,}4 - 945{,}9}{962{,}4} \cdot 100;$$

$$a = 1{,}71\ \%.$$

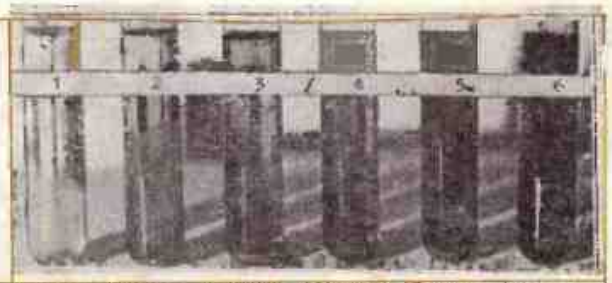
Разность между 1,8 и 1,71% на 0,09% меньше, чем 10% от 1,71, т. е. среднее значение

$$a = \frac{1{,}80 + 1{,}71}{2} = 1{,}75.$$

После округления получаем:

$$a = 0{,}8\ \%.$$

Этот заполнитель соответствует требованиям класса 1 по TGL 22963.



Номер цветового стекла / Критерий цвета	1	2	3	4	5	6
Цвет	Бесцветное	Светло-желтый	Сильно-желтый	Светло-коричневый	Темно-коричневый	Черный
Пригодность	Хорошая	Хорошая	Пригодный	Необходима проверка плотности		Непригодный
Возможное снижение прочности, %	—	—	10–20	25–50	50–100	
	В качестве средней жидкости между 3 и 4 служит раствор $NH_4Fe(SO_4)_2$					

Рис. 66. Эталоны для определения содержания гумуса

Е. Причины возможных ошибок опыта

1. Повреждена сита.
2. Проба не высушена до постоянной массы.
3. Потери при просеивании.

6.2.4. Наличие гуминовых кислот

А. Сущность метода

Пробу заполнителя встряхивают с натриевой щелочью или раствором Na_2CO_3 в стеклянной бутылке. Окраску жидкости сравнивают с цветом растворов $NH_4Fe(SO_4)_2$.

Б. Методика испытания

TGL 24 336/22, вып. 6.73.

В. Приборы и вспомогательные средства

Две бутыли с широким горлом (TGL 7—3304). Минимальная вместимость 300 см³, диаметр 70 мм; две мерные цилиндры с делением 130 и 200 см³; две резиновые пробы; 3%-ный раствор щелочи (30 г NaOH растворяют в 1 л воды) или 7,5%-ный раствор Na_2CO_3 (75 г/л); раствор $NH_4Fe(SO_4)_2$ (10,25 г/л); контрольное сито с размерами ячеек в свету 8 мм.

Г. Проведение испытания

1. Проводят одно определение.
2. Путем деления средней пробы получают приблизительно 1,2 кг конечной пробы. Слипшиеся частички растирают между пальцами. Зерна размером более 8 мм отсеивают. Зерна размером 0—8 мм наполняются до метки на 130 см³.
3. Щелочь или раствор Na_2CO_3 доливается до 200 см³.
4. Бутыли закрывают резиновыми пробками и интенсивно встряхивают. Через 4 ч встряхивание повторяют.
5. Через последующие 20 ч собравшуюся над заполнителем жидкость (рис. 65) сравнивают визуально по цвету с желтой окраской раствора $NH_4Fe(SO_4)_2$, налитого в другую бутыль (рис. 66).

Д. Оценка результатов испытания

По TGL 22 963 или TGL 29 071. Если жидкость над заполнителем имеет более темную окраску, чем эталон, применение заполнителя для раствора или бетона допустимо только по согласованию.

Е. Пример расчета

Отпадает.

Ж. Причины возможных ошибок опыта

Даже небольшое количество примесей угля вызывает темно-коричневую окраску.

6.2.5. Влажность

А. Сущность метода

Имеющаяся на поверхности и в заполнителе влага (поверхностная и внутренняя) испаряется за сутки при 105° С. Доля влаги является массовой долей влажности, отнесенной к массе влажной пробы. Определяется по разности массой до и после высушивания.

Б. Методика испытания

TGL 24 336/07, вып. 3.69.

В. Приборы (или оборудование) и вспомогательные средства

Герметически закрываемые сосуды; сосуды для сушки проб с гладкой некорродирующей внутренней поверхностью (например, эмалированные чаши); сушильный шкаф, рассчитанный на температуру до 110° С, или электроплитка, или газовая горелка со сковородой для сушки; весы со шкалой деления до 10 кг и точностью взвешивания до 1 г.

Г. Проведение испытания

1. Проводят не меньше трех отдельных определений.
2. Конечную пробу отбирают непосредственно у места отбора общей пробы. Деление пробы недопустимо, так как при этом может улетучиться влага. Если определение может быть проведено в течение 15 мин, то пробу помещают непосредственно в сосуды для сушки. Всю пробу, предназначенную для трех отдельных определений, можно хранить в одном сосуде.
3. При взвешивании пробы принимается следующее соотношение между максимальными размерами зерна и малой навески:

Заполнитель с максимальным размером зерна, мм	*Минимальная навеска, г*
2	500
8	2000
16	3500
32	5000
63	10 000.

Пробу помещают в сосуд для сушки, который ставят в сушильный шкаф, и сушат при температуре 105° С до постоянной массы. Считается, что проба имеет постоянную массу, если при двух последующих взвешиваниях с разницей по времени 3 ч масса различается меньше чем на 0,1%.

4. При высушивании на плитке или на горелке (нестандартный метод) пробу постоянно перемешивают и высушивают до тех пор, пока поверхность зерен не окажется сухой. В процессе сушки пробу взвешивают через каждые 15 мин до постоянной массы (см. п. 3).
5. Пробу охлаждают примерно до 30° С и устанавливают вес сухой массы взвешиванием.
6. Количество влаги рассчитывают по формуле

$$f_i = \frac{m_f - m_{tr}}{m_f} 100\,\%,$$

где f_i — доля влажности (массовый %); m_f — масса пробы перед взвешиванием, г; m_{tr} — масса пробы после взвешивания, г; i — номер пробы.

Отклонение трех частных определений должно быть не более 5% (отнесенное к наибольшему значению, например, меньше 0,25% при $f = 5\%$), в противном случае необходимо провести определение с новыми пробами. Среднее значение из трех частных определений рассчитывают и округляют до 0,1%.

Д. Оценка результатов испытания

Отпадает.

Е. Пример расчета

Определяют влажность песчано-гравийной смеси 0—32 мм. При всех трех пробах навеску выбирают в соответствии с данными табл. 19.

Значение влажности f_1 вычисляют по формуле

$$f_1 = \frac{5000 - 4703}{5000} 100 = 5{,}94\%.$$

Ж. Причины возможных ошибок опыта

1. Высушено не до постоянной массы.
2. Потеря влаги из навески.

Таблица 19. Определение влажности

№ отдельной пробы	m_f, г	m_{fr}, г	f, массовые проценты
1	5000	4703	5,94
2	5000	4715	5,70
3	5000	4710	5,80
Среднее значение	—	—	5,8

6.3. Вода затворения

Подготовленную воду (питьевую или промышленную) можно применять для бетонирования без какого-либо исследования. Критически надо оценивать состав воды из открытых водоемов или вновь построенных колодцев, особенно в промышленных районах, болотистых местностях и из месторождений бурого угля. В соответствии с методикой, изложенной в разд. 6.1.2 и 6.1.3, вначале рекомендуется провести испытания, используя для затворения цемента опробуемую и обычную воду. Если окажется, что результаты испытаний не совпадают, это значит, что следует провести комплексное испытание цемента, затворенного этой водой (в том числе и на прочность), которые дадут значительно бо́льшую информацию. В этом случае отбирают приблизительно 5 л воды и в герметически закрытом сосуде посылают в лабораторию. Целесообразно проводить также испытание на пригодность бетона по методике, описанной в разд. 6.4.

Нельзя обойтись без химического анализа воды в том случае, если в результате испытаний по рекомендованным методам невозможно составить полное представление об особенностях местной воды, а можно лишь судить о ее влиянии на поведение цемента. Иногда при затворении этой водой поведение цемента существенно изменяется (допускается снижение прочности до 15%).

Такие работы проводят в строительно-испытательных лабораториях. Результаты анализа можно затем сравнить с требованиями TGL 11 357, разд. 5.1.4, что позволяет сделать вывод о пригодности воды.

6.4. Испытание бетона

О свойствах бетона нельзя судить с требуемой надежностью исходя только из свойств его составляющих. Поэтому необходимы испытания, чтобы проверить правильность выбранного состава и достижение с его помощью требуемых параметров бетонной смеси и бетона.

Бетонную смесь проверяют на консистенцию (время формования, степень заполнения формы, коэффициент уплотнения), содержание воздушных пор (методы прессования, расчет плотности), плотность, состав бетона (анализ бетонной смеси). Для затвердевшего бетона стандартизованы следующие методы испытания: на плотность, объемную массу, пористость, водопоглощение; прочность при сжатии (определение на образцах с их разрушением и без разрушения); испытание на изгиб, истираемость, водонепроницаемость, морозостойкость; показатели изменения E-модуля ползучести при кратковременных и длительных нагружениях; усадка и анализ затвердевшего бетона.

6.4.1. Испытание бетона на прочность

Испытание проводят на отдельных бетонных образцах или пробах. Результаты испытания используют для проектирования смеси (применения) или оценки качества (определение марки) и проверки кинетики изменения прочности (проверка на прочность при выпуске продукции).

Проверка качества бетона

Испытание проводят перед началом строительства или перед тем как принять бетон. При этом устанавливают, каким должен быть состав бетона, чтобы бетонная смесь отвечала заданным требованиям (консистенция, склонность к расслаиванию при транспортировании, укладка и уплотнение), так же как и свойства затвердевшего бетона (в первую очередь прочность при сжатии). В разд. 4.5 уже было показано, что при оценке пригодности бетона путем его испытания на сжатие можно проследить определенные конечные показатели прочности, учитывающие разброс прочности бетона.

Бетон должен быть изготовлен одинаковой консистенции и иметь одинаковую плотность как на стройке, так и на заводе. Соответственно объемные массы образцов должны совпадать с запроектированными (максимальное отклонение 3%). Хранят испытуемые образцы при стандартных условиях (см. разд. 6.4.5).

Испытание на прочность

Марку бетона определяют во время строительных работ или при испытании выпускаемой продукции с целью установить, достигнута ли требуемая прочность при сжатии.

К уплотнению и объемной массе бетонных образцов предъявляются те же требования, что и к испытанию на пригодность. Образцы для испытания также хранят в стандартных условиях (см. разд. 6.4.5). При испытании на прочность выявляется разброс данных, который следует объяснить изменением свойств цемента или заполнителя вследствие неточной дозировки составляющих, недостаточного перемешивания и разброса результатов испытания.

Определение кинетики твердения в условиях строительства

Образцы в этом случае, как и в двух предыдущих, уплотняют, но в отличие от описанных выше испытаний условия проведения опытов приближаются к условиям, характерным для стройки. Результаты испытания образцов, твердеющих в производственных условиях, позволяют сделать заключение о фактическом состоянии бетона (его прочности, объемной массе) к определенному моменту твердения.

На основе полученных данных можно определять время распалубки и выдачи продукции, а также установить момент для передачи предварительного напряжения на арматуру.

6.4.2. Отбор проб бетонной смеси

А. *Сущность метода*

Отбор проб должен обеспечивать их представительность. Бетонная смесь, используемая для испытания на пригодность может быть изготовлена в лабораторной мешалке, если смесительный узел еще не оборудован.

Б. *Методика испытания*

Согласно TGL 21 093/01, вып. 12.69.

TGL 21 094/01, вып. 12.69.

В. *Оборудование и вспомогательные средства*

Емкость или бак; лопата; герметически закрытые сосуды для проб вместимостью до 15 дм³.

Г. *Проведение испытания*

1. Необходимо отобрать следующие пробы:

для изготовления кубика с ребром 20 см — 10 дм³;

для определения удобоукладываемости (одно определение) — 6 дм³;

для уплотнения (на одно определение) — 20 дм³.

2. Место отбора:

а) при определении консистенции:

во время проверки на пригодность — из смесительного узла или лабораторного смесителя;

при дальнейших определениях формуемости — на месте использования, чтобы учесть влияние условий транспортирования;

для транспортируемого бетона — на месте укладки количество проб отбирают из трех мест на различной высоте транспортной емкости;

б) при изготовлении образцов для испытаний:

из смесителя или автосмесителя (при транспортировании на дальнее расстояние), а при введении порообразующих веществ — на месте использования;

при испытании на пригодность из одной пробы смеси изготовляется

несколько, но не менее трех образцов;

при определении марки и кинетики твердения — по одному кубику из смеси на каждый срок испытания; если оба испытания для сравнения проводятся параллельно, следует взять материал для обоих кубиков из одной и той же смеси;

при транспортировании по трубам берут на выходе из трубы несколько проб через короткие промежутки времени;

о частоте отбора проб см. разд. 6.4.7.

3. Метод отбора пробы

Во время разгрузки (смесителя, бадьи, подачи по трубам) отбирают несколько отдельных проб и помещают, например, в чистый, смоченной водой баек, тщательно перемешивают и немедленно укрывают влажной тканью.

4. Испытания бетонной смеси, как и изготовление образцов для испытания, проводят вблизи места отбора пробы. Если это невозможно, бетон помещают в увлажненные емкости и закрывают от доступа воздуха.

5. Во время транспортирования пробу защищают от испарения воды, увлажнения, нагрева, мороза, сильного сотрясения.

6. Пробу как можно быстрее подготавливают к испытанию и испытывают. Консистенцию определяют не позже чем через 20 мин. К формированию образцов-кубиков следует приступать не позднее чем через 2 ч после изготовления смеси.

7. Перед формованием или испытанием образцов смесь еще раз тщательно перемешивают.

Д. *Оценка результатов испытания*

Отпадает.

Е. *Пример расчета*

Отпадает.

Ж. *Причина возможных ошибок опыта*

1. Отбор пробы из верхнего, с повышенным содержанием воды слоя уже уплотненного бетона (например, после транспортирования).

2. Отбор проб в начале или конце очистки смесителя.

6.4.3. Оценка консистенции по степени уплотнения

А. *Сущность метода*

Бетонную смесь помещают в емкость и тщательно уплотняют. Степень уплотнения определяют путем деления высоты заполнения на высоту уплотненной бетонной призмы. Чем жестче смесь, тем менее плотно укладывается она при обычном заполнении. С увеличением жесткости время уплотнения возрастает.

Б. *Методика испытания*

TGL 21 093/02, вып. 12.69.

В. *Приборы и вспомогательные средства*

Плотно подогнанная стальная форма высотой 40 см, сечением 20×20 см или форма куба с насадкой; штыковка трапециевидная длиной 19 см шириной 13,5 и 10,5 см². Линейка из металла для выравнивания; измеритель длиной 200 мм; прибор или приспособление для уплотнения (в зависимости от консистенции применяют вибростол, внутренний вибратор, трамбовку, штыковку); ткань, пластиковая фольга.

Г. *Проведение испытания*

1. Обязательно проводят два испытания.

2. Полный совок бетонной смеси высыпают вдоль ребра в емкость, пока она слегка не переполнится.

3. Избыток бетонной смеси срезают без уплотнения (рис. 67).

4. Тщательно уплотняют бетонную смесь методом, соответствующим данной консистенции: вибрированием, трамбованием, штыкованием.

5. Выступающую часть бетона уплотняют трамбованием.

6. Во всех четырех углах формы измеряют осадку (отрезок a) от края сосуда до поверхности бетона с точностью до 1 мм (рис. 68) и вычисляют среднее арифметическое значение.

7. Вычисляют степень уплотнения (рис. 69) по формуле

$$v = \frac{40}{40 - a},$$

где v — степень уплотнения; a — осадка, см; 40 — высота сосуда, см

Рис. 67. Измерение консистенции путем определения степени уплотнения. Форма заполнена неуплотненным бетоном

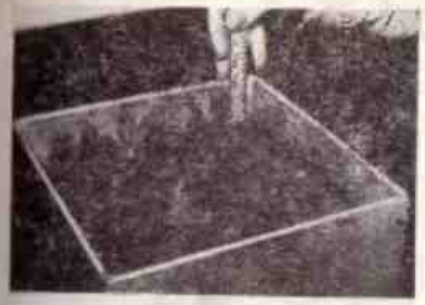


Рис. 68. Измерение консистенции путем определения степени уплотнения. Бетонная смесь уплотнилась; измеряется осадка по углам

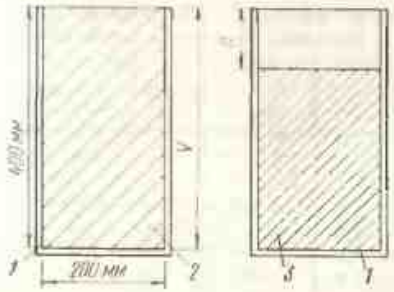


Рис. 69. Схема измерения консистенции путем определения степени уплотнения

1 — форма; 2 — неуплотненный бетон; 3 — уплотненный бетон

Д. *Оценка результатов испытания*

По табл. 20.

Е. *Пример расчета*

Измеряют следующие значения a:

$a_1 = 7{,}4$ см; $a_2 = 6{,}8$ см; $a_3 = 7{,}0$ см; $a_4 = 7{,}2$ см;

$$a = \frac{a_1 + a_2 + a_3 + a_4}{4} \times$$

$$\times \frac{7{,}4 + 6{,}8 + 7{,}0 + 7{,}2}{4} = 7{,}1 \text{ см}.$$

Рассчитывают степень уплотнения

$$v_1 = \frac{40}{40 - 7{,}1} = 1{,}22.$$

Получают результат второго определения $v_2 = 1{,}20$ и среднее значение $v = 1{,}21$. Консистенцию определяют по данным табл. 20; она равна v_3 (мягкая).

Ж. *Причины возможных ошибок опыта*

1. Неправильно уложена бетонная смесь.

2. Недостаточно уплотнена бетонная смесь.

3. Потеря смеси из-за вытекания или выброса из неплотной формы.

Таблица 20. Предельные значения консистенции бетонной смеси и методика их оценки согласно TGL 21093/02

	Пределы консистенции	Степень уплотнения по формуле 6	Осадка конуса, мм
V_1	Жесткая	1,50...1,32	1
V_2	От жесткой до пластичной	1,37...1,24	1...4
V_3	Пластичная	1,23...1,12	5...14
V_4	От пластичной до литой	1,11...1,06	15...60
V_5	Литая	1,05...1,00	60

6.4.4. Проверка консистенции по осадке конуса

А. *Сущность метода*

Отформованный в металлической форме бетонный конус после распалубки оседает. Разность конечной и первоначальной высоты (в мм) определяется как осадка конуса.

Б. *Методика испытания*

TGL 31 093/02, вып. 12.62.

В. *Оборудование и вспомогательные средства*

Металлическая форма в виде усеченного конуса с верхним и нижним диаметрами соответственно 10 и 20 мм.

Г. *Проведение испытания*

1. Обязательно проводят два раздельных испытания.

2. Доску для подкладки прочно устанавливают в горизонтальное положение и размещают стальную форму с насадкой.

3. Бетонную смесь подают совком в три равновысоких слоя и каждый слой уплотняют штыковкой 25 ударами. Форма не должна отрываться от поддона.

4. Снимают насадку и выравнивают поверхность бетонной смеси заподлицо с краем стальной формы.

5. Осторожно поднимают вертикально вверх металлический конус; при этом образуется усеченный конус.

6. Стальную форму ставят рядом с отформованным конусом и линейкой измеряют его высоту.

7. С помощью измерительной линейки с точностью до миллиметра определяют разность между положением линейки и наименьшей высотой усеченного конуса (рис. 70).

8. Вычисляют среднее значение из обоих измерений и округляют до 1 мм.

Д. *Оценка результатов испытания*

По табл. 20.

Е. *Пример расчета*

Результаты обоих опытов показали: s_1=29 мм, s_2=31 мм, среднее значение s=30 мм. Консистенция по табл. 20 равна v_4 (от мягкой до текучей).

Ж. *Причины возможных ошибок опыта*

1. Неравномерное уплотнение.
2. Металлический конус поднят не вертикально.
3. Сотрясение при распалубке.
4. Неровные верхние ребра металлического конуса.

Рис. 70. Измерение консистенции по величине осадки конуса

6.4.5. Изготовление и хранение бетонных образцов-кубов

А. *Сущность метода*

Изготовляют кубы с определенной длиной ребра в условиях, наиболее приближающихся к условиям уплотнения на стройке или на заводе; образцы хранят в помещении при нормированном температурно-влажностном режиме.

Б. *Методика испытания*

TGL 21 094/04, вып. 12.69.

В. *Приборы и вспомогательные средства*

Формы для кубов, разъемные, с длиной ребра 10, 20 или 30 см; насадка с минимальной высотой, равной высоте куба; шпатель (при уплотнении штыкованием); прибор для уплотнения (вибраторы, штыковка), стальная линейка; совок; камера водного хранения образцов; термостат; ткань или пластик.

Г. *Проведение испытания*

1. Как правило, выбирают кубы с размером ребра 20 см. Размер формы зависит от размера заполнителя. Наименьший размер формы должен быть по меньшей мере в 4 раза больше максимального размера зерна смеси.

2. Внутренние поверхности формы слегка смазывают маслом или жиром.

3. Если необходимо определить объемную массу бетонной смеси, формы, согласно рекомендациям, изложенным в разд. 6.4.6, подготавливают и взвешивают.

4. Насадку следует плотно насадить на форму.

5. Берут среднюю пробу (см. разд. 6.4.2).

6. Бетонную смесь помещают в форму и, насколько позволяет консистенция, вибрацией без расслоения и сильного водоотделения уплотняют (сила вибрации не должна превышать ту, которая предусмотрена технологией производства). Высоту заполнения принимают такой, чтобы после уплотнения бетонная смесь возвышалась над краем формы на 2—3 см. При жесткой бетонной смеси форму заполняют почти до верха насадки.

а) при уплотнении на виброплощадке форму жестко прикрепляют к плоскости стола и подвергают вибрации до тех пор, пока заметно прекратится выход больших пузырьков воздуха;

б) при уплотнении глубинным вибратором (диаметр наконечника более 35 мм) быстро опускают вибратор в середину образца, не доходя примерно 2 см до дна, и смесь подвергают вибрации до прекращения выхода больших пузырьков, после чего вибратор медленно вынимают, чтобы освободившееся пространство снова затянулось смесью. При диаметре вибрирующего наконечника 35 мм и меньше в кубах с ребром 20 и 30 см его опускают дополнительно во всех углах формы;

в) при жидкой консистенции уплотняют смесь штыкованием. Для этого укладывают бетонную смесь в два слоя, причем каждый слой у стенок формы уплотняют штыкованием и стержнем так, чтобы бетон укладывался возможно плотнее. Перед нанесением второго слоя первый слой бетонной смеси несколько разрыхляют шпателем.

7. Снимают насадку; избыточный бетон стальной линейкой выравнивают с краем формы и заглаживают без добавки смеси.

8. Если необходимо определить объемную массу, заполненную форму взвешивают (см. разд. 6.4.6).

Хранение.

Испытание на пригодность и марку.

9. Изготовленные пробы хранят в закрытом помещении при температуре 20±3° С, их укрывают мокрой тканью, чтобы предохранить от испарения влаги.

10. После того как образцы достаточно упрочнились (как правило, через 24 ч, а для медленно твердеющих бетонов через 48 ч) их осторожно распалубливают и надежно маркируют.

11. Изготовленные пробы в возрасте до 7 сут помещают на решетках в ванну, наполненную водой с температурой 20±3° С, или в камеру влажного хранения (температура 20±3° С,

минимальная относительная влажность воздуха 95%). Допускается также в процессе хранения покрывать образцы увлажняемыми песком или опилками.

12. После влажного хранения пробы до срока испытания (как правило, в возрасте 28 сут) помещают в сухой стандартный климат (температура среды 20±3° С, влажность воздуха 65%±10%).

Определение кинетики твердения

13. Образцы в форме, а также после распалубки хранят в таких условиях, при которых процессы тепло- и влагообмена возможно полнее соответствуют условиям твердения бетона на строительной площадке или на предприятиях сборного железобетона.

Д. *Оценка результатов испытания*

Отпадает.

Е. *Пример расчета*

Отпадает.

Ж. *Причины возможных ошибок опыта*

1. Неравномерное уплотнение.
2. Температура пола снижает скорость твердения, если не подложены решетки.
3. Вытекает цементное тесто (при неплотных формах).

6.4.6. Объемная масса бетонной смеси

А. *Сущность метода*

Бетонную смесь помещают в сосуд известной массы и объема, уплотняют и взвешивают. Если разделить массу бетона на объем, то получим объемную массу бетонной смеси в кг/дм³. Это определение делается, как правило, в связи с изготовлением образцов, предназначенных для испытания на сжатие (см. разд. 6.4.5).

Б. *Методика испытания*

Не стандартизовано.

В. *Оборудование и вспомогательные средства*

Кубик с ребром 20 см; насадка; стальная линейка; прибор для уплотнения; шаблон; весы; разновесы до 50 кг с точностью 20 г.

Г. *Проведение испытания*

1. Размеры куба измеряют с точностью до 0,1 см и рассчитывают объем по формуле

$$V=\frac{lbh}{1000},$$

где V — объем формы, дм³; l — длина, см; b — ширина, см; h — высота, см

2. Пустую форму, взвесив с точностью до 0,1 кг, маркируют и снабжают насадкой.

3. Заполняют бетонной смесью и уплотняют (см. разд. 6.4.5). Снимают насадку и избыточную смесь удаляют.

4. Заполненную форму взвешивают (m_1) и рассчитывают объемную массу бетонной смеси, округляя до двух знаков после запятой

$$\gamma_{fr}=\frac{m_1-m_2}{V},$$

где γ_{fr} — объемная масса бетонной смеси, кг/дм³; m_1 — масса наполненной формы, кг; m_2 — масса пустой формы, кг; V — объем формы, дм³

5. По возможности выполняют несколько определений и вычисляют среднее арифметическое значение.

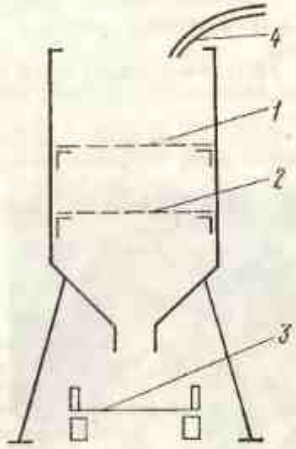


Рис. 71. Схема приспособления для отмывки бетонной смеси

1 — сито с размером ячеек 4 мм; 2 — сито с размером ячеек 1 мм; 3 — сито с размером ячеек 0,25 мм; 4 — патрубок

Д. *Оценка результатов испытания*

Отпадает.

Е. *Пример расчета*

Для формы кубика установлены следующие размеры:

длина l, см	20
ширина b, см	20,1
высота h, см	20

Объем рассчитывают по формуле

$$V=\frac{20\cdot 20{,}1\cdot 20}{1000};$$

$$V=8{,}040\ \text{дм}^3.$$

Масса пустой формы (m_2) 23,9 кг, заполненной бетонной смесью и уплотненной (m_1), 43,1 кг.

Объемная масса бетонной смеси будет

$$\gamma_{fr}=\frac{43{,}1-23{,}9}{8{,}040}=2{,}39\ \text{кг/дм}^3.$$

Ж. *Причины возможных ошибок опыта*

1. Стенки форм не параллельны.
2. Образцы распалублены неаккуратно.
3. Неплотная форма. Вытекает вода или цементное тесто.
4. Недостаточное и неравномерное уплотнение.

6.4.7. Анализ бетонной смеси

А. *Сущность метода*

При анализе бетонной смеси определяют массовые части цемента, заполнителя и воды. Анализируя бетонную смесь, можно путем сушки определить водосодержание, а на другой пробе путем промывания — содержание наименьших частиц размером менее 0,25 мм. Промытая часть состоит из цемента и заполнителя размером менее 0,25 мм. Для расчета истинного содержания заполнителя параллельно мокрым просевом определяют количество частиц размером менее 0,25 мм. Содержание цемента устанавливают по разности между массой взятой пробы и массой воды и заполнителя.

Б. *Методика испытания*

Согласно TGL 21 093/04, вып. 12.70.

В. *Приборы и вспомогательные средства*

Весы, предел взвешивания 10 кг, точность взвешивания до 1 г; нержавеющие, герметически закрывающиеся металлические сосуды вместимостью 10 л; металлические чаши диаметром около 40 см и высотой 20 см; сильный источник тепла (электрокипятильник или газовая горелка для сушки); фарфоровые или металлические чаши диаметром около 50 см; сита 0,25 мм для рассева; защитные сита 1 и 4 мм; мастерок; мерный цилиндр (1000 мл); лопатка; резиновая трубка и, по возможности, приспособление для промывки (рис. 71).

Г. *Проведение испытания*

1. Берут пробу бетонной смеси (см. разд. 6.4.2) общей массой в зависимости от наибольшего размера зерна по табл. 21. Пробу отбирают немедленно после окончания перемешивания и не позже чем через 10 мин передают в герметически закрытом сосуде в лаборатории, где сразу же проводят испытание.

2. Если нельзя избежать промежуточного хранения пробы (более 30 мин), то к общей массе добавляют кристаллическую фосфорную кислоту в количестве 0,5% от навески цемента для замедления гидратации. Пробу хранят в герметически закрытом сосуде.

3. Высушивание и промывание проводят параллельно два лаборанта. Если в лаборатории только один лаборант, то сначала он высушивает пробу, а затем промывает.

4. Тарируют чашу и помещают 50 кг бетонной смеси (наибольший размер зерна 31,5 мм) с точностью до 1 г (m_1) для высушивания.

5. Тарируют емкость вместимостью 10 л; 50 кг бетонной смеси (наибольший размер зерна 31,5 мм) с точностью до 1 г (m_2) и замеши-

Таблица 21. Количество пробы для анализа бетонной смеси

Наибольший размер зерна, мм	Наибольшее значение для общей массы бетонной смеси, кг	Минимальная масса пробы, кг
2	3	1
8	7	3
31,5	12	5
63	25	10

вают приблизительно с 2 л воды (проба для промывания).

Определение водосодержания (проба на высушивание)

6. Сосуд, содержащий 50 кг±1 г бетонной смеси, нагревают и при постоянном перемешивании смесь возможно быстрее высушивают до постоянной массы (до тех пор, пока не исчезнут комки). Высушивание должно быть окончено максимум через 15 мин. Стеклянная пластинка при выдерживании над пробой не должна запотевать.

7. Пробу охлаждают и взвешивают, определяют количество высушенной массы m_{tr}.

8. Водосодержание пробы рассчитывают по формуле

$$m_{wp} = m_1 - m_{tr},$$

где m_{wp} — водосодержание исходной пробы, г; m_1 — водосодержание пробы перед сушкой, г; m_{tr} — высушенная масса, г.

Опыт промывания пробы.

9. Защитные сита (например, размером ячейки 4 и 1 мм) надевают на сито 0,25 мм и подготавливают установку для промывания (рис. 71).

10. Пробу m_2 помещают на верхнее защитное сито и с помощью трубки промывают чистой водой через сита. Отмывка считается законченной, когда через сито 0,25 мм идет чистая вода.

11. Общую массу остатков на ситах помещают в тарированный сосуд и высушивают до постоянной массы.

12. Пробу охлаждают и просеивают над белой бумагой. Общую массу остатка с частицами >0,25 мм взвешивают (общая масса m_{ktr}).

13. Зерна размером <0,25 мм (n) у заполнителей определяют параллельно мокрым рассевом. Заполнитель с пробой (табл. 21) заливают в сосуде теплой водой, еще раз интенсивно перемешивают и затем аналогично пп. 9—11 просеивают на защитных ситах. Количество мелких зерен определяют согласно рекомендациям, изложенным в разд. 6.2.3.

14. Массу пробы заполнителя рассчитывают по формуле

$$m_{kp} = \frac{100 \cdot m_{ktr}}{100 - n},$$

где m_{kp} — масса заполнителя пробы, г; m_{ktr} — общая масса высушенной до постоянной массы сухих остатков на ситах, г; n — общее количество заполнителей размером <0,25 мм, полученное мокрым рассевом аналогично п. 13 (массовый процент).

15. Зерновой состав сухих заполнителей определяют по методике, изложенной в разд. 6.2.2.

16. Содержание цемента в пробе рассчитывают по формуле

$$m_{zp} = m_1 - (m_{wp} + m_{kp}).$$

17. Рассчитывают соотношение компонентов:

$$1 : k : w = \frac{m_{zp}}{m_{zp}} : \frac{m_{kp}}{m_{zp}} : \frac{m_{wp}}{m_{zp}},$$

где k — отношение заполнителя к цементу; w — водоцементное отношение

18. Массовую часть на 1 м³ бетона вычисляют по формуле

$$Z = \frac{\gamma_{треб}\ (\text{или}\ \gamma_{fr})}{1 + k + w},$$

где $k = Zz$; $W = Zw$; Z — масса цемента, кг/м³; k — масса заполнителя, кг/м³; W — масса воды, кг/м³; $\gamma_{треб}$ — проектируемая объемная масса бетонной смеси, кг/м³ (рассчитывают по методике, приведенной в разд. 4.6.3, из требуемых соотношений смеси, при этом учитывают объем пор); γ_{fr} — объемная масса бетонной смеси (определяют по методике, изложенной в разд. 6.4.6)

Таблица 22. Результаты опыта промывки

Ход работы	Формула	Метод расчета
Определение водосодержания в полевой пробе (опыт сушки)	$m_{wp} = m_1 - m_{tr}$	$m_1 = 5000$ г (мокрая масса) $m_{tr} = 4656$ г (сухая масса) $m_1 - m_{tr} = m_{wp} = 344$ г (содержание воды)
Содержание цемента и заполнителей в полевой пробе	$m_{ktr} = \frac{m_{ktr} \cdot 100}{100 - (n_1 + n_2)}$ $m_{zp} = m_1 - (m_{wp} + m_{kp})$	Содержание заполнителя крупностью 0—0,25 мм $n_1 = 4{,}2\%$ (из опытного просеивания) $n_2 = 0{,}4\%$ (комки и корки) $n_1 + n_2 = 4{,}6\%$ $m_{ktr} = 3749$ г (заполнитель без зерен размером 0—0,25 мм) $m_{kp} = \frac{3749 \cdot 100}{100 - (4{,}2 + 0{,}4)}$ (заполнитель с зернами размером 0—0,25 мм) $m_{kp} = 3930$ г $m_{zp} = 5000 - (344 + 3930)$ $m_{zp} = 726$ г содержание цемента
Расчет соотношений компонентов смеси	$\frac{m_{zp}}{m_{zp}} : \frac{m_{kp}}{m_{zp}} : \frac{m_{wp}}{m_{zp}}$ $z : k : w$	$\frac{726}{726} : \frac{3930}{726} : \frac{344}{726}$ $1 : 5{,}42 : 0{,}475$
Расчет соотношения смеси для 1 м³ бетона	$Z = \frac{\gamma_{треб}\ \text{или}\ \gamma_{fr}}{1 + k + w}$ $K = Z \cdot k$ $W = Z \cdot w$	γ_{fr} 2360 кг/м³ (измеренная плотность свежеприготовленного бетона) $\gamma_{треб}$ кг/м³ (объемная масса бетонной смеси, определенная из расчетных данных плотности свежеприготовленного бетона с учетом пористости) $Z = \frac{2360}{1 + 5{,}42 + 0{,}475}$; $Z = 342$ кг/м³ (количество цемента) $K = 342 \cdot 5{,}42 = 1852$ кг/м³ (количество заполнителя) $W = 342 \cdot 0{,}475 = 162{,}5$ кг/м³ (количество воды)

Д. Оценка результатов испытания

Сравнение с требуемым соотношением.

Е. Пример расчета

С учетом данных, изложенных в табл. 22.

Ж. Причины возможных ошибок

Опыт высушивания

1. Чрезвычайно длительное промежуточное хранение бетонной смеси без добавки фосфорной кислоты.
2. Высушивание происходило слишком долго и не до постоянной массы.
3. Потеря материала.

Опыт промывки

1. Количество зерен наименьшего размера в бетонной пробе изменилось по сравнению с опытами по рассеву заполнителя.
2. Повышенное содержание измельченных частиц вследствие длительного перемешивания.
3. Потери при промывании

6.4.8. Определение предела прочности бетона при сжатии

Образцы, изготовленные по методике, описанной в разд. 6.4.5, и хранившиеся в соответствии с указаниями TGL 21 094/04, испытывают на сжатие по TGL 21 094/04, вып. 12.69. Здесь это испытание не описывается, так как его следует проводить на прессах, на которых работают лаборанты, имеющие соответствующую подготовку. Однако технолог, который отправил кубы со строительства или с завода в лабораторию на испытание, должен уметь оценить результаты, чтобы доказать правильность выбранной марки бетона. В разд. 4.5 уже объяснилось, что прочность бетона по выборочным пробам определяют путем статистической оценки. При этом необходимо доказать, что предел прочности при сжатии обеспечивает $R_{2,3\%}$ требуемую контрольную прочность (см. табл. 11). Способ расчета по ASMW—VW 968 «Определение предела прочности при сжатии для бетона» описан ниже.

Отбор пробы и количество испытаний

Необходимо отбирать пробы с промежутками не более чем 100 замесов смесителя без предупреждения об изготовлении образцов кубов из смеси. Независимо от этого следует обеспечивать количество испытаний:

на бетонных заводах с месячной продукцией менее 400 замесов смесителя — по крайней мере, еженедельно один куб для оценки бетона каждой марки;

для строительства с объектом или частью объекта с менее чем 300 замесов смесителя — по крайней мере, три куба для оценки бетона каждой марки и, по меньшей мере, один куб при бетонировании с использованием более 10 замесов.

Паспорт и выборочная проба

В паспорте указывают число замесов N в зависимости от времени или их количества для определенной марки бетона.

На стационарных и передвижных бетонных заводах, а также на крупных стройках с центральным смесительным узлом в одном паспорте указывается ежемесячно изготовленное в одинаковых условиях число замесов в смесителе для одной и той же марки бетона.

На средних или малых строительных площадках в паспорте проставляется транспортируемое на объект количество бетона определенной марки.

Изготовленное для паспорта и испытанное количество опытных кубов обозначается как выборочная проба n. Все стоящие над средней плотностью результаты испытаний относятся к выборочной пробе.

Проведение испытания и анализ результатов.

Результаты испытаний бетона на сжатие необходимо раздельно занести в контрольные карточки в зависимости от его марки (табл. 23). Должны быть охвачены все значения выборочной пробы, даже те, которые отклоняются от заданных. Помимо предела прочности на сжатие в контрольные карточки также вносят определяемые при этом объемные массы бетона. Это дает дополнительную информацию о полном уплотнении. Как правило, более высокой плотности отвечает бо́льшая точность замеров.

Таблица 23. Пример определения прочности бетона В возрасте 28 сут с применением контрольной карты

Стр. 2 Норм DAMW – VW 968

Контрольная карта определения предела прочности бетона при сжатии

Бетонный завод Стройка — Марка В 225 — Изделие Элемент — Метод 1 ед

№ п/п	День изготовления		γ кг/дм³	R_i	$R_i < \bar{x}$ МПа
1	8.07	28	2,28	21,2	21,2
2		"	2,30	23,6	23,6
3		"	2,29	25,1	
4	9.07	"	2,27	22,7	22,7
5		"	2,30	23,1	23,1
6		"	2,32	27,5	
7	10.07	"	2,27	20,3	20,3
8		"	2,28	22,9	22,9
9		"	2,30	24,1	
10	11.07	"	2,29	19,8	19,8
11		"	2,32	23,3	23,3
12		"	2,31	25,8	
13	12.07	"	2,28	23,9	
14		"	2,27	24,7	
15		"	2,29	24,3	
16	15.07	"	2,31	26,7	
17		"	2,30	22,4	22,4
18		"	2,31	23,7	
19	16.07	"	2,33	25,2	
20		"	2,29	22,1	22,1
21		"	2,28	24,9	
22	17.07	"	2,31	24,4	
23		"	2,27	21,8	21,8
24		"	2,30	23,2	23,2
25	18.07	"	2,32	26,2	
26		"	2,29	23,8	
27		"	2,30	23,4	23,4
28	19.07	"	2,28	25,9	
29		"	2,31	24,7	
30		"	2,27	21,5	21,5
Средняя объемная масса, кг/дм³			$\bar{\gamma}_3$=2,28	712,2	311,3 = Σ

Изменение прочности и частотны диаграмма x_k 200 20 40 60 80 300

15
10
5

$\bar{R} = \Sigma R_i/n = 712,2/30 = 23,7$ МПа

$\bar{R}' = \Sigma(R_i < \bar{R})/n = 311,3/14 = 22,2$ МПа

$R_{2,3\%} = \bar{R} - 1,25(\bar{R} - \bar{R}')\cdot t_n = 23,7 - 1,25\cdot 1,5\cdot 2$

$R_{2,3\%} = 20,0$ МПа $> x_k = 19$ МПа

Стандартное отклонение $s = 1,25(\bar{R} - \bar{R}') = 2,5$ МПа

Цемент PZ 325. Количество 320 кг/м³, B/(L)=0,6

Месячное количество бетона 800 м³, смеситель 500 л.

Наибольшее зерно 16 мм. K=3,60 Консистенция V_3

Кривую прочности путем отметки соответствующих прочностных интервалов определяют графически. В частотной диаграмме, уже известной из разд. 4.5, общее число значений предела прочности при сжатии, отвечающее отдельным интервалам, также иллюстрируется крестиками.

Определение прочности при сжатии

Определение среднего арифметического значения

На основании результатов, полученных для выборочной пробы одной марки прочности при сжатии, среднее арифметическое вычисляют по формуле

$$\overline{R}=\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}R_i=$$

$$=\frac{R_1+R_2+R_3+\ldots+R_n}{n}$$

или

$$\overline{R}=\overline{R}_a+\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(R_i-\overline{R}_a),$$

причем $\overline{R}_a$ — среднее значение, которое для упрощения расчета принимают в виде целого числа.

Определение предела прочности при сжатии

Прочность $R_{2,3\%}$ вычисляют путем умножения разности среднего арифметического значения на величину стандартного отклонения выборочной пробы. При этом следует учитывать возможную кривую распределения

$$R_{2,3\%}=\overline{R}-1,25(\overline{R}-\overline{R}')t_n.$$

Значение $\overline{R}'$ есть среднее арифметическое всех значений предела прочности при сжатии $R_i<\overline{R}$, рассчитывается по формуле

$$\overline{R}'=\frac{1}{m}\sum_{i=1}^{m}(R_i-\overline{R}).$$

Выражение $1,25(\overline{R}-\overline{R}')$ отвечает стандартному отклонению (см. разд. 4.5).

Значение t_n зависит от объема выборочной пробы по Стьюденту, оно может быть взято из табл. 23. Для выборочных величин, не приведенных в табл. 23, используются следующие значения t_n:

Объем выборочной пробы	5	6	7	8	10	12	15	15
t_n	2,85	2,65	2,5	2,4	2,3	2,25	2,2	2

Оценка значения испытания на сжатие

Считается, что требуемая проектом или стандартом определенная марочная прочность бетона при сжатии подтверждается результатами испытания только в том случае, если значения предела прочности $R_{2,3\%}$ больше или, по меньшей мере, соответствуют определенной марке x_k (см. табл. 11). Приведенный в табл. 21 пример, в котором $R_{2,3\%}$ равна 20 МПа, т. е. контрольная прочность бетона марки В 225, равная 19 МПа, превышена; тем самым качество бетона доказано.

На средних и малых по объему стройках, чтобы подтвердить достигнутую прочность марок от В 120 до В 300, не требуется вычислять предел прочности, если среднее значение соответствует требуемой марке (30 МПа при В 300) и наименьшие отдельные значения ниже требуемой марки не менее чем на 15%.

Для определения прочности при сжатии в отдельных случаях (низкие температуры, тепловая обработка) можно сослаться на требования ASMW—VW 968.

Список литературы

Schulze W. Der Baustoff Beton, Bd. 1, Zementgebundene Massen (7. Auflage), VEB Verlag für Bauwesen, Berlin 1975.

Schulze W., Reichel W. Der Baustoff Beton, Bd. 3, Prüfverfahren (2. Auflage), VEB Verlag für Bauwesen, Berlin 1973.

Kaysser D. Technologie der industriellen Betonproduktion, Bd. 1 bis 4, VEB Verlag für Bauwesen, Berlin 1970, 1971 und 1972.

Kühl H. Der Baustoff Zement (2. Auflage), VEB Verlag für Bauwesen, Berlin 1963.

Мчедлов-Петросян О. П. Химия неорганических строительных материалов. М., Стройиздат, 1971.

Скрамтаев Б. Г., Шубенкин П. Ф., Баженов Ю. М. Способы определения состава бетона различных видов. М., Стройиздат, 1966.

Walz K. Herstellung von Beton nach DIN 1045, Beton-Verlag Düsseldorf 1971.

Czernin W. Zementchemie für Bauingenieure, Bauverlag GmbH — Wiesbaden — Berlin 1964.

Iken W., Lackner R., Zimmer P. Handbuch der Betonprüfung. Beton-Verlag GmbH, Düsseldorf 1972.

Стр.

1. Бетон как строительный материал 9

2. Исходные компоненты бетона 14

2.1. Цемент 14
2.2. Вода 20
2.3. Заполнители 21
2.4. Добавки 29

2.4.1. Пластификаторы (BR) (30). — 2.4.2. Добавки, влияющие на твердение (замедлители VZ и ускорители BE) (31). — 2.4.3. Воздухововлекающие добавки (ZP) (32). — 2.4.4. Уплотнители и гидрофобизующие добавки (DM). (32)

3. Путь от цементного клея к цементному камню 33

3.1. Сущность процесса гидратации 33

3.1.1. Гидратация как пространственный процесс (33). — 3.1.2. — Гидратация как химический процесс (37).

3.2. Концентрация гелевидной составляющей 39
3.3. Свойства цементного камня 40

3.3.1. Прочность цементного камня (40). — 3.3.2. Водонепроницаемость, морозостойкость и морозосолестойкость (сопротивляемость действию противогололедных реагентов (44). — 3.3.3. Сопротивляемость химически вредным веществам (45). — 3.3.4. Усадка и ползучесть (46). — 3.3.5. Тепловыделение твердеющего цементного камня (48).

3.4. Учет особенностей цементов — основа их выбора 48

4. Цементный клей + заполнитель = бетон 51

4.1. Функции цементного клея и заполнителей 51
4.2. Бетонная смесь, ее свойства и возможность их изменения . . . 52

4.2.1. Технология и требуемая консистенция бетонной смеси (54). — 4.2.2. Влияние цементного клея на консистенцию бетонной смеси (56). — 4.2.3. Зерновой состав заполнителей в бетоне и его значение для консистенции бетонной смеси (56). — 4.2.4. Улучшение зернового состава (62). — 4.2.5. Водосодержание бетонной смеси (63). — 4.2.6. Заключение (64).

4.3. Бетон, его прочность и возможность влияния на нее 64
4.4. Свойства бетонной смеси и бетона и многообразие вариантов использования исходных материалов 67
4.5. Предел прочности бетона различных марок 69

4.5.1. Прочность бетона как статистическая характеристика (70). — 4.5.2. Характеристика прочности бетона различных марок (71).

5. Практическое проектирование бетона 74

5.1. Исходные данные и граничные условия 74
5.1.1. Цемент (74). — 5.1.2. Заполнители для бетона (74). — 5.1.3. Консистенция (75). — 5.1.4. Водоцементное отношение (75).

5.2. Проектирование состава бетона 75
5.3. Пример проектирования бетона 77

5.3.1. Постановка задачи (77). — 5.3.2. Расчет технологических характеристик (78).

6. Методы испытания 82
6.1. Испытание цемента 82
6.1.1. Отбор пробы (82). — 6.1.2. Определение сроков схватывания цемента (83). — 6.1.3. Равномерность изменения объема (85).

6.2. Испытание заполнителей 87

6.2.1. Отбор пробы заполнителя (87). — 6.2.2. Зерновой состав тяжелых заполнителей (89). — 6.2.3. Отмучиваемые составляющие (92). — 6.2.4. Наличие гуминовых кислот (94). — 6.2.5. Влажность (95)

6.3. Вода затворения 96
6.4. Испытание бетона 96

6.4.1. Испытание бетона на прочность (96). — 6.4.2. Отбор проб бетонной смеси (97). — 6.4.3. Оценка консистенции по степени уплотнения (98). — 6.4.4. Проверка консистенции по осадке конуса (100). — 6.4.5. Изготовление и хранение бетонных образцов-кубов (101). — 6.4.6. Объемная масса бетонной смеси (102). — 6.4.7. Анализ бетонной смеси (103). — 6.4.8. Определение предела прочности бетона при сжатии (106).

Список литературы 109

Вернер Райхель, Дитрих Конрад

БЕТОН

Редакция переводных изданий
Зав. редакцией М. В. Перевалюк
Редактор М. Н. Кузнецова
Мл. редактор Л. Н. Буравлева
Внешнее оформление художника
В. Ф. Громова
Технический редактор Е. Л. Томкина
Корректор Л. М. Вайнер

ИБ № 2093

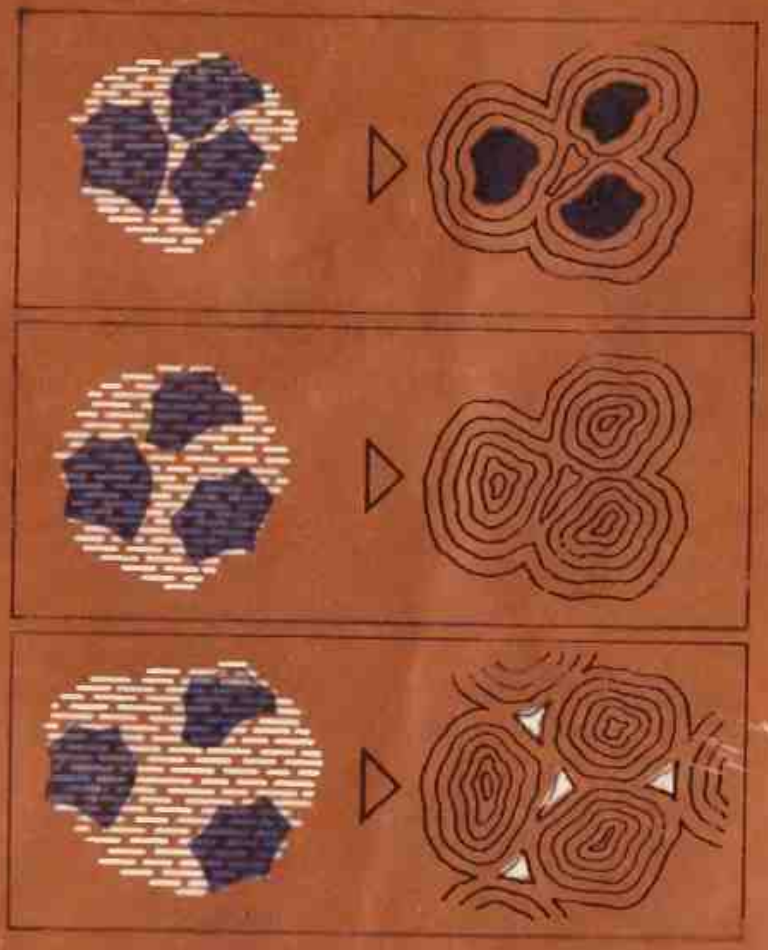
Сдано в набор 27.07.79. Подписано в печать 14.11.79. Формат 60×90 1/16 д. л. Бумага типографская № 1. Печать высокая. Гарнитура «Литературная». Печ. л. 7. Усл. печ. л. 7. Уч.-изд. л. 8,51. Тираж 10 000 экз. Изд. № АХV-7509. Заказ 1278. Цена 45 коп.

Стройиздат
101442, Москва, Калиевская ул., 23а

Московская типография № 4
Союзполиграфпрома
Государственного комитета СССР
по делам издательств, полиграфии
и книжной торговли
129041 Москва, Б. Переяславская ул., д. 46

Цена 45 коп.

Москва
Стройиздат
1979

В. Райхель
Д. Конрад

БЕТОН