

С. В. ШЕСТОПЕРОВ

ТЕХНОЛОГИЯ Б Е Т О Н А

Допущено
Министерством высшего и среднего
специального образования
в качестве учебного пособия
для студентов строительных
специальностей вузов



МОСКВА «ВЫСШАЯ ШКОЛА» 1977

6С3
Ш29

УДК 666.97(075.8)

Рецензенты:

кафедра дорожных и строительных материалов
Сибирского автомобильно-дорожного института им. В. В. Куйбышева
(зав. кафедрой канд. техн. наук доц. М. С. Миронов);
канд. техн. наук доц. Е. Г. Тарашанский.

Шестоперов С. В.

Ш29 Технология бетона. Учебное пособие для вузов. М., «Высш. школа», 1977.

432 с. с ил.

В учебнике даются основные сведения о компонентах бетона: цементе, воде, минеральных заполнителях, различных добавках, бетонной смеси и бетоне. В нем анализируется роль каждого компонента в изменении свойств смеси и бетона и особо выделяется роль цемента. Большое внимание обращено на необходимость проектирования долговечного бетона по комплексной марке.

Учебник предназначен для студентов строительных и автодорожных вузов.

Ш $\frac{30209-174}{001(01)-77}$ 134—77

6С3

Технология бетона неразрывно связана с различными областями науки и техники и не может изучаться без глубокого знания свойств вяжущих. Изучение технологии бетона предопределяется специализацией студентов, для которых все процессы технологии строительных материалов и в данном случае технологии бетона проектируются, организуются и осуществляются в их практической работе. Это положение определило структуру и содержание учебника. Такое построение не только облегчает изучение прикладных дисциплин, аналогичных данной, где подавляющее количество сведений носит экспериментальный характер и опирается на данные; проверенные многолетней практикой, но и поднимает их на более высокий уровень. Систематизация помогает выявлять новые закономерности со всеми вытекающими отсюда положительными результатами. Многолетний опыт работы в проектных, строительных, исследовательских организациях и в высшем учебном заведении, постоянная связь со специалистами, повышение научного уровня в области технологии бетона, равно как и других дисциплин (технологии асфальтобетона, грунтобетона и др.), будет способствовать повышению качества работ и снижению их стоимости.

В каждом параграфе, кроме традиционных названий, которые понятны специалистам, например «марка цемента», указано более точное «марка цемента по прочности»; этим обращается внимание на более широкое понятие марки. С этой целью рассмотрены история и обстоятельства, связанные с их возникновением и последующей эволюцией, которая произошла по ряду причин, связанных как с развитием научных представлений, так и с прямыми производственными разработками, сущность которых и успех их применения не всегда подкреплены теорией.

Как в цепи нельзя допускать разнопрочности звеньев, так и в любом комплексном вопросе, в данном случае в технологии бетона, недопустима неравноценность внимания к теоретическим и практическим положениям и сведениям, размещенным в разных параграфах.

Для развития у студентов творческого подхода к изучению этого курса даются подробный анализ наиболее важных сторон с позиций механизма процесса и их прикладного значения для технологии бетона; рекомендации, связанные с творческими разработками ученых-технологов, оправдавшимися хотя бы в единичных случаях строительной практики, и обоснования их широкого применения; проблемные разработки, целесообразность которых вытекает из анализа того или другого положения о технологии бетона. При этом не должно быть крайности: отрицания технических нормативов в силу их известного несовершенства или формального исполнения

таких нормативов, без желания их совершенствования, доказательства приемлемости новых рекомендаций и их утверждения в виде более прогрессивных технических документов.

Проверка нового, которая идет параллельно со старым методом испытания, должна быть обстоятельной, объективной, доказывающей целесообразность замены старого новым. Результат фиксируется выпуском нового технического документа. В ряде случаев возникают проблемы, связанные с совершенствованием той или иной методики, или более совершенной классификацией материалов. К ним можно отнести проблему улучшения свойств цементов всех видов и марок путем использования комплексных неорганических и органических добавок, которые, с одной стороны, регулируют водопотребность цементов, а с другой стороны — процессы их структурообразования, в том числе сроки их твердения. Введение добавок надо рассматривать не только с позиций экономии цемента, а и коренного улучшения их строительно-технических свойств (например, добавка типа гидрофильной сульфитно-спиртовой барды).

Столь же характерным примером может служить испытание бетонов на морозостойкость. Различие в испытаниях камня и бетона на морозостойкость заключалось в количестве смен, или циклов оттаивания и замораживания образца. С течением времени накопления информации о состоянии сооружений (конструкций) из бетона (железобетона) число циклов испытания увеличилось, что должно как бы отвечать общей идее испытания материалов на прочность. Бетон не разрушается при большем числе циклов, следовательно, он имеет большую морозостойкость. Однако морозостойкость нельзя смоделировать одним лишь числом циклов испытания.

Из сказанного не следует делать вывод о бесполезности многолетних исследований, в данном случае морозостойкости бетона. Наоборот, именно исследования показали необходимость более совершенной организации таких работ, которая не мыслится без использования достижений науки и техники, в частности с помощью ультразвуковой дефектоскопии.

Ультразвуковые испытания, систематически развиваемые за последние пятнадцать лет, оперативно и весьма определенно фиксируют такие изменения, следя за каждым нарушением сплошности материала, если она возникает при испытании. Необходимость пересмотра трудоемкой и длительной методики испытания бетона на морозостойкость несомненна.

Существующие методы не только трудоемки и не представительны (не моделируют разнообразия всех требований, которые надо обеспечить при испытании образцов), но и столь длительны, что результаты даже таких неполноценных испытаний, как стандартные, не могут быть выданы производству в заданный срок.

Условно для подбора составов бетона по прочности требуется от одного до двух месяцев, а для испытания бетона морозостойкостью в 200 циклов — один год. По этой причине в последние годы некоторые исследователи пытаются разработать ускоренные методы испытания, в основе которых лежат испытания образцов при темпе-

ратурах ниже температур, при которых будет работать бетон конструкции.

Химические процессы между цементом и водой обуславливают упрочнение бетона и связаны с образованием в нем пористости. По этой причине необходимо особое внимание обращать на качество исходных компонентов и возникающий при изготовлении бетона физико-химический процесс твердения. Обязательным условием приготовления смесей (растворных, бетонных) при существующих приемах работы является избыток воды в смеси против того количества, которое обеспечивает процесс твердения. Из-за избытка воды и испарения части воды в бетоне всегда образуются поры, количество, размер и качество которых во многом определяют любые свойства. Под качеством пор подразумевается наличие в цементном камне пор, часть объема которых заполнена сжатым в нем воздухом. Изъятие воздуха и заполнение пор водой во время схватывания и первых часов твердения приводит такие бетоны, достаточно морозостойкие в лаборатории, к исключительно быстрому разрушению. Это происходит потому, что разрушения распространены по всем поверхностям контактных зон цементного камня и поверхности каменного материала (зерен песка, гравия, щебня). Разрушение бетонов, твердевших без изъятия из них воздуха, происходит постепенно и начинается с наиболее слабых мест. Таким образом выясняется природа бетона — материала неоднородного. Сокращение числа слабых мест в бетоне стало доступным, так как известны причины их образования. Принцип проектирования долговечности бетона базируется на уменьшении в нем дефектных мест.

По-видимому, факт резко различной морозостойкости бетонов подтверждает гипотезу о причинах разрушения бетона, которые проявляются лишь в строго определенных условиях. Следовательно, можно получить такой состав бетона, который при попеременном воздействии воды и мороза не будет разрушаться при любом числе циклов, так как в нем не возникнут напряжения, обусловленные переходом воды в лед в капиллярах и порах бетона. Срок службы сооружений из бетона в силу его особенностей и высокой стоимости должен определяться не разрушением последнего, а моральным износом сооружений, где он использован.

Особое значение для стабильной работы железобетонных конструкций, в которых напрягается арматура, имеет свойство бетона длительно деформироваться даже под весьма незначительными нагрузками (при относительно небольших напряжениях). Это свойство названо ползучестью. При изучении ползучести бетона необходимо учитывать все сведения о компонентах бетона и, в первую очередь, цементе и цементном камне. Исследованиями установлено, что одинаковые по величине относительные деформации ползучести могут возникать по разным причинам. Это не безразлично для работы сооружения (конструкции, детали). Для низкомарочных шлакопортландцементов характерна низкая морозостойкость и высокая ползучесть. Выводы о шлакопортландцементе по этим испытаниям использовать нельзя, так как в них отсутствует необходимый ана-

лиз качества шлакопортландцемента, примененного в опытах; неизвестно, какие минеральные порошки и как вступили в реакцию и образовали цементный камень. Порошки, не вступившие в реакцию, являются микронаполнителем и для качества цементного камня имеют специальное назначение. По этой причине, с тем же результатом для формирования цементного камня вместо шлака мог быть взят минеральный порошок иного генезиса (например, молотый кварцевый песок, зола, молотый карбонатный порошок). Опыты на шлакопортландцементах, содержащих 70—80% гранулированного доменного шлака тонкого помола, показывают, что в этом случае получают высококачественные цементы, позволяющие готовить бетоны высокой морозостойкости, низкой ползучести, высокой химической стойкости, в частности, в мягких и сульфатных водах. Особый интерес этот цемент должен представлять в технологии сборного железобетона. Он может быть назван шлакопортландцементом в силу формирования из него структур цементного камня на основе химических процессов всех его компонентов с водой. Образование структур цементного камня в таких цементах проходит с наибольшим техническим эффектом при высоких температурах и высокой относительной влажности воздуха. Такие смешанные цементы нашли широкое применение в строительстве гидротехнических сооружений, мостовых опор, где решающее значение имеет сохранение монолитности сооружения (конструкции, детали), которая нарушается из-за экзотермии цемента, вызывающей температурные напряжения в бетоне.

Отметим, что условия твердения цемента любых видов и марок не привлекают к себе должного внимания; это находит отражение и в технической литературе. Твердение — длительный физико-химический процесс, имеющий для каждого вяжущего строго определенные параметры условий: его кинетики, температуры, влажности. Наличие в ГОСТе только нескольких показателей прочности на конкретные сроки (3, 7 и 28 сут.), а не на любой день формирования структуры цементного камня, показывает, насколько разнообразны условия ее организации из-за полиминеральности, полидисперсности и полиагрегатности цемента, даже в строго определенных стандартных условиях. Для превращения всего количества цемента в новообразование (в продукт процесса твердения полиминеральных зерен цемента с водой) последний должен иметь определенный набор зерен, не связанных в агрегаты, быть обеспечен наличием воды в системе цемент+вода, сохраняющейся в ней длительное время, измеряемое годами. В наших опытах бетон после 35 лет твердения под водой на дне канала им. Москвы содержал до 30% зерен, не вошедших в реакцию с водой в цементе обычного состава (а не оптимального для ускорения сроков полноценного твердения). Цементный камень, содержащий такие зерна цемента, был назван микробетоном Юнга. В своих исследованиях этого вопроса, проведенных в 1938—1940 гг., Ю. М. Бутт и С. Д. Окоороков показали, что в заводских цементах в стандартных растворных образцах марочной прочности (через 28 сут. стандартного твердения) в реак-

цию с водой вступает от 40 до 60% цемента, содержащегося в образце. Одним из исследовательских направлений в этой области являются разработки, позволяющие повысить количество цемента в процессах твердения. Одно из них — изыскание цементов с большей полнотой твердения в наиболее короткие сроки; другое — изыскание ускорителей твердения, доступных для столь обширной области применения, как бетонные работы, не вызывая при этом коррозии арматуры; третье направление — разработка наиболее совершенных методов уплотнения бетонных смесей, содержащих минимальные количества воды затворения.

Особая роль в любой технологии производства отводится лабораторному контролю. В данной технологии, связанной с технологическими переделами, исполнение которых весьма различно по содержанию и местам выполнения (приготовление смеси — чисто заводской процесс, транспортирование смеси, ее уплотнение и уход за бетоном — специфически строительный процесс), роль лаборатории особенно значительна. Однако нельзя лабораторный контроль ограничивать проверкой качества материалов, завезенных на строительные площадки, приготовленной смеси и соблюдением технологических нормативов. Задачи работников лаборатории значительно шире. Опыт показывает, что наибольший успех связан с научной организацией работ, в которые входят профилактические мероприятия, предпринимаемые лабораторией заблаговременно, в частности, и участие ее работников в анализе проекта организации и механизации работ.

Одним из вопросов, обеспечивающих успех в работе, является обучение кадров на любом участке производства. Исполнители, твердо знающие и специфику работ, будут выполнять ее технически грамотно. Перечисленные вопросы не могут быть решены и тем более внедрены без критического осмысливания теоретической базы этой дисциплины и ее практического состояния. В этих вопросах первым шагом является изучение основ дисциплины, которая и изложена в курсе «Технология бетона».

МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ ПРИГОТОВЛЕНИЯ БЕТОНА

ГЛАВА I

ВЯЖУЩИЕ МАТЕРИАЛЫ

§ 1. Общие сведения

Под вяжущим принято понимать любой материал, который после смешивания с водой может менять свое физическое состояние, превращаясь из жидкого или тестообразного в твердое тело с различной прочностью и другими техническими свойствами. Вяжущие материалы могут быть **природные** и **искусственные**; **минеральные** (глина, известь, гипс, магнезиальные вяжущие, жидкое стекло, различные цементы) и **органические** (битумы, смолы, дегти, клеи). Способность вяжущего связывать в монолит мелкие минеральные зерна (песок, гравий, щебень) и крупные куски камня определяет понятие «цементирование», а группу вяжущих можно назвать цементами.

Сохранившиеся документы свидетельствуют о том, что цемент* стали применять в России еще в начале XVIII столетия. Так, при строительстве Ладожского канала (1728—1729) применяли цемент, изготовленный на заводе в Копорском уезде Петербургской губернии. После 1812 г. в Москве развернулись большие строительные работы, в том числе по восстановлению Кремля. Егор Челиев обобщил опыт, накопленный русскими строителями, и описал его в 1825 г. в работе «Полное наставление как готовить дешевый и лучший мертель, или цемент, весьма прочный для подводных строений, как-то: каналов, мостов, бассейнов, плотин, подвалов, погребов и штукатурки каменных и деревянных строений». Гидравлическое вяжущее, по рекомендации Челиева, изготавливали из извести и глины в пропорции 1 : 1 с водой. Затем смесь подвергали брикетированию и обжигу при температуре до 1100—1200° С. Интересна рекомендация о введении гипса в порошок, полученный после помола обожженных брикетов. Следовательно, и тогда прибегали к регулированию сроков схватывания цементного теста.

В Англии в 1824 г. Аспдин предложил изготавливать вяжущее, аналогичное описанному Челиевым, но, по-видимому, несколько худшего качества, о чем можно судить по температуре обжига (900—1000° С), которая была ниже примененной в России. Указанное вяжущее называли портландцементом, так как по цвету и прочности в затвердевшем виде оно походило на природный портландский камень, добываемый близ города Портланда.

* Исследования цемента в России относятся к 1819—1822 гг.

По способности твердеть на воздухе и в воде вяжущие делят на две основные группы: воздушные (твердеющие только на воздухе) и гидравлические (твердеющие в любых условиях). Следовательно, указанная классификация основана только на условиях твердения вяжущего и не зависит от условий производства работ и эксплуатации объекта. Разнообразие условий эксплуатации вызвало необходимость разработки значительного количества цементов, различных по своим строительно-техническим характеристикам.

В ГОСТ 10178—62 и ГОСТ 969—66 дан перечень цементов, применяемых для приготовления бетона и железобетона. Кроме портландцементов с большим разнообразием строительно-технических свойств и глиноземистых цементов на их основе наша промышленность выпускает большую группу цементов с минеральными и органическими добавками, свойства которых отличаются от свойств исходных цементов. Минеральные и органические добавки вводят в тех случаях, когда на чисто клинкерных цементах не удается получить бетоны с проектными свойствами. Следовательно, с помощью различных минеральных и органических добавок, вносимых в сырьевую смесь или при помоле клинкера, можно корректировать свойства цемента: для увеличения содержания в сырьевой смеси SiO_2 добавляют трепел, кварцевый песок и др., Fe_2O_3 — железные руды, Al_2O_3 — глины с высоким содержанием глинозема и др.

Следует отметить, что ряд новых видов цемента получен в связи с применением иной технологии производства бетонных работ. Например, на строительстве канала им. Москвы требовалось часть работ выполнить на пуццолановых цементах, которых в те годы выпускалось в недостаточном количестве. Производство таких цементов с относительно невысоким содержанием гидравлической добавки (трепела) было решено путем введения ее в бетоносмеситель без традиционного смешивания цемента и добавки в помольном агрегате.

Этот прием использовали на строительстве волжских гидроузлов (около Углича и Рыбинска). Там впервые применялась помольная установка, на которой цемент готовился в две стадии. На первой стадии вместе с кварцевым леском размалывали клинкер (получали песчаный портландцемент), на второй — при приготовлении бетонной смеси в бетоносмесителе вместе с водой добавляли трепел — третий компонент цемента. Последний поэтому назван трехкомпонентным.

В последнее время широко практикуется способ приготовления цементов разных видов и марок на местных помольных установках. Указанные способы характеризуются широкими возможностями использования вяжущих свойств материала.

§ 2. Краткая характеристика технологии производства вяжущих материалов

Технология получения любого минерального вяжущего (воздушного или гидравлического) заключается в обжиге сырья — его тер-

Таблица I.I

Назначение оборудования	Характеристика оборудования*	Особые требования
Для дробления сырья и клинкера	На первой стадии дробления — дробилки щековые, конусные, роторные; на второй — конусные, обычные и реверсивные молотковые. Мягкие горные породы дробят в валковых дробилках Сырьевая мельница $3,2 \times 8,5$ м открытого цикла (мокрый и сухой способы производства). Сырьевая шаровая барабанная мельница $4 \times 13,5$ м открытого цикла	Выбор типа и конструкции дробилки связан с прочностью горной породы. Максимальная производительность крупной щековой дробилки доведена до $175 \text{ м}^3/\text{ч}$, одно-валковой дробилки (по известняку) до $150 \text{ м}^3/\text{ч}$ При работе по сухому способу производится просушка сырья в сушильных барабанах. Сырье с невысокой влажностью подсушивают в дробилках второй стадии дробления и газами в мельницах. Производительность первой мельницы 105 т/ч сухого сырья
Для обжига сырьевой смеси	Печной агрегат 5×185 м (мокрый способ), состоящий из собственно печи, колосникового холодильника, установки возврата пыли, пылеосадительной камеры, автоматического шламового питателя, электрофилтра, дымососа. Печной агрегат 7×230 м (мокрый способ), состоящий из собственно печи, колосникового холодильника, установки возврата пыли, пылеосадительной камеры, автоматического шламового питателя, электрофилтра, дымососа	При влажности шлама (сырьевой смеси) 36% производительность печного агрегата 1900 т/сут Производительность печного агрегата 3000 т/сут. Для сухого способа имеются иные печные агрегаты
Для помола цементного клинкера *	Двухкамерная шаровая мельница $3,2 \times 15$ м для помола клинкера с добавками в открытом цикле (также используют для измельчения сырья) Мельницы тех же размеров для помола клинкера в замкнутом цикле (сепараторная мельница) и мельницы других размеров с сепарацией продуктов помола	Производительность мельницы в среднем около 50 т/ч (масса мелющих тел 140 т, мощность электродвигателя 2000 кВт) Производительность мельницы зависит от схемы, точности помола и других условий. При $s = 2500 \text{ см}^2/\text{г}$ производительность мельницы составляет 110 т/ч

Назначение оборудования	Характеристика оборудования	Особые требования
Вспомогательные агрегаты и устройства	Болтушки, шламовые питатели и насосы, пылеулавливающие устройства и дымососы печных агрегатов, сушильные барабаны, грануляторы, цементные силосы, пневматические насосы, различные краны, трубопроводы и др.	Тип, конструкцию и производительность промышленных агрегатов и устройств выбирают в соответствии с производительностью основных агрегатов

* Подавляющий объем клинкера размалывают на мельницах открытого цикла. Мельницы размером $3,2 \times 15$ и 3×14 м по отношению к мельницам меньшей производительности с размерами $2,6 \times 13$; $2,2 \times 13$; $2,5 \times 12$; $2,4 \times 13$; $2,5 \times 14$; $2,5 \times 14$ м и др. составляют относительно небольшой процент (примерно 10%).

мической диссоциации. В реакции получения извести $\text{CaCO}_3 \rightarrow \text{CaO} + \text{CO}_2 - q$ карбонатное сырье (в данном примере углекислый кальций) при обжиге диссоциирует на известь и углекислый газ с затратой тепла *. В соответствии с природой сырьевых материалов разработаны машины и оборудование для их переработки и технологические процессы. Специфика технологии приготовления вяжущих определяется особенностями сырья и требованиями к качеству вяжущих.

Процесс приготовления извести из карбонатного сырья (известняка, доломитизированного известняка) зависит от его качества (химико-минералогического состава). Для каждого вяжущего температура обжига различна [58]. Неоднородность сырья создает дополнительные трудности при производстве вяжущих высокого качества. По этой причине перед обжигом каменных материалов следует производить их дробление. Оптимальные условия создаются при обжиге сырья, измельченного до порошкообразного состояния.

Предварительное тонкое измельчение цемента производится сухим и мокрым способами. Измельченную смесь, содержащую 42% воды, называют шламом. Резкое увеличение производительности вновь строящихся цементных заводов, особенно за последний период, связано с развитием средств производства — оборудования и машин (табл. I.1), применения газообразного высококалорийного топлива.

В цементной промышленности все этапы производства последовательно связаны между собой, начиная от добычи сырья в карьере и кончая помолом клинкера. Особое внимание следует обращать на качество природного сырья (известняка, глины, мергеля и др.). Так как в природе нет месторождений готового цементного сырья — мергелей нужного состава, приходится его изготавливать, подбирая

* На диссоциацию 1 г/моль углекислого кальция расходуется 42,5 ккал (178 Дж).

смеси материалов, содержащих углекислый кальций и глинистые вещества в необходимых пропорциях. Во многих случаях глину заменяют частично или целиком доменным шлаком, трепелом и другими аналогичными им по химическому составу материалами.

Сырьевые материалы и смесь из них по своему химическому составу должны не только соответствовать проектным требованиям, но и обеспечивать после первого этапа их переработки в помольном отделении необходимую стабильность указанного состава. Следует иметь в виду, что сырьевые материалы для производства цемента имеют осадочное происхождение и, как правило, неоднородны, поэтому необходимо корректировать состав сырьевой массы до обжига.

Качество цемента резко ухудшается при наличии в сырье ряда веществ (щелочей K_2O , Na_2O , соединений магния, сернокислых солей и т. д.), что следует учитывать при выборе месторождений. Примером первоклассного сырья для цемента следует считать карбонатные породы: мел, который по составу близок к теоретическому составу углекислого кальция, известковый туф, рыхлую горную породу, содержащую незначительное количество примесей и много влаги (до 45%).

§ 3. Химические составы вяжущих материалов

Химический состав цемента является основным ориентиром, с помощью которого проектируют сырьевой состав цементной смеси (табл. I.2). Расчет состава цементной смеси осуществляют по модулям:

основному — гидравлическому

$$m = \frac{\% CaO}{\% (SiO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_3)} = 1,9 \div 2,4,$$

кремнеземистому — силикатному

$$n = \frac{\% SiO_2}{\% (Al_2O_3 + Fe_2O_3)} = 1,7 \div 4,0,$$

алюминатному — глиноземистому

$$p = \frac{\% Al_2O_3}{\% Fe_2O_3} = 1 \div 3,$$

коэффициенту насыщения $KH = 0,82 \div 0,96$.

Коэффициент KH показывает отношение количества извести (по массе), остающейся после полного насыщения Al_2O_3 и Fe_2O_3 (химических компонентов портландцементной смеси) до соединений вида $3CaO \cdot Al_2O_3$ и $4CaO \cdot Al_2O_3 \cdot Fe_2O_3$, к количеству, необходимому для образования из SiO_2 (имеющейся в смеси кремнекислоты и CaO) высокоосновного соединения — силиката кальция $3CaO \cdot SiO_2$ на последующих этапах обжига при максимально высоких температурах.

Таблица 1.2

Наименование цемента	Химический состав	Исходные материалы
Портландцемент разных марок Глиноземистый цемент	63—67% CaO; 21—24% SiO ₂ ; 4—7% Al ₂ O ₃ ; 2—4% Fe ₂ O ₃ ; 1,5—3,0% MgO; SO ₃ и др. 35—45% CaO; 5—10% SiO ₂ ; 35—55% Al ₂ O ₃ ; 0—15% Fe ₂ O ₃	Известняк + глина Известняк + доменный шлак Известняк + различные золы и др. Известняк + боксит Известь + боксит

§ 4. Минералогические составы вяжущих материалов

Кроме расчета смесей по химическому составу был предложен весьма прогрессивный метод расчета по минералогическому составу (проф. С. Д. Окорочков). Все минералы, полученные в результате обжига сырья при производстве воздушных и гидравлических вяжущих, для большей наглядности можно разделить на минералы, твердеющие только на воздухе, на воздухе и в воде, в условиях повышенных температур и давления, в сроки, интересующие производство.

Напомним, что минералом называется структурно индивидуализированное тело, приблизительно однородное по химическому составу и физическим свойствам — продукт физико-химических процессов, протекающих как в земной коре, так и в процессе производства. Минералы, рассматриваемые здесь, получают искусственным путем из группы природных минералов, составляющих сырье.

Таблица 1.3

Минералы вяжущих и гранулированных доменных шлаков	Оптимальные условия
CaO; MgO; K ₂ SO ₄ ; CaSO ₄ ; CaSO ₄ ·0,5H ₂ O; γ-2CaO·SiO ₂ ; 3CaO·Al ₂ O ₃ и он же с содержанием щелочей	Воздушное твердение
3CaO·SiO ₂ *; β-2CaO·SiO ₂ **; 5CaO·3Al ₂ O ₃ ***; 4CaO× ×Al ₂ O ₃ ·Fe ₂ O ₃ **** и клинкерное стекло.	Водное твердение
Система из CaO—SiO ₂ —H ₂ O и различные добавки*****	Автоклавное твердение
CaO·SiO ₂ ; α- и β-3CaO·2SiO ₂ ; MgO·Al ₂ O ₃ ; CaO× ×Al ₂ O ₃ ·2SiO ₂ ; 2CaO·Al ₂ O ₃ ·SiO ₂ ; CaO·Fe ₂ O ₃ ; CaO·2Fe ₂ O ₃ ; 2CaO·Fe ₂ O ₃	Не имеет практического значения для твердения вяжущего

* Ряд других минералов, например K₂O·23CaO·12SiO₂; Na₂O·8CaO·3Al₂O₃.

** Ряд других минералов, например 2CaO·SiO₂ с примесью окислов железа и титана.

*** Ряд других минералов, например CaO·2Al₂O₃ (или 3CaO·5Al₂O₃).

**** Ряд других минералов, например 6CaO·2Al₂O₃·Fe₂O₃.

***** Добавки минеральные активные, не способные твердеть самостоятельно, например SiO₂·nH₂O и др.; активные, способные твердеть в условиях повышенных температур и давления, например Al₂O₃·2SiO₂·2H₂O и др., и активные, самостоятельно твердеющие с разной кинетикой процесса в любых условиях, например минералы гранулированного доменного шлака CaO·SiO₂; 2CaO·Al₂O₃·SiO₂ и др., которые не твердеют в обычных условиях и твердеют в определенных соотношениях с известью, с известью и гипсом и т. д., и минералы основных зол.

Качество минерала связано с его химическим составом, структурой. Приведенные в табл. I.3 минералы могут быть получены только в лабораториях из чистого сырья. В производственных условиях, как правило, нельзя получить мономинеральные вяжущие. Для иллюстрации прочности минералов портландцемента, полученных синтетическим путем, в табл. I.4 приведены сведения об их прочности при твердении в различных условиях.

Таблица I.4

Вид синтетического мономинерального цемента	Удельная поверхность цемента, см ² /г	Продолжительность твердения, сут.	Предел прочности при сжатии* кг/см ² (10—1 МПа) при твердении в условиях		
			водных	воздушных	влажных
Белит C ₂ S	3000	7	0	0	0
		28	0	6	0
		90	49	6	38
		365	—	0	121
Алюмоферрит C ₄ AF	3000	7	65	245	120
		28	65	194	102
		90	111	173	121
		365	67	213	125
Белит C ₂ S	6000	7	0	0	0
		28	35	22	40
		90	194	55	180
		365	—	62	239
Алит C ₃ S	6000	3	150**	154	135
		7	218	209	375
		28	253	190	358
		90	359	200	438
		365	342	240	500
Алюмоферрит C ₄ AF	6000	7	122	260	147
		28	108	265	136
		90	93	248	140
		365	67	256	120

* Испытывались образцы-кубки размером 10×10×10 мм, В/Ц=0,6, состава 1:3.

** Отмечается снижение прочности из-за выщелачивания известня Са(ОН)₂. Испытание образцов на синтетическом цементе из трехкальцевого алюмината показало, что при изменении относительной влажности воздуха резко изменяется их прочность. При относительной влажности воздуха 100% прочность образцов составляла 50 кг/см² (5 МПа), при твердении на сухом воздухе — 107 кг/см² (10,7 МПа), при последующем твердении в воде в течение 90 сут. — 24 кг/см² (2,4 МПа).

Примечание. В этих опытах были приготовлены мономинеральные цементы из C₂S; C₃S; и C₃A и C₄AF. В заводских полиминеральных цементах, как правило, каждый из указанных минералов — твердый раствор. Например, C₃S — твердый раствор на основе трехкальцевого силиката и может содержать различное количество Al₂O₃ и MgO. Предлагается его общая формула C₃S_{1-x}Al_xМ. Указанная в таблице и тексте учебника запись: алит C₃S, белит C₂S и т. д. — условна.

Зная свойства отдельных минералов, например двухкальцевого силиката, строитель-дорожник будет заказывать портландцементы с низким содержанием этого минерала при высоком содержании трехкальцевого силиката. Чтобы предотвратить снижение морозостойкости бетонов, содержание трехкальцевого алюмината в дорожных цементах ограничивают до 10%. По причине снижения сульфатостойкости бетонов из-за наличия в цементе того же минерала изготавливают специальный сульфатостойкий цемент, в котором не должно быть $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ более 5% при наличии не менее 3,5% * гипса (в расчете на SO_3). Кроме указанных минералов в сульфатостойком цементе $3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ должно быть не более 50%, а минералов $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ и $4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$ не больше 22%.

Для более углубленного изучения поведения цементов с различным химико-минералогическим составом необходимо остановиться на физико-химической стороне процесса формирования минералов. Анализ табл. I.4 показывает, что минерал C_3A ухудшает все строительно-технические свойства цемента. Уменьшение его содержания в цементе усложняет технологический процесс. Казалось бы целесообразнее готовить такую сырьевую смесь, в которой не будет компонентов, образующих минералы C_3A и C_4AF при обжиге. Однако обжиг смеси такого химического состава требует для формирования силикатов кальция значительно более высоких температур (табл. I.5).

Наличие Al_2O_3 и Fe_2O_3 позволяет проводить обжиг при значительно более низких температурах (1400—1450° С). По этой причине минералы C_3A и C_4AF (и некоторые другие, в комплекс которых в разном соотношении входят окислы Al_2O_3 и Fe_2O_3) можно назвать минералами-плавнями. Их также называют промежуточными веществами, а различные алюмоферриты кальция — целитом. Невозможность обжига клинкера при более высоких температурах связана с тем, что нельзя обеспечить защиту металла печей стойкой футеровкой.

Таблица I.5

Окислы, входящие как компоненты в сырье для клинкера портландцемента, и их соединения в системы	Температура плавления, °С	Окислы, входящие как компоненты в сырье для клинкера портландцемента, и их соединения в системы	Температура плавления, °С
CaO	2570	$\text{CaO} - \text{SiO}_2$	2065
SiO_2	1713	$\text{CaO} - \text{SiO}_2 - \text{Al}_2\text{O}_3$	1455
Al_2O_3	2050	$\text{CaO} - \text{SiO}_2 - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{Fe}_2\text{O}_3$	1340
Fe_2O_3	1560		

Рассмотрим вопросы, связанные с условиями образования минералов цементного клинкера. Значительного улучшения свойств цемента удастся достигнуть не только благодаря качественной подго-

* Указанный (по ГОСТу) высокий предел содержания гипса в цементе для сухого помола клинкера при дозировании гипса на тарельчатых питателях практически не реализуется.

товке сырьевой смеси (тонкого измельчения, тщательного смешивания ее составляющих), но и введением модифицирующих веществ. Ускорению твердофазовых реакций способствует образование зон расплавленного материала на границе контакта зерен. К модифицирующим веществам относятся CaO , MgO , BaO , MnO , Mn_2O_3 , CaF_2 и др. (SiO_2 повышает вязкость расплава).

Тщательности измельчения и смешивания компонентов сырьевой смеси и, следовательно, высокому качеству обжига способствует технология его производства. В СССР в основном применяют мокрый способ подготовки сырья к обжигу. За рубежом взгляды специалистов на приемы подготовки сырья различны. Например, в Японии, ФРГ основной способ измельчения и смешивания сырья — сухой, в США применяют оба способа (61,5% общей мощности цементных предприятий использует мокрый способ). У каждого из способов есть свои преимущества и недостатки.

Достоинства мокрого способа производства: возможность получения шихты (шлама) с высокой однородностью химического состава даже при использовании неоднородных сырьевых компонентов; значительное улучшение условий труда в смесительном отделении благодаря резкому уменьшению пыли; снижение расхода электроэнергии до 12% вследствие использования при мокром помоле эффекта Ребиндера, связанного с понижением твердости сырья за счет расклинивающего действия водных пленок в кусках горных пород. Недостатком этого способа являются большие затраты тепла при обжиге сырьевой смеси ввиду наличия в ней значительного количества влаги. Исследования путей снижения влаги в шламе перед поступлением в печь показали, что эта проблема требует дальнейшей разработки.

В настоящее время некоторое снижение влаги в шламе достигается введением в мельницы при измельчении сырьевых материалов: сульфитно-дрожжевой бражки, щелочных вытяжек торфа и др.

Вид и количество пластифицирующей добавки зависят от ряда условий, в том числе от химико-минералогического состава компонентов сырья. На каждый процент уменьшения влаги в шламе снижается около 1% тепла и повышается до 1,5% производительность печи. Некоторые вещества позволяют снижать влажность шлама до 7%. При этом способе требуется организация в цехах вентиляции.

Преимуществом сухого способа является более низкий расход тепла для получения каждой тонны цемента. Однако сказанное о высоком качестве сырья при необходимости дальнейшего повышения марки цемента при обжиге во вращающихся печах, по-видимому, потребует изыскания способов его приготовления со значительно меньшими количествами влаги. Сырьевая смесь (шлам, сырьевой порошок), подготовленная тем или иным способом, может быть использована для превращения в клинкер, состоящий из ряда минералов, не встречающихся в природе.

Сырье необходимо обезвоживать при температуре до 105° С, уда-

лять из него кристаллизационную воду (дегидратировать природные минералы и горные породы), органические примеси, всегда присутствующие в горных породах, а также разложить природные минералы. Например, каолинит $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ на SiO_2 и Al_2O_3 , карбонат кальция известнякового компонента CaCO_3 на CaO и CO_2 . Получившиеся при такой термической диссоциации окислы находятся в активном состоянии, что на последующих стадиях обжига обеспечивает их связывание в новые минералы (табл. I.6).

Таблица I.6

Исходный минеральный продукт	Промежуточные технические минералы, вступающие во взаимосвязь в процессе обжига	Технические минералы портландцементного клинкера*
Известняк	CaO , MgO , SO_3	Алит (алитовая фаза или фаза трехкальцевого силиката)
Глина (суглинок, глинистый сланец, лесс, лессовидные суглинки и др.)	SiO_2 **, Al_2O_3 , Fe_2O_3 , MgO	– Белит (белитовая фаза, фаза двухкальцевого силиката); алюмоферриты кальция (целит — $\text{C}_8\text{A}_3\text{F}$, $\text{C}_6\text{A}_2\text{F}$, C_4AF , C_6AF_2); трехкальцевый алюминат C_3A ; клинкерное стекло
Доменный шлак	CA , C_5A_3 , C_4AF , $\beta\text{-C}_2\text{S}$, C_2F и др.	
Нефелиновый шлам	На 80—85% представлен белитом (частично гидратированным), Na_2O и K_2O	
Зола горючего сланца	Плагиоклаз, волластонит, бурый пироксен, магнетит	
Диатомит	SiO_2 **	
Трепел	То же, SiO_2 **	

* В клинкере в связанном состоянии содержатся окислы: 63—67% CaO , 21—24% SiO_2 ; 4—7% Al_2O_3 ; 2,5—4% Fe_2O_3 ; второстепенные окислы — примеси или корректирующие и модифицирующие добавки, а также щелочи K_2O и Na_2O ; TiO_2 ; P_2O_5 и др.

** Структура SiO_2 в глине и гидравлических добавках (диатомите и трепеле) различна.

Указанные диссоциации природных, минеральных соединений протекают на разных участках печи (рис. 1.1), что связано с их генезисом. Так, при температуре 475°C начинается разложение каолинитового ядра глины, состоящего в основном из CaCO_3 , SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 (последние три окисла являются продуктами этого процесса). На участке в интервале температур $500\text{—}600^\circ\text{C}$, например, образуется низкоосновный минерал моноалюминат кальция $\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$, к которому при постепенном ходе процесса на участках

печи с более высокими температурами последовательно присоединяются новые количества извести и глинозема. Это приводит к появлению в клинкере минералов пятиякциевого трехалюмината $5\text{CaO} \cdot 3\text{Al}_2\text{O}_3$ и высокоосновного трехкальциевого алюмината $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$.

При достижении массой обжигаемого материала зоны с температурой 650°C последовательно образуются минералы с окислами железа: низкоосновный моноферрит кальция $\text{CaO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$ и высокоосновный двухкальциевый феррит $2\text{CaO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$. В такой же строгой последовательности при дальнейшем повышении температуры в печ-

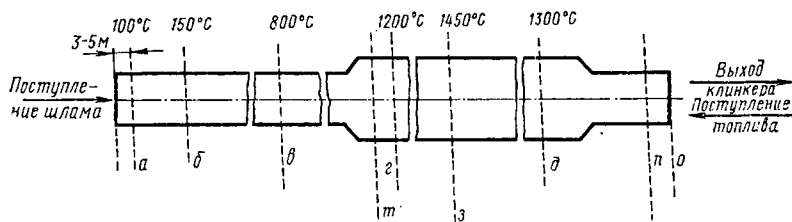


Рис. 1.1. Стадии получения полиминерального клинкера портландце-мента:

а — б — зона сушки; б — в — зона подогрева; в — г — зона кальцинирования (декарбонизации); г — д — зона освоения извести (твердая и жидкая фазы); д — е — зона горения; е — ж — зона охлаждения

ном пространстве (на участках, расположенных на относительно близком расстоянии к головке печи, через которую поступает топливо) образуются и силикаты кальция разной основности. Так, в температурных зонах от 650 — 750 до 1200°C образуется двухкальциевый силикат $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$, а в точках с температурой в 1450°C — высокоосновный минерал — трехкальциевый силикат $3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$.

На участке печи с температурой, превышающей 475°C , начинаются физико-химические процессы в твердофазовом состоянии*, что нужно учитывать при измельчении компонентов сырьевой смеси (развитии их удельной поверхности) и тщательном их смешивании (обеспечении контакта разнородных компонентов для протекания реакций между ними в твердофазовом состоянии продуктов их диссоциации). На участке печи с температурой 650 — 750°C начинается диссоциация карбонатной части сырья, сопровождающаяся образованием новых минералов — низкоосновных силикатов, алюминатов и ферритов кальция, в которых одним из компонентов является CaO . При дальнейшем повышении температуры процесса возмож-

* Твердофазовые реакции — реакции образования твердых растворов, когда атомы растворенного элемента располагаются в промежутках между атомами растворителя. Для протекания такого процесса необходимо, чтобы диаметр атомов растворенного вещества соответствовал размерам отверстий (пустот) кристаллической решетки растворителя (вещества, с которым оно образует «твердый раствор — фазу внедрения»). Фаза (в термодинамике) — совокупность однородных частиц гетерогенной системы, обладающих одинаковыми свойствами. Гомогенная система — это одна фаза, гетерогенная система состоит минимум из двух фаз.

но дальнейшее изменение состава соединений (в первую очередь за счет присоединения новых количеств извести).

Образование новых соединений объясняется тем, что на соответствующем температурном пороге ионы исходных (уже диссоциированных) компонентов приобретают такие колебательные движения, которые обеспечивают возможность их перехода из своего силового поля в поле другого вещества. Этот процесс по сравнению с процессом в жидкостном состоянии усложняется из-за участия в нем частиц, которые на много порядков крупнее атома.

Вслед за образованием на поверхности зерна продукта, диссоциированного из сырья новых клинкерных соединений, процесс распространяется вглубь, но уже через поверхностную оболочку новых соединений. Такой слой, покрывающий зерна исходных диссоциированных продуктов, является своеобразным препятствием для осуществления реакций, аналогичных реакциям в поверхностном слое. В общем виде механизм их относится к области диффузионных процессов. Диффузионные процессы связаны с выравниванием концентраций веществ или парциальных давлений взаимодействующих сред из-за проникновения молекул одного вещества в другое, которые рассмотрены в специальных дисциплинах [58, 79, 80 и др.]. Как правило, в шихте при образовании клинкера ионы Ca^{++} вследствие большей скорости диффузии являются компонентом процессов и диффундируют в решетки SiO_2 и Al_2O_3 .

В зависимости от химико-минералогического состава сырья и условий обжига часть материала, образовавшегося в твердофазовых реакциях, переходит в жидкое состояние (жидкую фазу)*. В зависимости от указанных условий в печи образуется до 30% жидкой фазы, которая и обеспечивает дальнейшее связывание в высокоосновные силикаты кальция**. Следует иметь в виду, что в портландцементе небольшая часть CaO по ряду причин может остаться в свободном состоянии. Количество такой свободной извести в цементе нормируется.

Процесс формирования микроструктуры минералов портландцементного клинкера и их фазового состава проходит по-разному и зависит от условий схлаждения материала, прошедшего в зоне спекания участок максимальной температуры, равной 1450°C . Различная скорость охлаждения клинкера до температуры внешней среды существенно меняет степень кристаллизации минералов, обеспечивая при быстром охлаждении образование жидкой фазы клинкера в большей степени, чем при медленном охлаждении стекловидных структур, что сказывается на кристаллизации алита и белита, а также других фаз клинкера.

Не касаясь сложных сторон процесса клинкерообразования, в случае быстрого и резкого охлаждения качество цемента на таких

* Жидкая фаза — одно из агрегатных состояний вещества.

** В конце печи, после зон с максимальными температурами, возможно образование минерала C_3S и в результате твердофазового процесса, о котором сказано выше, как о процессе между веществами, находящимися в твердом агрегатном состоянии.

клинкерах повышается. Чтобы осуществить такое интенсивное охлаждение, к печи добавляют специальное устройство (например, холодильники колосникового типа).

При оценке качества цемента неверно искать однозначные ответы на практические вопросы выбора цемента или изменения свойств бетона с течением времени.

Создание на заводах каталогов поможет выяснить свойства и правильно выбрать цемент в бетон.

§ 5. Активные минеральные или гидравлические добавки

Гидравлические добавки связывают известь в низкоосновные силикаты кальция, не обладающие вяжущими свойствами. Генезис многочисленных гидравлических добавок, используемых при производстве вяжущих (помоле клинкера), разнообразен (табл. 1.7), что отражается на активности добавок, а следовательно, и на строительно-технических свойствах цементов. Добавки названы гидравлическими, так как при введении их в воздушную известь последняя твердеет в воде.

Таблица 1.7

Наименование добавки	Происхождение добавки	Основной компонент добавки
Пеплы, туфы, пемзы Трепелы, природные диатомиты, опоки Трассы	Вулканические Осадочные Метаморфизированные разновидности вулкани- ческих туфов Отходы при выплавке чугуна	Алюмосиликаты Кремнезем в аморфном состоянии $\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$
Промышленные отхо- ды: гранулированные доменные шлаки топливные шлаки золы гидрозолоуда- ления и др.	Остатки от сгорания углей	69,6—77,9% SiO_2 , 10,2— 15% Al_2O_3 , 2,1—4,4% ($\text{CaO} +$ $+\text{MgO}$), 3,2—9,9% ($\text{K}_2\text{O} +$ $+\text{Na}_2\text{O}$), 39—45% CaO , 35— 41% SiO_2 , 7—10% Al_2O_3 , 43—53% SiO_2 , 16—38% Al_2O_3 , 6—32% Fe_2O_3 , 2— 9% CaO , 0,7—3,0% SO_3 и др.

Кроме горных пород — гидравлических добавок известны техни-
ческие породы, повышающие гидравлические свойства цементов
или придающие воздушной извести такие свойства. Введение до
25—40% добавок вулканического происхождения, обожженной гли-
ны, глиежа, топливной золы или 20—30% минеральных добавок
осадочного происхождения значительно меняет свойства исходных
цементов. Последние называют пуццолановыми портландцементами
независимо от количества и вида гидравлической добавки. Впер-
вые этот вид цементов был разработан в СССР. С 1933 г. пуццолано-
вые цементы заводского производства применяли на
строительстве метрополитена в Москве.

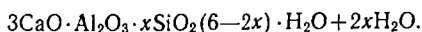
Для бетонов, находящихся под постоянным воздействием воды-среды, в том числе воды, создающей давление на поверхность сооружений, и мягкой воды, этот вид цемента имеет большие преимущества по сравнению с портландцементом. Замедленное твердение пуццолановых портландцементов в обычных условиях и их воздухо-стойкость более низкая, чем у портландцементов, не допускают их использования в сооружениях, где требуется быстрое упрочнение бетона и могут возникнуть условия, способствующие постепенному разрушению бетона.

По указанной причине пуццолановые цементы нельзя применять в бетоне для дорожных и аэродромных покрытий, в штукатурных растворах и др. При ускоренном тепловлажностном режиме твердения и в массивах бетонных сооружений получается наибольший эффект от использования пуццолановых цементов. Ограничение в применении пуццолановых портландцементов связано с тем, что их твердение проходит в несколько стадий. Так, в первой стадии — при реакции минерала C_3S с водой выделяется известь. Во второй стадии физико-химический процесс протекает между выделившейся известью и активным кремнеземом SiO_2 (а в ряде случаев и растворимым глиноземом) *, составляющим основную (реакционную) часть активной гидравлической добавки. Этот процесс протекает медленно и требует тщательного ухода, чтобы обеспечить сохранение в бетоне всего количества воды, введенной при его изготовлении. В случае испарения воды вторая стадия процесса образования в цементном камне набухших низкоосновных силикатов кальция * не будет завершена и появятся дефектные места — микропоры, в которых будет находиться известь и гидравлическая добавка, не обладающая вяжущими свойствами.

Как и реакции с минералами портландцементного клинкера, в случае образования низкоосновных силикатов реакция извести (гидрата окиси кальция) с кремнеземом гидравлической добавки также начинается с поверхности зерен и идет в глубь их. Полученные гидросиликаты имеют пластинчатое строение кристаллов и относятся к тоберморитовой группе с общей формулой $xCa(OH)_2 + SiO_2 + mH_2O = xCaO \cdot SiO_2 \cdot nH_2O [CSH(V)]$. Процесс связывания извести кремнеземом имеет различные объяснения, в основе которых лежит структура кремнезема [52, 58, 79, 80].

Активность минеральных добавок определяют по следующим показателям, нормируемым ГОСТ 6269—63: количеству извести, поглощаемой из известкового раствора в течение 30 сут., водостойкости образца из известкового теста и срокам схватывания теста с проверяемой добавкой. При этом считают, что добавка не является активной, если она не соответствует какому-либо из указанных показателей. По поглощению извести добавки делят на поглощающие 30 мг CaO на 1 г добавки (осадочного происхождения — глиежи),

* Продукт реакции — сульфатостойкий гидрогранат:



50 мг СаО (пеплы, туфы, пемзы, витрофиры), 60 мг СаО (трассы) и 15 мг СаО (диатомиты). В добавках нормируют содержание ангидрида серной кислоты и растворимого глинозема.

Опыт показывает, что перечисленные требования ГОСТа не позволяют с достаточной объективностью оценивать гидравлические свойства добавок. По этой причине окончательной оценкой их пригодности является эксперимент с раствором и бетонами. Улучшение строительно-технических свойств вяжущих добавками — пока лучший критерий их пригодности. Определение активности добавок производят по стандартным методам.

ГОСТ 6269—63 дает также оценку некоторым искусственным гидравлическим добавкам: доменным гранулированным шлакам; белитовому (нефелиновому) шламу — отходам глиноземного производства, содержащему до 80% минерала белита (двухкальциевого силиката), частично гидратированного; кислым золам уноса, являющимся отходом при сжигании некоторых видов твердого топлива в пылевидном состоянии. Пригодность этих и многих других добавок для строительного производства определяется на основании специальных исследований. Добавки, не нормируемые этим ГОСТом, должны быть оценены НИИЦементом — головным институтом цементной промышленности. Гранулированный доменный шлак (см. § 6) нормирует ГОСТ 3476—60, в белитовом шламе нормируется содержание щелочных окислов (R_2O_3) и водорастворимые щелочные окислы (R_2O), в кислых золах уноса — содержание кремнезема, ангидрида серной кислоты и потери при прокаливании (п.п.п.).

§ 6. Гранулированные доменные шлаки

Область использования шлака — ценнейшего побочного продукта при производстве чугуна — исключительно велика, что ограничивает его применение как компонента вяжущих. Шлак после измельчения в порошок и затворения водой обладает вяжущими свойствами. Доменные шлаки близки к портландцементу — они имеют одни и те же окислы, но в разных соотношениях (табл. I.8). В силу различия сырья, поступающего в домы, а также технологии производства чугуна качество шлаков неодинаково. Для оценки вяжущих свойств из шлаков приготавливают цемент и испытывают в растворных образцах. Качество шлака как вяжущего при прочих равных условиях зависит от технологии его охлаждения при гранулировании* расплава.

В процессе охлаждения шлаковый расплав (состоящий в основном из силикатов и алюмосиликатов) приобретает стекловидное состояние и из него образуется мелкозернистая смесь с насыпной объемной массой после мокрой грануляции 400—1000 кг/м³ или после полусухой 600—1300 кг/м³. Это позволяет сделать вывод, что шлаки полусухой грануляции плотнее.

* Гранулирование — процесс получения гранул (зерен). Существуют различные способы охлаждения шлакового расплава: воздушный, полусухой и мокрый. Температура шлакового расплава 1400—1500°С.

Таблица 1.8

Доменный шлак		Наименование минералов доменных шлаков
Наименование	Химический состав	
Основной (топливо — кокс)	35—39,05% SiO_2 9,6—23,44% Al_2O_3 0,6—1,46% Fe_2O_3 0,46—1,11% FeO 0,67—5,61% MnO 0,08—2,16 MgO 29,34—52% CaO 0,32—2,38% S	Геленит $2\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiO}_2$; окерманит $2\text{CaO} \cdot \text{MgO} \cdot 2\text{SiO}_2$; меллит — смесь геленита с окерманитом, возможно наличие окислов железа, марганца и щелочей; α -двухкальциевый силикат — $\alpha\text{-}2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$; β -двухкальциевый силикат — $\beta\text{-}2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$; γ -двухкальциевый силикат — $\gamma\text{-}2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ Псевдоволластонит
Кислый (топливо — древесный уголь)	42,36—53,6% SiO_2 0,4—0,5% TiO_2 13,2—19,24% Al_2O_3 1,2% Fe_2O_3 1,82—2,7% FeO 1—1,22% MnO 1,50—3,74% MgO 26,25—31,67% CaO 0,7—2,7% K_2O 0,1—0,6% Na_2O 0,4% S 0,2% P_2O_5	Геленит $2\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiO}_2$; окерманит $2\text{CaO} \cdot \text{MgO} \cdot 2\text{SiO}_2$; меллит — смесь геленита с окерманитом, возможно наличие окислов железа, марганца и щелочей; анортит $\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$; псевдоволластонит — $\alpha\text{-CaO} \cdot \text{SiO}_2$; волластонит — $\beta\text{-CaO} \cdot \text{SiO}_2$

Примечание. Кроме шлаков доменного производства имеются еще шлаки алюмосиликатных, высокоглиноземистых, феррохромовых, ферромарганцевых, титаномagnetитовых руд и других видов металлургического производства. Перечисленные виды шлаков отличаются по своему химическому и минералогическому составу от приведенных в таблице.

Шлаки мокрой грануляции могут содержать до 35% влаги, поэтому для их применения при заводском изготовлении цемента или перевозках при отрицательных температурах шлак необходимо сушить, что усложняет и несколько удорожает его использование. Шлаки мокрой грануляции без дополнительной подсушки показывают высокие результаты в цементах после мокрого помола. В этом случае необходимо решить практическую сторону техники их применения зимой, не допуская смерзания. Многолетние исследования показали, что гранулированный шлак независимо от состава позволяет с большим эффектом заменять до 70—80% портландцемента при его тонком измельчении.

Критериями оценки качества шлаков считаются:

$$\text{модуль основности} = \frac{\% (\text{CaO} + \text{MgO})}{\% (\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3)},$$

который для основных шлаков равен 1 или больше ее, а для кислых меньше 1;

$$\text{модуль активности} = \frac{\% \text{Al}_2\text{O}_3}{\% \text{SiO}_2} = 0,12 - 0,5.$$

Указанное определение качества шлаков в СССР не является единственным. Однако из-за невозможности учесть указанными модулями (или иными модулями, в которых учитывается только химический, а не фазовый состав вещества) всего разнообразия структурных особенностей шлаков с помощью таких расчетов не следует оценивать их свойство твердеть без активизации и при химической активизации процесса. По химическому составу гранулированные доменные шлаки разделены в каждом из видов на сорта (три сорта для основных и два сорта для кислых шлаков). Для такого деления дополнительно используют сведения о содержании в шлаке закиси марганца, которая находится от 2 до 4%. Указанная классификация — результат многолетних опытов и их последующей обработки.

Колебания состава шлаков связаны с нестабильностью процесса их образования и условиями кристаллизации при охлаждении, которые не отвечают необходимой точности и значительно большей стабильности, характерных для промышленного производства цемента. Надо отметить, что кислых шлаков выпускается значительно больше основных, поэтому успешные исследования, касающиеся расширения области их применения и в цементной промышленности, имеют большое практическое значение.

Шлаки, не подвергающиеся гранулированию, при постепенном охлаждении застывают в больших кусках, образуя отвалы. При этом в ряде случаев может происходить их превращение в порошокобразный материал в виду структурных изменений некоторых составляющих, например переходом $\beta\text{-C}_2\text{S}$ в $\gamma\text{-C}_2\text{S}$ или других процессов, связанных с гидратацией* извести, сернистого железа, сернистого марганца, названных соответственно известковым, железистым и марганцевым распадом. Твердый и стойкий кусковой шлак является высококачественным материалом и широко используется в строительстве (в частности, в дорожном и аэродромном).

§ 7. Мелкомолотые минеральные добавки

При производстве вяжущих в ряде случаев необходимо добавлять мелкомолотые минеральные порошки, активизирующие процессы твердения (табл. I.9). Активизирующий эффект от введения неактивных минеральных порошков показан в работах В. Н. Юнга и Ю. М. Бутта и связан с увеличением поверхности смачивания водой активных зерен цемента в силу их лучшей пептизации**. По виду этих порошков цементам присваивают соответствующее название, например карбонатные (содержат мелкомолотую карбонатную породу); песчаные (мелкомолотый песок); песчано-пуццолановые (мелкомолотые песок и гидравлическую добавку); зольные (золу) и т. д.

* Гидратация — процесс химического связывания воды какими-либо веществами.

** Пептизация — эффект разделения агрегатов из зерен порошков, в данном случае цемента.

Наименование пород для приготовления мелкомолотых минеральных порошков	Содержание минеральных порошков в цементе*, %
Карбонатные породы	25—60
Диатомиты, трепелы, опоки, глиежи	20—30**
Песок различного минералогического состава	10—30
Гипс ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) в расчете на SO_3	1,5—10
Трассы, пемзы, вулканические пеплы, вулканические туфы, пуццоланы	25—40**
Гранулированные доменные шлаки	10—80
Золы	25—40
Топливные шлаки	25—40**
Активные кремнеземистые отходы производства	До 30
Глиниты и аналогичные им материалы (молотый порошок из боя красного или трепельного кирпича)	26—60

* Различное содержание порошков связано с качеством исходного клинкера, тонкостью его помола и областью использования цемента, возможным сочетанием в нем нескольких порошков.

** Количество добавок нормирует ГОСТ 10178—62.

Введение минеральных мелкомолотых порошков в портландцементы в одних случаях имеет чисто экономический характер, а в других технико-экономический и вызвано условиями производства работ. Исследования показали, что замена части зерен цемента (до 10% массы цемента) не снижает его качества. Действительно, введение кварцевого песка в указанном количестве, практически инертного для обычных условий твердения, не снижает марочной прочности цемента.

Следует полагать, что для получения экономического эффекта от введения таких добавок, т. е. получения большего количества цемента из одного и того же количества клинкера, решающее значение имеет соответствие гранулометрии цемента и минеральных добавок. В случаях, когда зерна таких порошков раздвигают зерна цемента, а не размещаются между ними, прочность цементного камня снижается из-за большой пористости. Решающим будет суммарный эффект от изменения пористости цементного камня при снижении воды затворения вследствие введения зерен мелкомолотой добавки (уменьшения ее количества) и изменения пористости в нем в результате раздвижки активных зерен цемента (увеличения ее). Опыт показывает, что любое количество минеральной добавки сверх указанного снижает прочность цемента пропорционально ее количеству. Это обстоятельство используется в ряде случаев, например, при производстве цемента более низких марок.

Для уменьшения тепловыделения цемента также вводят минеральные порошки (примером может служить разработка нового

типа песчано-пуццоланового портландцемента и других цементов для гидротехнического строительства). Наличие указанных добавок в цементе изменяет ряд свойств исходного цемента, что должно учитываться при выборе вида цемента.

§ 8. Процессы взаимодействия вяжущих с водой

Условия связывания воды имеют большое значение для гидролиза и гидратации любого минерала цемента. Это значит, что бетоны (растворы) на различных цементах с изменением условий связывания воды с цементом (табл. I.10) будут иметь неодинаковые

Номер ряда периодической системы	Оксиды элементов второй группы периодической системы	Кислотные окислы типа							
		Al ₂ O ₃				SiO ₂			
		Al ₂ O ₃	Cr ₂ O ₃	Mn ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	SiO ₂	TiO ₂	CeO ₂	SnO ₂
2	BeO	●	○	○	○	●	○	○	○
3	MgO	●	●	●	●	●	●	○	●
4	CaO	△	△	△	△	△	△	△	△
5	ZnO	●	●	●	●	●	○	●	●
6	SrO	△	△	△	△	△	△	△	△
7	CdO	●	●	●	●	●	○	●	●
8	BaO	△	△	△	△	△	△	△	△

△-1 ●-2 △-3 ○-4

Рис. I.2. Периодичность проявления вяжущих свойств у соединений, образующихся в системах $MeO-R_2O_3$, $MeO-RO_2$ и $MeO-P_2O_5$:

1 — обнаружено наличие вяжущих свойств; 2 — отсутствуют вяжущие свойства; 3 — предполагается наличие вяжущих свойств; 4 — предполагается отсутствие вяжущих свойств

условия формирования структур цементного камня, следовательно, и различные свойства (см. § 57). Решающее значение для химических реакций имеет солевой состав воды и температура процесса.

При рассмотрении взаимодействия вяжущих материалов с водой следует обратить внимание на некоторые результаты исследований процессов гидратации минералов портландцемента. В зависимости от минералогического состава цемента, качества соединений минералов, дисперсности цемента, условий гидратации образуются гидратированные (водные) кальциевые силикаты, алюминаты, сульфоалюминаты, ферриты, сульфферриты и гидрогранаты. Возможность образования указанных гидратированных соединений связана с особенностями их кристаллической структу-

ры. Многолетние работы * по выявлению природы вяжущих свойств позволили свести результаты в таблицу, названную «периодичностью проявления вяжущих свойств у соединений, образующихся в системах $\text{MeO}-\text{R}_2\text{O}_3$, $\text{MeO}-\text{RO}_2$, $\text{MeO}-\text{P}_2\text{O}_5$ » (рис. 1.2), Me — обозначает химические элементы двух групп: 1) Ca, Sr, Ba; 2) Be, Mg, Zn, Cd, P_2O_5 .

Таблица 1.10

Минерал	Условия твердения минерала	Результаты и продукты реакции
Трехкальциевый силикат	Гидратация при концентрации в растворе CaO меньше 0,08 г/л	Полное разложение C_3S с переходом в раствор $\text{Ca}(\text{OH})_2$ и выделением кремнегеля
	Гидратация при концентрации в растворе CaO 0,08—1,12 г/л без его гидролиза	Образование тоберморитоподобных гидросиликатов, $\text{CSH}(\text{B})$ состава $(0,8 \div 1,5) \text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ и $(0,5 \div 2,5) \text{H}_2\text{O}$
	Гидратация в насыщенных и пересыщенных растворах $\text{Ca}(\text{OH})_2$	Образование гидросиликата $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ и $\text{Ca}(\text{OH})_2$ в твердой фазе
	Гидратация при В/Ц, близком к производственным составам растворов и бетонов	Реакция, по-видимому, протекает в два этапа: 1) образуется тоберморитоподобный гидросиликат $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$; 2) переходит в гидросиликат $\text{CSH}(\text{B})$. Образуется также в твердой фазе $\text{Ca}(\text{OH})_2$
Двухкальциевый силикат	Гидратация в избытке воды, вызывающая его гидролиз	Образуется тоберморитоподобный гидросиликат кальция $\text{CSH}(\text{B})$ и в растворе $\text{Ca}(\text{OH})_2$
	Гидратация при В/Ц, близком к производственным составам растворов и бетонов	Образование тоберморитоподобного гидросиликата кальция $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, который в ряде случаев * может переходить в соединение $\text{CSH}(\text{B})$ при выделении из указанного соединения $\text{Ca}(\text{OH})_2$.

* Из-за метастабильности этого соединения, т. е. изменения устойчивости в результате перемены его состояния. Под метастабильным состоянием (в термодинамике), в частности, когда рассматривается состояние моноустойчивой, но сохраняющейся во времени кристаллической модификации, понимается его переход в более устойчивое состояние, при относительно слабом воздействии внешней среды (внешних факторов). *meta* (мета) — приставка, обозначающая в данном случае перемену состояния и *stabilis* — устойчивый.

* Исследования были начаты в 1937 г. В. Я. Киндом и В. Ф. Журавлевым, продолжены В. Ф. Журавлевым и сотрудниками кафедры вяжущих веществ Ленинградского технологического института им. Ленсовета.

Положение проф. В. Ф. Журавлева о вяжущих свойствах соединений перечисленных элементов, кроме бериллия, подтвердилось. Идея В. Ф. Журавлева о том, что, кроме силикатов, алюминатов и ферритов кальция, вяжущие свойства типичны и для других соединений, базировалась на сходстве составов и строения у ряда других соединений, содержащих некоторые иные элементы таблицы Менделеева. К таковым были отнесены элементы второй группы периодической системы, стоящие в четырех рядах (бериллий, стронций, барий). Считалось, что соединения в нечетных рядах той же второй группы (магний, цинк, кадмий) не обладают вяжущими свойствами.

Многолетними исследованиями установлено, что гидратационное твердение, способствующее упрочнению такой гидратирующей системы, как правило, возможно только в системах первой группы (исключение из указанного правила относится к низкоосновным силикатам, станнатам и титанатам кальция, стронция и бария). Независимо от основности системы второй группы элементов способность к гидратационному твердению их не проявляется. Была также установлена аналогия в проявлении вяжущих свойств у известных и указанных здесь новых систем. Аналогами силикатов можно считать соединения, образованные CaO , SrO и BaO с GeO_2 , SnO_2 и TiO_2 , а аналогами алюминатов и ферритов — соединения CaO , SrO и BaO с Cr_2O_3 и Mn_2O_3 . Вяжущие свойства проявляются у соединений металлов второй группы с эффективным радиусом иона, большим 1,03 Å (табл. I.11).

Таблица I.11

Группа металлов	Ионный радиус, Å	Группа металлов	Ионный радиус, Å
Металлы второй группы, при соединении с которыми материалы приобретают вяжущие свойства:		Металлы второй группы, при соединении с которыми материалы не приобретают вяжущих свойств:	
Ba	1,43	Cd	1,03
Sr	1,27	Zn	0,83
Ca	1,06	Mg	0,78
		Be	0,34

Сказанное частично подтверждает гидратационное твердение — вяжущие свойства материалов. Под гидратационным понимается твердение с водой, не насыщенными растворами солей. Как известно, в растворах солей (воды затворения) условия твердения будут иные, что видно из твердения каустического магнезита или каустического доломита с растворами солей MgCl_2 или MgSO_4 .

При гидратации MgO , имеющей низкую растворимость в воде, постепенно происходит растворение части MgO до образования раствора, насыщенного по отношению к MgO и пересыщенного по отношению к Mg(OH)_2 . Пленки этих новообразований, покрывая

зерна порошка MgO , резко тормозят процессы гидратации. Раствор электролита $MgCl_2$ резко повышает растворимость MgO , что обеспечивает скорость твердения каустического магнезита. Формула такого новообразования оксихлорида магния $mMgO \cdot MgCl_2 \cdot nH_2O$.

Известно, что каустический магнезит, имеющий структуру периклаза, обладает гидратационным твердением в бетоне (растворе) в течение длительного периода, исчисляемого годами. Поэтому содержание указанного минерала в портландцементе нормируется. Считается, что цементный камень на базе MgO и $MgCl_2$ состоит из $Mg(OH)_2$ и оксихлорида магния с формулой $3MgO \cdot MgCl_2 \cdot 6H_2O$.

Рассмотрим химические процессы твердения двух минералов клинкерных фаз C_4AF и C_3A , входящих в промежуточное вещество цемента (целита — алюмоферритов кальция и трехкальциевого алюмината). Нами взяты указанные минералы потому, что их гидратация протекает аналогично гидратации других минералов цемента. Для последующего анализа качества цемента при проектировании бетона следует помнить, что промежуточное вещество — третья после алита и белита (силикатов кальция) составляющая полиминерального и полидисперсного порошка — портландцемента. Считается, что алюмоферриты кальция, имеющие призматическую или округлую форму и гамму окрасок от светло- до темно-бурой, можно рассматривать как серию твердых растворов* в системе $C-C_5A_3-C_2F$. В этой системе для практического использования наиболее характерны составы C_8A_3F ; C_6A_2F ; C_4AF и C_6AF_2 .

В табл. I.12 приведены некоторые сравнительные сведения по минералам C_6A_2F и C_4AF , цементные камни на этих мономинеральных цементах не стойки по отношению к воде. Прочность растворов их систематически падает. Так, после года твердения образцов на

Таблица I.12

Продолжительность твердения, сут.	Предел прочности при сжатии, $кг/см^2$ (10^{-1} МПа)					
	Условия твердения синтетических мономинеральных цементах					
	влажные		водные		воздушные	
	C_4AF^*	$C_6A_2F^{**}$	C_4AF	C_6A_2F	C_4AF	C_6A_2F
4	—	21	—	29	—	155
7	147	19	122	23	260	172
28	136	25	108	19	265	126

* Образцы размером $1 \times 1 \times 1$ см из раствора состава 1 : 3, $B/C = 0,6$, $s = 6000$ $см^2/г$.

** Образцы размером $1 \times 1 \times 1$ см из раствора состава 1 : 3, $B/C = 0,5$, $s = 6000$ $см^2/г$.

алюмоферритовом цементе в воде их прочность снизилась с 265 до 67 $кг/см^2$ (10^{-1} МПа). И в случае гидратации минералов C_4AF и C_3A , как и силикатов кальция, химические процессы зависят от со-

* Твердые растворы (твердые фазы переменного состава) — однородные вещества (кристаллические или аморфно-твердые), состоящие из нескольких компонентов и сохраняющие однородность при изменении соотношения компонентов.

става воды затворения и температуры. Гидратация минерала C_4AF с недостаточным количеством гипса в цементе может быть записана в виде равенства $4CaO \cdot Al_2O_3 \cdot F_2O_3 + nH_2O = 3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 6H_2O + CaO \cdot Fe_2O_3 (n-6)H_2O$.

Надо иметь в виду, что продуктами реакции гидратации минерала C_4AF в избытке чистой воды при температуре $0-29^\circ C$ будут гексагональный четырехкальциевый гидроалюминат и окись железа (C_4AH_n и Fe_2O_3); повышение температуры до $25^\circ C$ способствует перекристаллизации гексагонального C_4AH_n в формы кубической C_3AH_6 и выделению извести $Ca(OH)_2$, которая связывается окисью железа в гидратированный феррит кальция. В насыщенном растворе извести при температуре, близкой к $0^\circ C$, образуется соединение гидроалюмоферрит кальция $4CaO(Al_2O_3, Fe_2O_3) \cdot 13H_2O^*$ в виде гексагональных пластинок. В насыщенном растворе извести при $20-25^\circ C$ кроме гидроалюмоферрита кальция указанного кристаллического вида образуется соединение $3CaO(Al_2O_3, Fe_2O_3) \cdot 6H_2O$ в виде кристаллов кубической формы.

Кристаллы кубической формы при температуре, большей $20^\circ C$, устойчивее, чем кристаллы гексагональной формы, поэтому со временем при соответствующих условиях гидроалюмоферрит кальция вида $C_4(A, F)H_{13}$ переходит в гидроалюмоферрит вида $C_3(A, F)H_6$. Сказанное, в частности, объясняет различие в упрочнении бетонов при производстве работ летом, зимой, при пропаривании бетона и т. д. Особое значение для качества бетона имеет гидратация минерала C_3A . Как было указано в § 4, гидратированный трехкальциевый алюминат в силу свойств этого новообразования называют глиноподобным.

В табл. I.13 [5] приведены различные виды гидроалюминатов кальция (их состав и оптические свойства). Известно, что алюминаты кальция гидратируются без гидролиза (без выделения извести в твердую фазу). Кроме минерала C_3A в портландцементе может присутствовать минерал C_5A_3 (ряд авторов считают, что в цементе присутствует не минерал C_5A_3 , а $C_{12}A_7$). Отмечается, что минерал C_5A_3 может растворить в себе до 10% (по массе) минерала C_4AF , образующегося в цементном клинкере при обжиге сырьевой смеси. Кроме этого, минерал C_5A_3 может присутствовать с минералом C_4AF в виде твердых растворов (считается на основании экспериментов Н. А. Торопова, Л. Д. Меркова и Н. А. Шишакова), что и в твердом растворе C_4AF предельная концентрация минерала не превышает 30% молекул.

Минерал C_3A также частично может растворяться в минерале C_4AF (до 10% по массе). Алюминаты кальция при гидратации в условиях нормальных температур и давлений образуют кристаллические гидроалюминаты $3CaO \cdot Al_2O_3 + 6H_2O = 3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 6H_2O$.

Изменение давления и температуры способствует изменению формы кристаллов гидратированного алюмината (при температуре до $-25^\circ C$ образуются сферолиты, иглы и гексагональные пластин-

* Отношение Al_2O_3 к Fe_2O_3 равно 1.

Таблица 1.13

Состав гидратированного алюмината	Кристаллическая форма	Светопреломление		
		N_g	N_m	N_p
$3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot x\text{H}_2\text{O}$	Гексагональные пластинки, иглы и сферолиты	1,520	—	1,504
$3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot x\text{H}_2\text{O}$		1,535	—	1,515
$3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 0,5\text{H}_2\text{O}$	Гексагональные пластинки	1,530	—	1,510
$3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$		1,538	—	1,523
$3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$		1,538	—	1,520
$3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$		1,527	—	1,505
$3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	Округлые зерна и трапецоэдры кубической системы	$N=1,604$		
$4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 8,4\text{H}_2\text{O}$	Гексагональные пластинки	1,519	—	1,506
$4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$	Двуосная	1,542	1,538	1,522
$4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 14\text{H}_2\text{O}$	Пластинки	1,535	—	1,520

ки, при высоких — трапецоэдры, при высоких температурах и в насыщенном паре смеси извести и глинозема — кубы, а также ромбические додекаэдры того же состава). Количество кристаллизационной воды в гидратированных алюминатах может увеличиваться до 8—12 молекул, что связано с выдержкой шестиводного гидратированного алюмината C_3AH_6 над рядом солей с различной упругостью пара. Из сказанного видно, насколько значительны различия в гидратированных соединениях и как важно для анализа продуктов гидратации (в данном случае гидратации минерала C_3A , рис. 1.3 и 1.4) учитывать совокупность сведений о составе новообразований, что в разной степени отражается на свойствах бетонов (растворов).

Сказанное о структурных особенностях каждого гидратированного соединения полиминерального портландцемента можно проиллюстрировать на минерале $\text{CSH}(\text{B})$, между слоями кристаллической решетки которого находится вода. По структуре это новообразование гидросиликата напоминает структуру слоистых минералов глин, которое, как и рассматриваемое новообразование, способно обратимо терять часть воды (с изменением расстояния между слоями кристаллической решетки) и, следовательно, претерпевать деформации. По-видимому, ползучесть* и усадка бетонов (растворов) на портландцементе вызывается и этим фактом.

* Ползучесть — одно из важных свойств бетона, выражающееся в систематически нарастающей упруго-пластической деформации материала при небольших напряжениях.

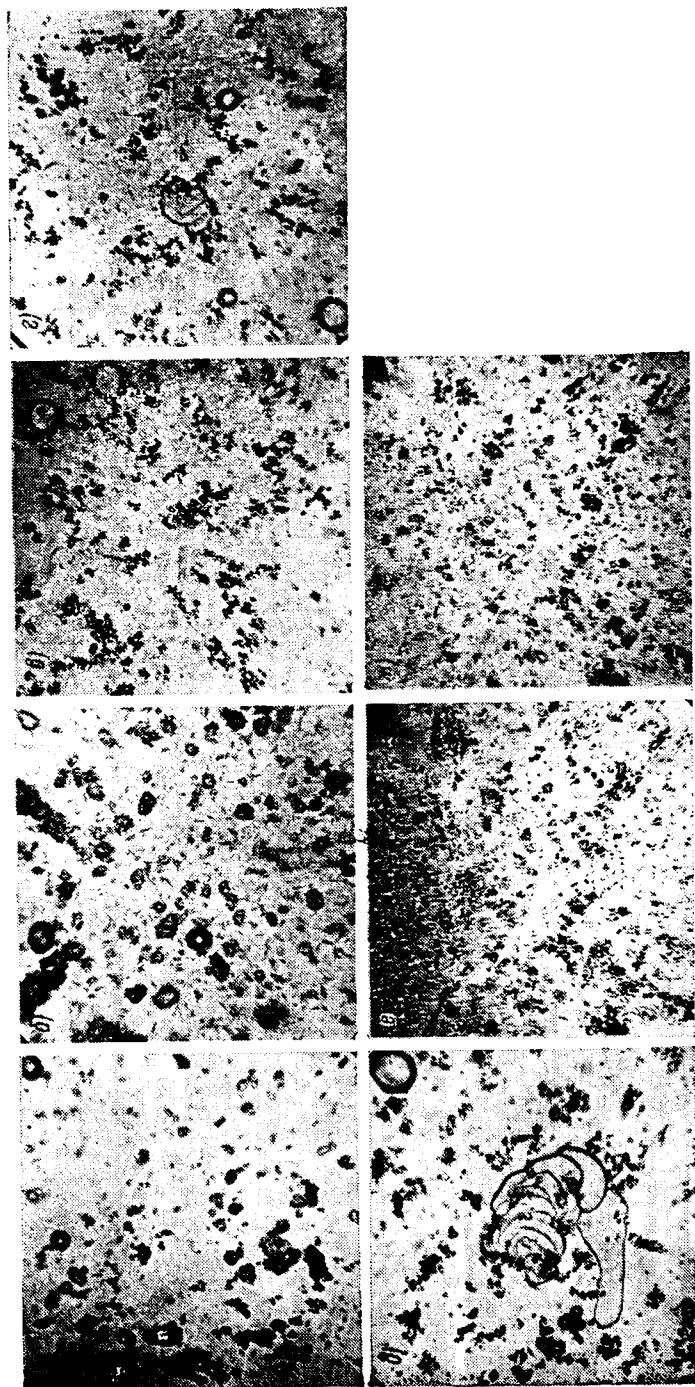


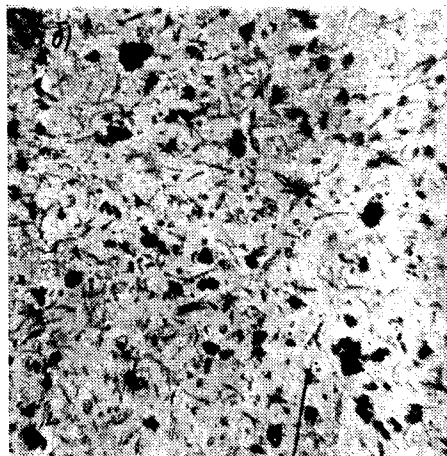
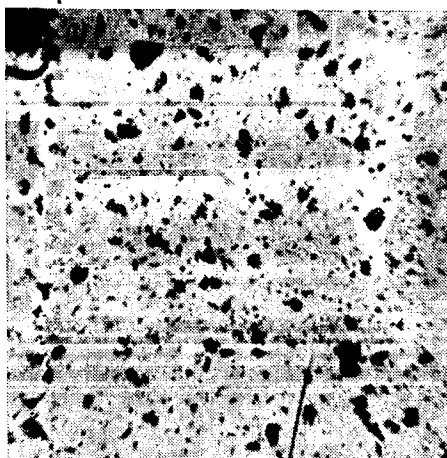
Рис. 1.3. Гидратация минерала C_3A :

а — в чистой воде через 15 мин.; б — в чистой воде через 48 ч; в — в водном 0,5%-ном растворе с. с. б. через 5 мин; 2 — то же, через 45 мин; д — то же, через 2 сут.; е — с добавкой гипса через 10 мин; ж — то же, через 1 ч

Кроме рассмотренного следует остановиться на гидратации других минералов, которые могут содержаться в клинкере портландцемента. При гидратации силиката кальция с включением щелочи K_2O , имеющего формулу $K_2O \cdot 23CaO \cdot 12SiO_2$, образуется гидросиликат кальция (аналогичный образующемуся при гидратации минералов C_3S и C_2S) и щелочь. Наличие щелочи в гидратирующемся цементе требует особого внимания строителей к минералогическому составу каменных материалов, в которых в этом случае должно нормироваться содержание реакционноспособного кремнезема $SiO_2 \cdot nH_2O$ (см. § 34, 64). При гидратации возможно выделение натриевой щелочи $NaOH$, если в цементе присутствует минерал $Na_2O \cdot 8CaO \cdot 3Al_2O_3$. В этом случае появятся новообразования такого же вида, как и при гидратации минерала C_3A , и щелочь.

В клинкере содержатся также соединения, не успевшие закристаллизоваться вследствие охлаждения жидкой фазы клинкера (на образование незакристаллизованных соединений особенно влияет быстрое охлаждение). Эти соединения названы клинкерным стеклом. Оно имеет переменный состав и содержит значительные количества окислов Al_2O_3 и Fe_2O_3 . Для повышения скорости гидратации (получения быстротвердеющих и высокопрочных цементов) в ряде

Рис. 1.4. Гидратация быстроохлажденного минерала C_4AF :
а — через 5 мин; б — через 24 ч; в — через 4 сут.



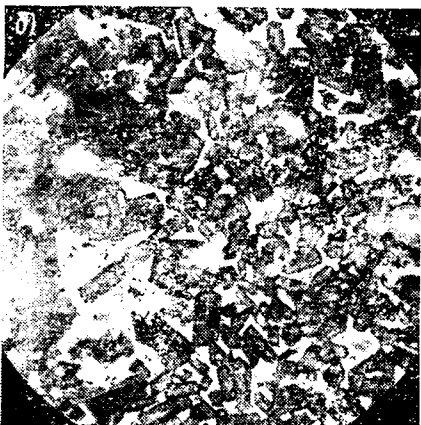
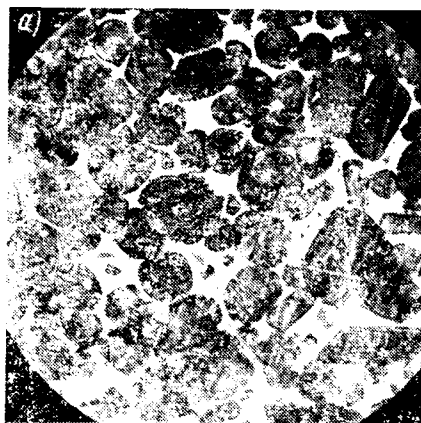


Рис. 1.5. Шлифы клинкера:
а — белитовый; б — мелкозернистый алин-
товый, в — крупнозернистый алин-
товый

случаев при обжиге клинкера происходит быстрое и эффективное его охлаждение (такой процесс напоминает гранулирование доменных шлаков). В этом случае в клинкере повышается содержание клинкерного стекла (от 8 до 22% против 3% и меньшего количества при медленном охлаждении клинкера).

По аналогии с рассмотренными соединениями минералов силикатной и алюминатной групп со щелочными окислами K_2O и Na_2O , а также соединений алюминатов и алюмоферритов возможен переход в различные фазы составляющих или, как их называют, малых составляющих сырьевых материалов в клинкер портландцемента. В результате их положительного действия на гидратацию портландцемента такие составляющие с полным основанием названы легирующими (по аналогии с добавками, вводимыми в шихту при получении металлов). В технологии производства цемента применяются два типа таких добавок: минерализаторы и модифицирующие добавки. К легирующим добавкам относятся: легкоплавкий борный ангидрид, шлаки цветных металлов, плавиковый шпат, хлористый кальций, окислы TiO_2 , P_2O_5 , BaO и т. д. Возможны случаи ухудшения качества цемента при использовании сырья, содержащего большой процент окислов. Это относится к щелочам K_2O и Na_2O , которые могут входить в состав силикатов и алюминатов кальция, а также быть одним из компонентов портландцемента.

Анализ шлифов показывает, насколько разнообразны могут быть клинкеры (рис. 1.5). Из многочисленных исследований известно, что при прочих равных условиях на любое свойство цемента решающее значение окажет и структура клинкера. В случае обжига сырьевых смесей, содержащих кремнезем в виде недостаточно тонко размолотого кварца, при применении окремнелых известняков, а также в случае обжига смесей с низким коэффициентом насыщения KH получается клинкер с чередующимися скоплениями различных по размерам алита и белита. Такая структура названа неравномернозернистой или гломеробластической. Коэффициент насыщения заменяет расчет сырьевой смеси с использованием гидравлического модуля и рассчитывается по формуле

$$KH = \frac{CaO - 1,65Al_2O_3 - 0,33Fe_2O_3}{2,8SiO_2}$$

При использовании глин с низким содержанием песка, наличии жидкой фазы в печи во время обжига сырья, высоком KH и сильном обжиге выходит клинкер без скопления фаз или их групп с более равными по величине размерами зерен минералов. Такая структура названа равномернозернистой или монадобластической. Очень важно строителю, приготавливающему и использующему бетонную смесь, знать состав и свойства цемента.

Стандартная характеристика цемента — марка по прочности — не позволяет использовать цемент с надлежащей эффективностью и тем более обеспечивать приготовление бетона заданной долговечности.

Твердение мономинеральных и тем более полиминеральных вяжущих — сложный физико-химический процесс, связанный с «разрушением» — «коррозией» * кристаллической решетки минералов, составляющих эти вяжущие. Коррозия горных и технических пород, к которым относятся любые вяжущие, связана с их разрушением под влиянием воздуха и воды, приводящим к состояниям, меняющим их составы и свойства. Коррозия ряда изверженных горных пород, протекающая на протяжении геологических периодов, привела к образованию глин, песка, суглинка и супеси.

Каждый из минералов присоединяет в химическом процессе воду, что характеризуется проявлением их вяжущих свойств. Следовательно, твердение вяжущих, их гидролиз и гидратация возможны только в силу коррозии — разрушения клинкерных минералов, а также минералов, составляющих гранулированные доменные шлаки, активные золы и т. д. Такое расширенное представление о процессе твердения полезно для специалистов, использующих вяжущие в своей практической деятельности. Так, если процесс твердения цемента не обеспечить оптимальными условиями, то его результаты не позволят получить бетон (раствор) в полном соответствии с проектными требованиями, необходимыми для многолетней надежной

* Слова «разрушение» и «коррозия» взяты в кавычки, так как такое разрушение предопределяет результаты твердения.

Таблица I.14

Минерал	Коррозия цемента без деструкции цементного камня	Коррозия цемента, при которой возможна деструкция цементного камня*
Алит C_3S	1. Твердение — коррозия цемента при возможно более низких температурах 2. Твердение — коррозия цемента в условиях мокрого тонкого измельчения клинкера с оптимальными дозами гипса с с. д. б., обеспечивающими разрушение коагуляционных структур из гидратирующегося минерала C_3A , когда цементное тесто еще не вышло из упруго-пластично-вязкого состояния 3. Твердение — коррозия цемента со свежей, не карбонизированной поверхностью	1. Твердение — коррозия цемента при высоких температурах (например, при пропаривании) 2. Твердение — коррозия цемента в условиях образования коагуляционных структур из гидратирующегося минерала C_3A (с недостатком и с избытком гипса) 3. Твердение — коррозия цемента с поверхности зерен, предварительно подвергавшихся коррозии влажным воздухом 4. Твердение — коррозия цемента в условиях, допускающих испарение воды из бетона (раствора) 5. Твердение — коррозия цемента в соответствии с условием 2 6. Твердение — коррозия цемента, не допускающая испарения воды из бетона (раствора)
Алюминат C_3A	4. Твердение — коррозия цемента в условиях полного связывания этого гидратирующегося минерала в высокосульфатную форму гидросульфата алюмината в соответствии с условием 2 5. Твердение — коррозия цемента, допускающая испарение воды из цемента	7. Твердение — коррозия цемента в соответствии с условием 4 8. Твердение — коррозия цемента в соответствии с условием 6
Белит C_2S	6. Твердение — коррозия цемента в соответствии с условием 2	
Алюмоферрит C_4AF	7. Твердение — коррозия цемента в соответствии с условием 5	

* Подтверждается испытанием чистых синтетических цементов и многочисленными исследованиями технических свойств бетонов (растворов). В таблице перечислены наиболее важные условия.

эксплуатации сооружения. Можно утверждать, что неорганизованная или плохо организованная коррозия вяжущих при образовании структур цементного камня при прочих равных условиях приведет к дальнейшей необратимой коррозии ее новообразований.

В табл. I.14 приведены результаты направленной и неорганизованной коррозии минералов. Для предотвращения разрушения бетонов (растворов) необходимо знать процессы коррозии минералов портландцементов, как и цементов на основе портландцементного клинкера или других клинкерных полиминеральных составов, и свойства новообразований, в частности условий их стабильности в различных внешних средах. В табл. I.15 приведены сведения о растворимости (следовательно, коррозии некоторых новообразований в цементном камне) портландцемента и некоторых вяжущих.

Таблица 1.15

Гидратированные соединения* (продукты коррозии), образующиеся при твердении минералов	Предельная концентрация, г/л	
	CaO	Al ₂ O ₃
CaO·SiO ₂ ·aq **	0,031—0,052	—
2CaO·SiO ₂ ·aq	Близка к насыщенному раствору Ca(OH) ₂	—
3CaO·Al ₂ O ₃ ·6H ₂ O	0,415—0,560	0,080—0,260
3CaO·Al ₂ O ₃ ·3CaSO ₄ ·31H ₂ O	0,045	—
CaCO ₃	0,010—0,020	—
Ca(OH) ₂	1,100—1,900 ****	—
CaSO ₄ ·0,5H ₂ O	10,000	—
CaSO ₄ ·2H ₂ O	2,000	—
2CaO·Al ₂ O ₃ ·7H ₂ O ***	0,160—0,360	0,50—0,109

* Гидратированные новообразования — продукты коррозии полиминерального портландцемента.

** aq — от латинского aqua — вода; эта запись равноценна записи nH₂O, когда не уточняется количество кристаллизационной воды, в данном случае в гидратированных соединениях цементов.

*** Гидратированное новообразование глиноземистого цемента и цементов на его основе.

**** Растворимость извести изменяется: при повышении температуры воды — снижается; временно повышается при образовании продукта гидролиза из C₃S — дисперсно-коллоидной извести до ее кристаллизации.

Табл. 1.14 и 1.15 показывают различия в устойчивости — предотвращения коррозии продуктов твердения минералов вяжущих в любых средах по различию их химического состава, позволяют сделать ряд практических выводов. Так, из табл. 1.15 следует, что: 1) разрушение цементного камня, изготовленного на портландцементе, зависит от химического состава воды и начинается с выщелачивания извести Ca(OH)₂ и других соединений в порядке их последовательной растворимости; наиболее стойким новообразованием является гидратированный однокальциевый силикат CaO·SiO₂·aq, который начинает корродировать лишь в воде, содержащей CaO меньше указанных пределов (0,031—0,052); 2) для повышения стойкой работы бетонов (растворов) в мягкой воде необходимо связать Ca(OH)₂ в соединения меньшей растворимости и изготавливать плотные бетоны (растворы).

Следовательно, возможность коррозии минералов вяжущих должна заканчиваться на стадии получения гидратированного соединения (при этом форма гидратированных соединений, претерпевая изменения при переходе из гелеобразных в кристаллические), не должна нарушать их сплошности при выборе вяжущих, их хранении, проектировании составов бетона, организации и механизации работ, эксплуатации сооружений из бетона (железобетона). Следовательно, примером нарушения сплошности новообразований может служить быстрая кристаллизация извести при жестких режимах пропаривания бетонов на портландцементе, а также несвоевременность разрушения коагуляционных структур гидроалюминатов кальция при образовании гидросульфалюминатов кальция высокосульфатной формы. Технологи-строители должны учитывать

процессы коррозии минералов в начальной стадии, сразу же после образования клинкера, в воздушной среде и далее при диспергировании клинкера в мельницах в порошок.

§ 9. Нормальная густота и сроки схватывания цементного теста. Равномерность изменения объема

Для определения сроков схватывания и равномерности изменения объема цемент затворяют водой, количество которой определяют по стандартизированному показателю — нормальной густоте цементного теста. Этот показатель (или отношение В/Ц) для разных цементов колеблется в широких пределах (от 22 до 32%). По ГОСТ 310—60 показатель нормальной густоты надо определять на приборе Вика. Цементы с большей нормальной густотой имеют несколько большую водопотребность, что может сказаться на относительном снижении их строительно-технических свойств. Показатель нормальной густоты имеет более широкое значение, чем только для определения сроков схватывания и равномерности изменения объема. Этот показатель интересен для анализа свойств цемента и связан с техническими свойствами бетона, в частности влияет на определение показателя пластичности-жесткости смесей. Длительное вылеживание клинкеров при их смачивании дождем (снегом) резко снижает нормальную густоту цементного теста. Причины, вызывающие различную водопотребность цементов, систематизированы в табл. I.16.

Таблица I.16

Факторы, изменяющие нормальную густоту цементного теста	Изменение показателя нормальной густоты (н. г.)
Минералогический состав Значительный недостаток в цементе регулятора сроков схватывания или его отсутствие Тонкость измельчения Лежалость цемента и других минеральных добавок Наличие гидравлических добавок Наличие мелкомолотого гранулированного доменного шлака * Введение ПАВ в первую камеру с минимальным содержанием гипса	Минерал C_3A может изменять значения н. г. до ~3% Не позволяет определять н. г. с необходимой точностью Связана с действующим составом и количеством гипса. Может колебаться от уменьшения н. г. на 1—2% до повышения н. г. на несколько процентов (см. табл. I.12). Сказывается на незначительном уменьшении н. г. Зависит от химико-минералогического состава цемента, природы добавки и ее величины; н. г. увеличивается на 3—19,5% Снижает показатель н. г. на 0,6% при тонком измельчении шлака Снижает показатель н. г. цементов в соответствии с группой пластифицирования максимум на 1,5%

* Этот показатель не характерен для стандартных испытаний таких цементов. Расход воды для изопластичных бетонных смесей снижается на 15—20 л/м³.

Сочетание перечисленных факторов в разной степени отражается на изменении нормальной густоты. Рассмотрим, как каждая из указанных причин отражается на этом показателе и в чем причина такого изменения.

Минералогический состав. На нормальную густоту влияет минерал C_3A , обладающий высокой водопотребностью. Следовательно, для получения цементного теста одинаковой пластичности из цементов с различным количеством минерала C_3A требуется неодинаковое количество воды*. Повышение нормальной густоты является косвенным показателем высокого содержания в цементе минерала C_3A . Цементы с большим содержанием минерала C_3A для некоторых бетонных и железобетонных конструкций и сооружений нельзя применять (например, в воде-среде, вызывающей сульфатную коррозию, при многократных попеременных замораживаниях и оттаиваниях, для напряженных конструкций, где ограничивается величина ползучести бетона и др.). На показатель нормальной густоты цемента меньше влияет присутствие силикатов кальция (минералов C_3S и C_2S).

Недостаток гипса в цементе. Наличие в цементе минерала C_3A вызывает необходимость при размоле клинкера вводить гипс — регулятор сроков схватывания. Механизм регулирования сроков схватывания цемента (точнее сроков загустевания цементного теста) изложен в § 9 и 46. В практике может встретиться случай, когда из-за разного содержания гипса цемент с большим количеством минерала C_3A будет иметь более низкий показатель нормальной густоты. Сказанное подчеркивает важность как систематического лабораторного контроля качества при производстве цемента, так и контроля на строительстве при отсутствии на цемент технической документации — паспорта со сведениями, указанными в табл. I.16 (эти сведения можно запросить у завода-поставщика цемента).

Тонкость измельчения. Повышение тонкости помола цемента связано с некоторым увеличением количества воды затворения. В ряде случаев при изменении тонкости измельчения водопотребность цемента значительно растет, что связано с содержанием в цементе мелких зерен (мельче нескольких микрометров), а также структурными особенностями клинкера; при затворении цемента открывается большая часть минерала C_3A , находящегося в клинкерных зернах. Однако тонкость измельчения существенно не влияет на показатель нормальной густоты. При измельчении клинкера на строительной площадке или эффективном домоле цемента на заводах сборного железобетона появляется много мелких фракций ниже 5 мкм, для затворения которых нужно большее количество воды, чем для крупных фракций цемента, и показатель нормальной густоты становится значительно выше. Это следует учитывать при организации работ, например не допускать сильного измельчения цемента, повышающего водопотребность, или для уплотнения смесей

* Условно предполагается, что степень доступности смачивания водой минерала C_3A одинакова для обоих цементов.

применять наиболее эффективные способы формирования-уплотнения. Следует иметь в виду, что такие тонкомолотые цементы относятся к быстротвердеющим цементам, а при наличии в них повышенного количества минерала C_3S и к высокопрочным (высокомарочным).

Лежалость цемента. Поверхность зерен цемента полиминеральна, отчего в разной степени подвержена изменению под воздействием воздушной среды. Практически все цементы выходят из помольных агрегатов (мельниц) с высокой температурой, на поверхности из зерен образуются продукты коррозии в виде очень тонкого слоя новообразований. Процесс образования такого слоя связан с наличием в воздухе CO_2 и паров воды. Исследования показали, что цемент после приготовления должен лежать минимальные сроки и качество его зависит от условий, в которых он хранится. Слеживание — потеря качества цемента происходит активнее при высокой относительной влажности воздуха (на берегах больших водоемов, в дождливый период). По этой причине для защиты цемента от слеживания поверхность зерен покрывают органической пленкой (см. § 13). Для частичного восстановления качества лежалого цемента нужен дополнительный домол, при котором зерна очищаются от слоя новообразований и раскалываются по новым поверхностям. Лежалый цемент имеет повышенную водопотребность из-за образования в нем агрегатов (флокул) из зерен, поверхность которых связана продуктами реакции минералов цемента с водой.

Случаи неправильного хранения цемента усугубляют сказанное о снижении качества цемента — увеличивают слеживаемость цемента.

Наличие гидравлических добавок. Гидравлические добавки имеют различный генезис, что отражается на их водоудерживающей способности. В зависимости от вида и количества гидравлической добавки изменяется нормальная густота цемента. Например, трепел, обладающий высокой молекулярной влагоемкостью*, повышает нормальную густоту. Гидравлические добавки, рыхлые продукты изверженных пород, а также молотый песок, снижают показатель нормальной густоты, неплотные разности карбонатных пород (известняков и доломитизированных известняков), впитывая воду, увеличивают водопотребность цементного теста.

Наличие мелкомолотого гранулированного доменного шлака. Эта искусственно полученная гидравлическая добавка в силу своей природы снижает показатель нормальной густоты цемента, что значительно улучшает строительно-технические свойства шлакопортландцемента и позволяет получать бетонные (растворные) смеси заданной пластичности-жесткости при меньшем содержании в них воды.

* Молекулярная или пленочная влагоемкость — свойство горных пород (в данном случае трепела) поглощать и удерживать воду в количестве, соответствующем силам ее удерживания — молекулярному притяжению на поверхности их частиц. Влажность трепела после центрифугирования — показатель его молекулярной влагоемкости.

Наличие поверхностно-активных добавок. Существенное корректирование ряда природных недостатков портландцемента достигается введением некоторых видов ПАВ. Механизм действия ПАВ описан в § 46. Наиболее высоких результатов достигают, вводя в цемент комплексную гидрофильно-гидрофобную добавку, что одновременно обеспечивает высокую пластифицируемость и гидрофобность цементного теста, т. е. способствует получению цементного теста с минимальным количеством воды затворения для заданной пластичности-жесткости. Следует помнить, что избыточное количество ПАВ тормозит химические процессы, протекающие между минералами зерен цемента и водой. В ряде случаев при значительном избытке ПАВ процесс твердения может быть задержан на многие годы, что может вызывать брак в работе. По этой причине для каждого ПАВ существуют оптимальные дозы добавки в цемент.

Перечисленные причины изменения нормальной густоты цемента наиболее существенны и их надо учитывать в практической работе. В одном случае они могут содействовать уменьшению показателя нормальной густоты и, следовательно, повышению строительно-технических свойств цемента, в другом — уменьшение нормальной густоты, достигнутое за счет сочетания иной группы причин, не окажет такого эффекта, как в первом случае. Действительно, нельзя считать показатель нормальной густоты однозначно связанным с качеством цементного камня, образующимся после твердения цементного теста. Тот или иной эффект — результат физико-химического процесса, протекающего в суспензии* цементного теста на границе раздела жидкой (воды) и твердой фаз** (поверхности зерен цемента). В одних случаях эти процессы идут быстрее, в других медленнее, что отражается на изменении показателя нормальной густоты. Из этих сведений можно сделать вывод, что изменением количества воды затворения нельзя ускорить химический процесс связывания воды, который зависит: от природы цемента, его тонкости помола (дисперсности), химического состава воды затворения и температуры процесса.

§ 10. Марка и активность цемента

Понятие марки цемента связано с определением прочности образцов, приготовленных стандартным методом из смеси цемента, песка стандартного качества и воды. Деление цемента на марки в СССР введено в 1930 г. За прошедший период несколько раз изменялись методы испытания для определения прочности цемента и классификация марок, что связано с рядом причин. Наиболее существенной причиной надо считать систематическое совершенство-

* Суспензия — неоднородные грубые дисперсные системы, в которых частички раздробленного вещества находятся во взвешенном состоянии в другом веществе — жидком.

** Фаза — однородная часть неоднородной системы, отделенная от других частей поверхностями раздела и находящаяся в равновесии.

вание технологии производства цемента, резко повысившей свойства портландцемента, в частности его прочность (табл. I.17). Кроме указанной причины в изменении методов испытания и классификации цемента существенное значение имел опыт применения цемента в строительном производстве.

При разработке методов испытания цемента должны быть обеспечены: определение прочности без испытания цемента в бетонах с помощью переходных коэффициентов и количества цемента (расход) при подборе состава бетона; выявление степени однородности партий цемента; оперативное осуществление массовых регулярных испытаний на цементном заводе и контрольные испытания на строительной площадке.

Опыт показал, что перечисленные условия ввиду их сложности решены лишь частично. Как отмечалось выше, цемент является по-

Таблица I.17

Период действия нормативного документа на методы испытания цемента	Период действия нормативного документа на технические условия	Марка цемента	Вид смеси и форма образца для определения марки цемента
До 1 октября 1930 г. ОСТ-78	В 1925 г. нормы на портландцемент разработаны по приказу № 7207	До 150	Жесткая; кубик 7,07×7,07×7,07 см
С 1 октября 1930 г. ОСТ-1310 С 1 ноября 1932 г. ОСТ-5157	ОСТ-5036 —	Для портландцемента 160 (0), 275 (00), 420 (000)	Жесткая; кубик 7,07×7,07×7,07 см
С 1 ноября 1932 г. ОСТ-5158, на 1 год для заводских и научно-исследовательских лабораторий*	—	200, 250, 300, 400, 500, 600	Жесткая; кубик 7,07×7,07×7,07 см
С 1 августа 1941 г. ГОСТ 310—41**	ОСТ-3191 и другие ГОСТы, включая ГОСТ 970—41	Для портландцемента 200, 250, 300, 400, 500, 600	Жесткая; кубик 7,07×7,07×7,07 см
С 1 июля 1967 г. ГОСТ 310—60***	С 1 января 1964 г. взамен ГОСТ 970—61 и ГОСТ 3909—62 введен ГОСТ 10178—62	Для различных видов цемента различна	Пластичная при В/Ц=0,4 или выше этой величины; балочки 4×4×16 см

* ОСТ-5158 после его проверки в заводских и научно-исследовательских лабораториях заменил ОСТ-5157.

** Так как методики испытания по ОСТ-5158 и ГОСТ 310—41 близки, то условно можно считать, что в этот период одни и те же марки цемента близки по показателям.

*** ГОСТ 310—60 был выпущен взамен ГОСТ 310—41 со сроком введения с 1 июля 1962 г. Действительный срок введения 1 июля 1967 г.

лиминеральным и полидисперсным порошком, в который при помощи клинкера вводят гипс для обеспечения процесса с оптимальными результатами схватывания и упрочнения цементного теста. Указанные особенности цемента по разному влияют на упрочнение и в конечном итоге приобретение той прочности, которая заносится в паспорт на цемент. Любые, самые незначительные изменения химико-минералогического состава цемента, его гранулометрии, качества воды затворения, условий приготовления растворной смеси и образцов из нее, продолжительности твердения изменяют прочность цемента.

Не имея точных сведений, в данном случае о прочности цемента, нельзя решить вопрос о его пригодности для строительного раствора, бетона (железобетона) заданной прочности. Надо всегда помнить, что выбор цемента только по показателю прочности практически недопустим. Назначению цемента по прочности предшествует анализ условий работы сооружения (конструкции) (см. § 39, 51). Попутно отметим, что правильное назначение цемента позволяет создавать бетонные (железобетонные) сооружения, конструкции и детали исключительно высокой долговечности. Недолговечность некоторых конструкций связана, в частности, с использованием цементов, которые не следовало бы применять в этих конкретных условиях.

В различных странах существуют разнообразные методы определения прочности и классификации цементов по прочности. Может возникнуть вопрос о целесообразности испытания цемента для определения его прочности непосредственно в бетоне, исключая испытание стандартных образцов. Однако такое решение невозможно по причинам исключительного разнообразия строительных песков, гравия и щебня и такого же разнообразия составов бетонов. Цемент в стандартных растворах и в бетоне на разных материалах покажет различную прочность (см. § 21, 32, 43, 58).

При таком методе испытания цемента цементные заводы лишаются возможности оценивать свою продукцию и контролировать ее качество в ходе технологического процесса. Сказанное объясняет причину появления и применения условных методов испытания. В силу того что песок влияет на прочность цемента, в СССР за эталон принимают кварцевый песок у г. Вольска на р. Волге. Этот песок подвергается рассеву на специальном заводе, после чего он поступает в лаборатории цементных заводов и предприятий, где производят испытания цемента.

В табл. III.3 приведены результаты испытаний образцов на трех стандартных песках. Из таблицы видно, что один и тот же цемент, испытанный по одной методике в одно и то же время, имеет неодинаковую прочность. Для сравнения показателей прочности цемента различных стран необходимо их скорректировать соответствующими коэффициентами. Многолетний опыт испытания цемента показывает, что наиболее простым методом является испытание образцов из пластичных ($B/C \geq 0,4$), а не жестких ($B/C \leq 0,32$) растворных смесей. В этом случае достигается большая тщательность

Таблица 1.18

Завод-изготовитель	Актив- ность це- мента кг/см ³ (10 ⁻¹ МПа)	Марка	Диаметр рас- плава стан- дартного ко- нуса раство- рной смеси со- става 1:3, мм	Сроки схватывания, ч-мин	
				начало	конец
Пикалевский глиноземный комбинат	438	400	118,0	2-55	4-23
Амвросиевский	501	400	112,1	3-23	4-49
«Большевик»	512	400	108,0	3-30	4-35
Броценский	412	400	108,0	3-32	4-58
Здолбуновский	488	400	107,0	2-15	3-26
Краматорский	461	400	105,2	2-09	3-23
Михайловский	452	400	121,0	2-22	4-20
Новотроицкий	573	500	116,3	2-00	3-00
«Октябрь»	578	500	107,7	3-05	4-24
Им. Воровского	509	500	122,0	1-48	4-06
Алексеевский	517	500	115,0	2-30	4-20
Бахчисарайский	553	500	107,0	2-46	3-85

перемешивания и уплотнения смесей. Так как цементы при одном и том же водоцементном отношении показывают различную пластичность в стандартных смесях состава 1:3 (одна часть цемента и три части стандартного вольского песка), то выбор пластичности смеси признан ведущим критерием в стандартизации методов испытания цемента. Это положение отражено в ГОСТ 310—60. Однако и испытание при одном значении В/Ц не позволяет с необходимой достоверностью оценивать качество различных цементов.

В табл. 1.18 приведены сведения о цементах, которые при одинаковой марочной прочности показывают различную пластичность в стандартных смесях 1:3. Определение марки по прочности стандартным методом также не создает правильного представления о цементе. Это происходит потому, что на цементе одной марки получают бетоны одного и того же состава, но разной прочности, так как в бетоне заданной пластичности-жесткости (см. § 43) на цементе с большей пластичностью стандартной растворной смеси в ряде случаев будет содержаться меньше воды, чем в бетоне на цементе с меньшей пластичностью той же растворной смеси. Различие в пластичности цементов связано с рядом факторов, в том числе с их химико-минералогическим и гранулометрическим составами, легкостью (состоянием поверхности зерен и наличием цементированных агрегатов), количеством и характером минеральных и органических добавок.

Прочность стандартных растворных образцов после 28-суточного твердения называют активностью цемента. В СССР для классификации цемента по прочности полученный показатель средней прочности образцов принято округлять до сотен килограммов. Допускается округлять в большую сторону только в том случае, когда активность цемента после округления отличается не более чем на

5%. Такая цифра прочности цемента названа его маркой. В СССР выпускается портландцемент М 300, 400, 500 и 600.

Классификация цемента на марки с интервалом в 100 кГ (10⁻¹ Н) прочности также условна и у ряда специалистов вызывает возражение.

Классификацию цемента нельзя рассматривать в отдельности от технологии его производства и потребления. Совершенствование производства способствует увеличению выпуска цемента высоких марок, что в первую очередь позволяет повысить производство и качество бетона (табл. I.19, I.20).

Т а б л и ц а I.19*

Условная марка портландце- мента	Количество бетона, получаемое из 1 т цемента, м ³			
	Марка бетона из смеси пла- стичностью-жесткостью 20—40 с		Марка бетона из смеси пластичностью-жесткостью 4—6 см	
	150	200	150	200
300	4,06	3,33	3,12	2,58
400	4,90	4,06	3,78	3,12
500	5,67	4,68	4,40	3,63
600	—	5,32	—	4,10

* З. И. Логинов. Цементная промышленность СССР и перспективы ее развития. Вып. XXIV. НИИЦемент, 1967.

Т а б л и ц а I.20

Вид цемента	Средняя* прочность цемента по годам, кГ/см ² (10 ⁻¹ МПа)							
	1936	1940	1950	1955	1960	1965	1970**	1972
Портландцемент . . .	259	361	411	431	482	508	412	421
Шлакопортландцемент	211	255	287	339	363	415	320	328 и 400***
Пуццолановый порт- ландцемент	258	347	393	404	434	456	356	356
Кладочный цемент для растворной смеси	—	—	150	200	—	—	—	—

* Средняя прочность — условный показатель средневзвешенной прочности выпускаемых цементов. В начале первой пятилетки выпускался почти один портландцемент. $R_{сж} = 160$ кГ/см² (10⁻¹ МПа).

** Испытание по ГОСТ 310—60 в пластичных растворах внедрено в промышленность с I/VII 1967 г.

*** Обыкновенный М 328 и быстротвердеющий М 400.

Прогресс в области изготовления вяжущих материалов влечет за собой совершенствование в области конструирования, расчета и проектирования железобетонных конструкций и технологии их изготовления. Развитие производства цементов высоких марок, однородных по своим свойствам, позволяет перейти к широкому применению бетонов на легких каменистых материалах и конструкций меньших сечений, что резко снижает собственный вес конструкции. Применение цементов высоких марок и с ускоренными сроками

твердения в большинстве случаев позволит упростить изготовление конструкций, исключить дополнительный технологический передел — тепловлажностную обработку.

Для наиболее полного использования прочности оптимальным вариантом является классификация цемента по активности. Разбивка цемента по маркам с интервалом в 100 кг/см^2 (10^{-1} МПа) наиболее близка к оптимальному варианту. Членение цемента по прочности через 50 кг/см^2 (10^{-1} МПа), приближающееся к членению по активности, в данное время реализовать трудно, так как при поступлении цемента разной активности из-за ограниченности складских помещений на строительство хранить его раздельно не удастся. Уменьшение числа марок возможно за счет выпуска в основном цемента наиболее высоких марок (преимущественно 500 и 600, а с течением времени 700 и 800) при ограниченном количестве выпуска цемента М 400 и в случае прикрепления всех строительных объектов к определенным цементным заводам.

В данное время такое прикрепление заводов может быть реализовано, чему способствует улучшение географии размещения цементных заводов, обеспечившее значительное сокращение перевозок цемента. Например, если в 1950 г. среднее расстояние перевозки цемента составляло 680 км, то в 1966 г. оно сократилось до 494 км. Кроме повышения марочности цемента, особое значение имеет и совершенствование других его свойств, значение которых для долговечности отмечено выше, а физико-химическое обоснование последней детально изложено в разделе втором, гл. VIII.

Надо отметить, что впервые в СССР в гидротехническом строительстве, начиная с 1935 г., обращено внимание на необходимость нормировать кроме прочности другие свойства цементов, позволяющие получать бетоны для ответственных инженерных сооружений с проектными водонепроницаемостью, морозостойкостью, экзотермичностью и химической стойкостью при разных случаях агрессии. В частности, уже в 1934 г. на строительстве канала им. Москвы осуществлено проектирование бетона на разные сроки твердения — короче 28 сут. и более продолжительные (вплоть до одного года и больше). В течение ряда лет создавались и совершенствовались локальные технические требования на цемент для многочисленных гидротехнических сооружений (ГЭС на р. Волге, Волго-Донской канал им. В. И. Ленина, Саратовская ГЭС, Братская ГЭС, Красноярская ГЭС и многие другие гидротехнические сооружения).

Следует учитывать, что в гидротехническом строительстве применяется несколько сортов цемента, различающихся по свойствам, что связано с условиями работы бетона сооружений. По этой причине цемент, применяемый в гидротехнике, не следует называть гидротехническим, так как подобные условия работы бетона возникают и в других сооружениях (промышленных, мостовых, дорожных и др.). Все цементы, выпускаемые промышленностью, надо каталогизировать, что позволит от теоретических положений перейти к применению цементов со свойствами, отвечающими условиям работы. Такое коренное изменение сведений о свойствах цемента, не-

сомненно, обеспечит минимальный их расход и высокую долговечность сооружений, конструкций и деталей.

§ 11. Микробетон Юнга и контракция цементов

Использование потенциальных возможностей цемента к моменту получения марки бетона имеет большой научный и практический интерес. Важно научиться прогнозировать свойства бетона с течением времени. Возможность управления свойствами бетона в направлении, необходимом для целей строительства, связана с определением количества цемента, вступившего в реакцию с водой на каждый конкретно рассматриваемый период и созданием цементного камня такой структуры, в которой не будет мест скопления влаги.

Известно, что при твердении портландцемента (и ряда других вяжущих) уменьшается суммарный объем твердой и жидкой фаз. Такое изменение объема — как бы его стяжка, названное контракцией, вызывает внутренний вакуум в формирующемся материале с образованием пор, часть из которых имеет специфическое строение. В таких контракционных порах находится сжатый воздух — амортизатор возникающих напряжений, в том числе напряжений, вызываемых переходом воды в цементном камне из жидкого состояния в твердое (лед). В итоге разработок, осуществленных еще в 1938—1940 гг. кафедрами вяжущих материалов МХТИ им. Менделеева (В. Н. Юнгом и Ю. М. Буттом) и Технологического института им. Ленсовета (С. Д. Окорочевым), было показано, что на 28 сут. твердения в реакцию вступает от 40 до 60% цемента.

Следовательно, в цементном камне находятся новообразования из зерен цемента, вступивших в химическую реакцию с водой, и зерна в виде тех же клинкерных минералов, которые были в цементе, до его использования, т. е. как бы повторяется приготовление цемента с минеральными добавками. Различие состоит в том, что при обеспечении длительного и непрерывно протекающего процесса твердения в чисто клинкерном цементе будет систематически уменьшаться количество зерен, не вступивших в реакцию. Это характеризуется улучшением всех свойств бетона (прочности, водонепроницаемости, морозостойкости, ползучести и др.). Такой цементный камень был назван микробетоном Юнга.

Естественно желание уменьшить в цементном камне содержание зерен, не вступивших в реакцию, доведя микробетон до состояния искусственного камня, составленного только из одних новообразований. Анализ причин образования микробетона, т. е. неполного использования потенциальных возможностей цемента, показывает, что основными причинами этого являются наличие в цементе медленно твердеющего минерала C_2S , особенность твердения минерала C_3A и размер зерен цемента. При этом не надо забывать природу портландцемента, состоящего в основном из силикатов кальция (C_3S и C_2S), твердение которых в отличие от твердения алюминатов кальция (а также алюмоферритов) требует более

продолжительных сроков. Это хорошо видно из сравнения сроков твердения высокопрочных быстротвердеющих портландцементов и глиноземистых цементов. Причины такого различия изложены в § 8, где рассмотрено твердение цемента как процесса коррозии минералов, из которых он состоит.

Анализ цементного камня как микробетона позволяет: разработать приемы расчетного определения прочности цемента в различные сроки твердения; организовать твердение бетона с направленным использованием процесса контракции всего цемента для существенного изменения его долговечности (устранения дефектных мест, образующихся при заполнении контракционных полостей только водой, а не водой и воздухом); проектировать смешанные цементы с ограниченным сроком твердения благодаря изъятию крупных зерен и замены их порошком природных материалов, для чего помол таких цементов должен осуществляться с отбором фракций цемента в диапазоне заданных размеров; пересмотреть взгляд на распределение воды в структуре цементного камня и текстуре бетона, что позволит существенно изменить технологию производства цемента, кривая распределения гранулометрического состава которого находилась бы в узких пределах, а абсолютные значения размера зерен подбирались бы для разных бетонов и т. д.

Интересно отметить, что в соответствии с природой минералов изменяется и величина их контракции. В табл. 1.21 приведены результаты контракции синтетических мономинеральных цементов, обработанные проф. В. В. Некрасовым на базе опытных данных Пауэрса, а в табл. 1.22 — заводских цементов.

Таблица 1.21

Синтетический мономинеральный цемент	Контракция, мл на 100 г	
	к марочному сроку в 28 сут	при полном использовании минерала без микробетона Юнга
Алитовый	5,2	6,0—7,5*
Белитовый	1,2	5,5—6,5*
Алюминатный	17,0**	18—25
Алюмоферритный	9,0	14—19

* Возможно некоторое увеличение контракции за счет пахухания.

** Экстраполяция Пауэрса.

Проверка подтверждает известное различие контракции при твердении до 28 сут., что объясняется неодинаковой дисперсностью порошка. Показатели контракции при ее определении показывают ход развития процесса твердения. Данные о контракции цементов убедительно отмечают различие в минералогических составах цемента, если остальные условия испытания равнозначны (дисперсность, содержание гипса и др.). У лежалых цементов, поверхность зерен которых корродирована, контракция фиксируется резко снижающимися контракционными показателями, а также

Таблица 1.22

№ опыта	№ цемента	Количество дозавок, %		Величина контракции цемента (мл.кг) при сроке твердения, сут.											
				гипса с. с. б.											
		1	2												
I	1	11,4	23,9	28,4	35,1	33,9	38,0	38,8	41,4	—	—	—			
	2	11,2	17,0	32,5	40,4	43,2	45,1	46,5	48,4	49,9	—	—			
	3	7,3	8,7	15,6	27,4	31,9	34,4	35,8	37,2	—	—	—			
	4	11,9	13,1	14,3	20,6	29,6	34,8	40,8	43,2	43,2	44,3	—			
	5	11,6	15,8	23,2	38,0	41,5	43,3	44,5	45,5	45,5	45,5	—			
	6	20,6	28,1	36,9	41,5	43,1	44,3	45,0	45,8	46,6	51,1	—			
	7	13,7	25,2	38,2	43,4	45,7	47,0	48,5	49,1	50,5	—	—			
	8	11,1	28,0	35,2	42,9	47,4	—	—	—	—	—	—			
II	9	8,8	14,0	18,7	22,6	24,8	25,2	24,1	—	—	—	—			
	10	6,2	11,3	21,0	25,1	27,5	28,7	—	—	—	—	—			
	11	7,3	8,0	9,0	—	13,4	21,1	23,9	28,1	30,7	37,7	—			
	12	4,3	11,7	17,9	—	23,6	25,3	26,2	23,9	26,9	—	—			
	13	10,8	20,9	27,8	30,1	31,8	32,5	33,3	—	—	—	—			
	14	7,6	19,4	27,1	29,7	33,0	35,4	35,8	42,4	42,8	43,3	—			

Примечания: 1. Минералогический состав цементов № 1—8 (%): 39 — C_2S , 37 — C_3S , 11 — C_4AF , 11 — C_3A , 11 — C_4AF ; В/Ц=0,58. Навеска цемента в обоих опытах в среднем 290 г.

2. Минералогический состав цементов № 9—14 (%): 32,4 — C_2S , 30,8 — C_3S , 10,7 — C_4AF , 10,9 — C_3A , 10,9 — C_4AF ; s=5110 cm^2/g . В обоих случаях процент с. с. б. приведен по сухому остатку к массе цемента. Клиники заодские: помол на большой лабораторной мельнице.

3. Надо особо учитывать, что при пропаривании или иных условиях теплозащитного ускорения твердения бетонов (растворов) контракция протекает различно, что связано с природой процесса их твердения. Для бетонов на микропортландцементе тонкого помола с высоким содержанием гранулированных шлаков контракция характеризуется лучшими результатами по сравнению с контракцией исходных портландцементов.

снижением прочности образцов. Любая блокировка поверхности зерен цемента будет хорошо регистрироваться по контракционным кривым, чем пользуются в научных исследованиях.

Однако использование в научных и практических целях контракционных показателей цемента, не имеющих универсальности, надо сочетать с другими характеристиками (см. раздел второй, гл. IV). Отсутствие возможности использовать контракционные показатели для определения морозостойкости бетона можно объяснить нестабильностью физического состояния затвердевшего гидратированного трехкальциевого алюмината во влажных условиях, хотя последний имеет наибольший контракционный эффект, а также твердением цемента в цементный камень, из которого с течением времени вновь образующиеся контракционные поры не имеют воздушных амортизаторов при изготовлении бетона из широко применяемых составов по традиционным технологиям.

§ 12. Методы испытания цемента

Методы испытания цемента, как видно из § 10, разнообразны: это химические и минералогические анализы, физические и механические. Если цемент при поступлении имеет необходимые паспортные данные и правильно хранился, то на объектах строительства или заводах сборного железобетона испытание не повторяют. Под необходимыми паспортными данными понимают объем сведений, используемых в строительстве. Не во всех случаях для производства бетонных работ достаточно только паспортной характеристики, которой, как известно из ГОСТ 10178—62, является гарантированная марка цемента. Строители должны своевременно запрашивать у завода-поставщика цемента дополнительные паспортные сведения, которые могут быть высланы потребителю цемента только по его просьбе. Без наличия всех необходимых для производства работ показателей качества цемента цемент не может быть использован.

Рассмотрим следующие виды испытаний, проводимые для определения пригодности цемента для производства бетонных работ: химический анализ клинкера (SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , Mn_2O_3 , CaO , MgO , SO_3 , п. п. п.); коэффициент насыщения кремнезема известью; силикатный модуль; глиноземный модуль; минералогический состав клинкера и его петрография; содержание свободной окиси кальция; содержание щелочей K_2O и Na_2O ; химический состав минеральных добавок (для золы определяется содержание SiO_2 , Fe_2O_3 , CaO , MgO , SO_3 , а для гранулированного доменного шлака — SiO_2 , Al_2O_3 , CaO , MgO , FeO , MnO , S , P_2O_5 , TiO_2); содержание порошкообразных минеральных добавок, гипса, ПАВ (гидрофильных и гидрофобных); плотность цемента; нормальная густота цемента; тонкость помола, подвижность растворной смеси; сроки схватывания, равномерность изменения объема; механическая прочность на разные сроки твердения; впитываемость воды (для гидрофобных цемента).

Подобные испытания проводят лишь в крупных центральных лабораториях строительства и научно-исследовательских институтах.

Химический анализ клинкера. В клинкере (или в чистом без добавок портландцементе) должно содержаться окислов: 62—67% CaO , 20—24% SiO_2 , 4—8% Al_2O_3 , 2—6% Fe_2O_3 , меньше 5% MgO , меньше 1% SO_3 , в незначительном количестве ряд других окислов. Для глиноземистого цемента осуществляется химический анализ на содержание глинозема, кремнезема, окиси железа, окиси кальция и сопутствующих им окислов (TiO_2 , MgO , SO_3 , R_2O). Для специалистов важно знать соотношение окислов (их силикатный модуль, который колеблется от 1,7 до 3,5, и глиноземный модуль, который составляет от 1 до 3). При указанном здесь содержании химических окислов получается много портландцементов, резко различающихся по строительно-техническим свойствам. Не подобрав сырьевую смесь нужного химического состава, т. е. не сделав первый шаг в сложном процессе изготовления цемента, нельзя осуществлять последующие шаги — технологические переделы.

Главные компоненты клинкера (CaO , SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3), образующие при обжиге минералы — силикаты кальция, алюминаты и алюмоферриты, которые обеспечивают получение силикатов при более низких температурах обжига, чем в условиях беспримесного обжига — без окислов Al_2O_3 и Fe_2O_3 , нормируются в строгих пределах. Такие окислы, как MgO и SO_3 , резко снижающие качество цемента, нормируются по верхнему пределу. Наличие в клинкере MgO и SO_3 связано с минералогическим составом сырья. Окись магния в зависимости от температуры обжига получается разного качества, что легко определяется по ее плотности. Так, при низких температурах обжига плотность MgO равна 3,3 г/см³, а при высоких (не менее 1400° С) — 3,58 г/см³.

В курсе строительных материалов на примесь магния в карбонатном сырье указывают в связи с выбором температуры его термической диссоциации. Повышенная температура обжига приводит к образованию периклаза, не обладающего в короткие сроки твердения гидравлической активностью, в отличие от более активной низкотемпературной каустической окиси магния. Количество каждой формы MgO , ее распределение в цементном клинкере (в алите, алюмоферритной фазе, в алюминатной фазе, в стекле) имеет существенное значение для качества клинкера. В частности, кристаллы периклаза, содержащие значительное количество стекловидной фазы, мельче в быстроохлажденных клинкерах*. Наличие MgO в цементе может при длительном твердении привести к разрушению бетона вследствие его гидратации, последующей за твердением минералов цемента. Для определения протекания этой реакции це-

* Это связано с большей растворимостью MgO в стекле по сравнению с растворимостью алюмоферрита в кристаллических фазах. В цементе может находиться значительное количество стекловидной фазы (от 25% по теоретическим расчетам до 8—10% при медленном охлаждении клинкера).

мент с MgO в виде лепешек подвергают тепловой обработке в автоклавах при давлении пара в 20 ат (10^{-1} МПа).

Следовательно, надо знать, какой расчетный химический состав будет у цемента (для этой цели сырье корректируют, вводя добавки). Коэффициент насыщения KN , силикатный и глиноземный модули показывают степень приближения химического состава обжигаемой смеси к проектируемому; содержание свободной окиси кальция — показатель степени усвоения извести при данном значении насыщения ею кремнезема.

Минералогический анализ — это окончательный, следующий за химическим составом показатель качества клинкера. По данным химического состава и модулям с должной полнотой нельзя определить строительно-технические свойства цемента, так как одно и то же количество окислов даже при незначительном изменении технологического процесса (например, грубом помоле сырья) поразному соединится в новые минералогические ассоциации. При этом химическим анализом будет установлен один и тот же состав для клинкеров, различных по технологии получения, но одинаковых по исходному сырью (см. § 4, 5, 8, 9). Заметим, что в отличие от химического состава минералогический состав — определитель широко известен строителям. Однако, как ранее было сказано, без ориентировки на химический состав сырья нельзя получить клинкер надлежащей минералогии.

Содержание K_2O и Na_2O не только существенно ухудшает качество цемента, например ускоряет сроки схватывания, но в определенных условиях может привести к катастрофическому разрушению бетонных (железобетонных) сооружений. Следует помнить, что коррозия бетона при наличии цемента со щелочами и кремнеземом аморфным, активным SiO_2 в каменном заполнителе протекает независимо от внешних условий, т. е. не связана с внешней средой (см. раздел второй, гл. X).

Химический состав минеральных добавок влияет на свойства портландцемента (см. § 13). По этой причине специалистам необходимо знать, какие добавки надо вводить в цемент (или какие ввели) и в каком количестве. Если бетон работает в особо сложных условиях (см. раздел второй, гл. X), в цемент не надо вводить такие добавки. Таким образом, при испытании цемента необходимо знать качество и количество минеральных добавок, их генезис, химический состав, тонкость измельчения, технологию их введения. Многочисленные экспериментальные работы в этой области отражают качество таких цементов и особенности их использования. При введении неактивных минеральных и порошкообразных добавок разного вида в больших количествах (более 15%) переводят портландцемент в группу смешанных цементов (см. § 13), значительно отличающихся по свойствам от исходного портландцемента. Такие цементы представляют большой народнохозяйственный интерес и их применение в ряде случаев весьма эффективно.

Если виды испытаний 1—9 (см. стр. 50) можно объединить общим названием химико-минералогических показателей качества

цемента, то 10—17 относятся к физико-механическим показателям качества цемента. Действительно, физическое состояние цементного теста — цементного камня связано не с одним, а со многими показателями и является производным от ранее рассмотренных химико-минералогических показателей и тонкости помола цемента. Нормальная густота цементного теста и равномерность изменения объема твердеющего сформованного образца (лепешки из цементного теста) зависят от ряда причин, заложенных в химико-минералогической основе цементного порошка и его дисперсности. Эти относительно простые для опытного лаборанта определения физических характеристик позволяют оценивать: а) особенность цемента с водой приобретать пластичное состояние; б) скорость его изменения при протекании процессов гидролиза и гидратации и сохранении при этом сплошности цементного камня — псевдотвердого тела (т. е. условно твердого, так как в цементном камне имеются поры — разрывы сплошности материала). Определяя эти три технические характеристики простыми стандартными методами, можно ответить на практические вопросы о пригодности или непригодности цемента.

При получении положительного ответа строителю при изготовлении бетона не нужно знать химико-минералогические характеристики цемента и, в частности, с каким количеством гипса, влияющего и на показатель нормальной густоты, приготовлен цемент. Однако механическую прочность раствора (механическую прочность цемента) нельзя правильно оценить без анализа химико-минералогических показателей в полном их объеме (определения). Рассмотрим причины разложения в подходе к анализу качества цемента в первом случае (анализ показателя нормальной густоты, сроков схватывания, равномерности изменения объема без привлечения химико-минералогических показателей) и во втором, когда определяется тонкость помола, подвижность растворной смеси и механическая прочность цемента на разные сроки твердения. По показателям первой группы цемент бракуют.

Действительно, нельзя использовать цемент-быстрок при бетонировании сооружений, когда требуется обеспечить стабильность бетонной смеси не менее чем в течение 40—50 мин. Нельзя также готовить бетон на цементах с неравномерным изменением объема, т. е. с твердением цемента и растрескиванием формирующегося в бетоне цементного камня. Любой анализ указанных причин объяснит суть недостатков. Существуют приемы исправления этих недостатков (введение гипса в бетоносмеситель и выдерживание цемента на складах), однако указанные отклонения от норм недопустимы.

Если бы показатель механической прочности цемента, например активность, был связан зависимостью с другими свойствами, вопрос использования цемента решался бы без привлечения других характеристик. Однако такой однозначной зависимости нет, тем более ее нет между прочностью цемента и другими свойствами. Существует возможность прогноза свойств цемента через ряд по-

Таблица 1.23

Виды цемента, выпускаемого промышленностью*	Марка цемента**	Виды цемента, выпускаемого промышленностью*	Марка цемента**
<i>Портландцемент</i>		<i>Шлакопортландцемент</i>	
Обыкновенный и без- добавочный	300, 400, 500, 600	Обыкновенный	200, 300, 400, 500
Быстротвердеющий	400, 500, 600	Быстротвердеющий	400, 500
Пластифицированный	300, 400, 500	Гидротехнический	300, 400
Гидрофобный	300, 400, 500	Сульфатостойкий	400
Сульфатостойкий	300, 400	Быстротвердеющий по ТУ	400
Дорожный	400, 500, 600	Декоративный	400
Для железобетонных изделий пропариваемых	400, 500	<i>Пуццолановый портландцемент</i>	
С умеренной экзотер- мией	300	Обыкновенный	200, 300, 400, 500
Декоративный	300, 400, 500	Сульфатостойкий	200, 300, 400
Гидротехнический	300, 400	Гидротехнический	200, 300, 400
Для асбестоцементных изделий	300, 400, 500, 600	<i>Глиноземистый цемент</i>	
Тампонажный	25,9—41,6*** 22,1—72,0****	Обыкновенный	400, 500, 600
Сланцезольный	400	Гипсо-глиноземистый	400
Песчанистый по ТУ	400, 500		
Барийсодержащий	400		
Экспортный BSS	400		

* Кроме указанных видов цемента промышленность выпускает кислотоупорный цемент, сульфато-шлаковое вяжущее и вяжущее для строительных растворов (из них часть известково-шлакового М 150).

** Средняя в 1972 г.: для портландцемента — 421 кг/см²; пуццоланового портландцемента — 358 кг/см²; глиноземистого цемента — 430 кг/см²; шлакопортландцемента — 328 кг/см²; (10⁻¹ МПа²).

*** $R_{изг.}^{22}$.

**** $R_{изг.}^{75}$.

казателей, которые приведены выше. Зная тонкость помола цемента, вид и количество минеральных добавок, подвижность растворной смеси при стандартном В/Ц (или изменение В/Ц при стандартной подвижности растворной смеси), количество гипса в цементе, минералогический состав клинкера и его петрографию, наличие или отсутствие в цементе ПАВ, можно с достаточной для практических целей достоверностью определить свойства цемента.

На строительной площадке к этому надо добавить и определенные показатели свежести поверхности зерен цемента — п. п. п. При использовании цемента для бетона (раствора) конструкций, находящихся в стабильных условиях, без агрессивного воздействия внешней среды, выбор цемента ограничивается только показателем механической прочности на марочный срок. С бурным развитием производства сборного железобетона одной марочности цемента для неагрессивной работы бетона становится недостаточно.

В этом случае возникают новые условия для выбора цемента, связанные с назначением величины отпускной прочности бетона в изделиях (конструкциях) и условиями твердения при повышенных

температурах. Это требует анализа всех характеристик цемента. Опыт показывает, что учет сказанного об анализе показателей, который приведен в перечне определений, позволяет правильно использовать цемент в строительстве. Приемы определения указанных показателей качества цемента систематически совершенствуются, что улучшает и степень достоверности прогноза оптимальных условий приготовления и использования цемента.

§ 13. Портландцемент и цементы на его основе

Портландцемент — гидравлическое вяжущее, являющееся продуктом совместного тонкого измельчения клинкера и гипса. Виды цемента даны в табл. 1.23. Клинкер получают в результате обжига, доведенного до спекания сырьевой смеси запроектированного состава. При этом в клинкере преобладает силикатная группа минералов C_3S и C_2S . В зависимости от состава сырьевой смеси, равномерности и тонкости измельчения, условий обжига (типа печи, качества топлива, техники обжига, температуры отдельных зон и скорости охлаждения клинкера) цемент получают с разным составом основных клинкерных фаз. Показанные выше (см. § 4) минералы в чистом виде, как правило, встречаются весьма редко из-за наличия в сырье примесей. В процессе обжига эти примеси образуют с минералами силикатной группы (C_3S и C_2S) и с минералами, входящими в промежуточное вещество (C_3A и C_4AF), новые соединения типа твердых растворов. Следовательно, у клинкерных минералов должна изменяться активность. Исследования минералов промежуточного вещества показали, что существуют соединения $C_{12}A_7$; C_3F и C_6A_2F с иными свойствами, чем свойства широко известных C_3A ; C_2F и C_4AF .

Минералы силикатной группы бывают нескольких модификаций. Так, минерал C_3S встречается не в чистом виде, а с примесями и может быть представлен в цементе тремя модификациями. По этой причине правильнее его именовать алитом. Чистый минерал C_2S имеет несколько полиморфных* модификаций β - C_2S и γ - C_2S . Модификация β - C_2S называется белитом. В белите содержится примесь окислов железа, титана, возможна примесь Cr_2O_3 .

Алюминатная фаза может быть представлена минералом C_3A , находящимся в промежуточном веществе или кристаллизующем вместе с минералом C_3S , а также соединением $C_{12}A_7$ или при замене части CaO в минерале C_3A — окислами K_2O или Na_2O , соединениями KC_8A_3 и NC_8A_3 . Алюмоферритная фаза в цементе кристаллизуется в промежуточном веществе, которое представляется неоднородной массой, а своеобразным техническим конгломератом, изменение кристаллов которого существенно влияет на прочность цемента. Алюмоферритная фаза состоит из минералов твердых рас-

* Полиморфизм — свойство кристаллизоваться в разных формах при одном и том же химическом составе.

творов в системе $C-C_5A_3-C_2F$ с характерными составами: C_8A_3F ; C_6A_2F ; C_4AF и C_6AF_2 .

Каждая модификация — продукт сложного процесса производства цемента и кристаллизации новых продуктов с изменяющимися в нем температурами по длине печи. Следовательно, чистый трехкальциевый силикат можно получить только в лабораторной печи при температуре более $2070^\circ C$ из чистых окислов и при многократном обжиге материала. Кристаллизация такого синтетического минерала, полученного в описанных условиях, проходит в тригональной сингонии*. В цементах встречаются минералы C_3S с моноклинной и псевдотригональной кристаллической решеткой. Трехкальциевый силикат, полученный спеканием без каких-либо примесей, как правило, имеет кристаллическую решетку триклинной сингонии и редко встречается в производственных портландцементях.

Указанные особенности структуры алита и трехкальцевого силиката в портландцементях одной тонкости измельчения и с одинаковым минералогическим составом вызывают существенные различия в таком важном свойстве, как марочная прочность или кинетика роста прочности цемента. Поэтому для прогноза свойств цемента паспортных сведений недостаточно. Впредь до сплошной каталогизации всей цементной промышленности дополнительные сведения, важные для производства работ, высылаются по запросу строительных организаций.

При микроскопическом анализе шлифов цементного клинкера алит представлен зернами в виде шестигранников различного размера. Белит представлен округлыми зернами желтоватого цвета различного размера. Алюминатная и алюмоферритные фазы с помощью поляризационного микроскопа не определяются.

Существует способ определения минерала C_3A методом прокрашивания красителем кислотным ярко-голубым 3 [1]. При анализе с помощью электронного микроскопа минерала C_3A фиксируется в виде гексагональных призм. Наличие щелочных фаз клинкера, которое с развитием производства цемента и использованием сырья, содержащего много щелочных соединений, заставляет очень внимательно относиться к изготовлению цемента и учитывать сказанное о возможности щелочного разрушения. Например, присутствие в цементе щелочи Na_2O приводит к ускорению схватывания цементного теста, ускорению слеживания цемента при хранении и, в конечном счете, к ухудшению его свойств.

Присутствие в цементе более 0,7% щелочей может привести к аномалиям при твердении бетонов (растворов); например, после

* Кристаллографические классы объединяются по ряду признаков в системы или сингонии: кубическую, квадратную (тетрагональную), гексагональную, ромбическую, моноклинную, триклинную. По мнению одних кристаллографов тригональная сингония — подсистема, входящая в гексагональную систему (в тригональной сингонии 7 видов); по мнению других — самостоятельная ромбоэдрическая система. К этой системе принадлежит около 4,5% всех изученных кристаллов.

твердения более 3 сут. временно прекращается рост прочности. Сказанное объясняется изменением минералогического состава цемента, в котором при обжиге из свободных, оставшихся от связывания с SO_3 щелочных окислов образуются новые сложные соединения например, $\text{K}_2\text{O} \cdot 23\text{CaO} \cdot 12\text{SiO}_2$; $\text{Na}_2\text{O} \cdot 8\text{CaO} \cdot 3\text{Al}_2\text{O}_3$. Из состава этих соединений видно, что они образовались путем замены одной молекулы CaO (ее вытеснения) щелочными окислами в минералах $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ и $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$.

Щелочи в составе сырьевой смеси влияют не только на частичное изменение минералогического состава, но и на глубину процессов. В общем виде — это процессы, связанные с изменением симметрии и размещения псевдоячеек кристаллической решетки всех фаз клинкера. По указанной причине научные разработки в области химии силикатов невозможны без изучения минералов, характера их кристаллизации, распределения в зернах клинкера (цемента), размеров и формы отдельных кристаллов, т. е. совокупности указанных и ряда других характеристик цемента, носящих название структурных. В связи со сказанным рассмотрим строительно-технические свойства портландцементов и свойства, еще не определенные ГОСТом.

Портландцемент, а также пластифицированный и гидрофобный портландцементы выпускаются четырех марок: 300, 400, 500, 600 соответственно с пределами прочности при изгибе 45, 55, 60, 65. В ГОСТе предел прочности цемента принято нормировать только по прочности через 28 сут. твердения. Многолетний опыт показал, что при установившейся технологии приготовления между пределами прочности одного и того же цемента на 28 сут. и другими сроками его твердения существует достаточно стойкое соотношение. В этом случае промышленность может поставлять цемент, не получив еще от лаборатории результаты испытания. Однако цементные заводы обязаны обеспечить соответствие своей продукции записям в паспорте. Для этого на каждом заводе применяется ускоренный метод испытания, позволяющий за сутки получить ответ о пределе прочности цемента на 28 сут.

Поставка цемента с гарантией качества стала возможной только при нормировании предела прочности цемента на определенный срок, который для цементов, твердеющих относительно медленно, равен 28 сут. Несомненно, по мере увеличения выпуска быстротвердеющих и высокопрочных цементов, углубления знаний в области химии цемента этот срок станет короче. Возможность поставки цемента с гарантией не ограничивается только применением ускоренных методов испытания. Гарантия качества — высший класс работы любой отрасли народного хозяйства, итог хорошо продуманного и организованного процесса, высокая квалификация работников предприятия и высокая дисциплина труда. Зная сырье и технологию производства, ведя ее в заданном ритме, обеспечивая бесперебойную работу всех машин и оборудования, работая на высококалорийном топливе стабильного качества, можно гарантировать выпуск высококачественного цемента. Цемент гарантиро-

ванного качества, не требующий проверки прочности в лабораториях строительства, выпускается с колебаниями марки до 5%, что вполне допустимо в строительном производстве.

По требованию потребителей цементные заводы обязаны сообщать дополнительные сведения о качестве цемента, в том числе пределы прочности на 3 и 7 сут. Эти испытания систематически проводятся в заводских лабораториях для текущего контроля и последующей научной обработки, которая необходима с целью развития и углубления многих задач, в том числе стандартизации цемента.

Когда условия работы бетона не осложнены воздействием агрессивных агентов, расчетные требования к конструкции или сооружению ограничены одной марочной прочностью и изготовление бетона не связано с ускоренным режимом твердения. В этом случае цемент назначают в соответствии с прочностью бетона. В иных случаях выбирают цемент, отвечающий всем требованиям проекта сооружения. Иногда может оказаться, что применяя портландцемент, не удастся обеспечить все технические требования, заложенные в проекте. Тогда выбирают другие виды цемента, о свойствах которых говорится далее. Свойства портландцемента регулируют рядом приемов, о которых сказано ранее.

Из большого разнообразия видов портландцемента, различающихся по химико-минералогическому составу и ряду других существенно важных характеристик, выделяются только четыре: пластифицированный, гидрофобный, быстротвердеющий, сульфатостойкий. Цемент с умеренной экзотермией выпускают по специальным условиям.

Введение в цемент 15% минеральных добавок невысокой активности несколько понижает его марку и замедляет твердение в нормальных условиях. Однако показателя предела прочности недостаточно для выбора портландцемента; необходимо придерживаться определенного методического подхода, который следует из дальнейшего анализа особенностей рядового портландцемента. Быстротвердеющие цементы характеризуются не только скоростью упрочнения бетона, но и высокой прочностью.

Цементы, содержащие ПАВ (гидрофильные и гидрофобные), являются обычными портландцементами. Гидрофильную добавку с. д. б. в зависимости от состава цемента и тонкости его измельчения вводят от 0,15 до 0,25% от его массы в пересчете на сухое вещество добавки. Гидрофобную добавку вводят от 0,06 до 0,3% в пересчете на сухое вещество. Как правило, высокого эффекта пластификации достигают, когда в цементе мало минералов C_3A , оптимальное количество гипса, много мелких зерен.

В ГОСТ 10178—62 стандартизируется портландцемент для бетонных покрытий автомобильных дорог и аэродромов. Рассмотрим, как формировались требования в стандарте на этот портландцемент. Зная, что формирование тонкой бетонной плиты дорожных и аэродромных одежд протекает в сложных условиях, необходимо было исключить применение минеральных добавок (в последующем

было разрешено вводить до 15% молотых гранулированных шлаков, к сожалению не нормированных по тонкости измельчения). Этому же условию были подчинены выбор минералогического состава и введение в цемент ПАВ. Условия транспортирования бетонной смеси потребовали продления сроков схватывания до 2 ч против стандартных 45 мин. Учитывая, что минерал C_3A ухудшает ряд свойств (сроки схватывания, морозостойкость бетонов), его содержание в цементе ограничено до 10%.

Опыт показывает, что дальнейшее развитие теории о работе таких плит нуждается в совершенствовании качества цемента для дорожного и аэродромного строительства и, в частности, в уточнении состава цемента для применения в жарком и сухом климате, при напряженном армировании бетона и ряде других условий. По аналогии с этим следует выбирать цементы и для других условий, помня, что такие цементы пока не дифференцированы по свойствам.

На основе анализа поведения материала при разной организации строительства, условий его работы в различных агрессивных средах производится «выборка» таких сведений. Последние объединяют в перечень технических условий, которые позволяют выбрать необходимые цементы.

Портландцементы с характерно выраженными особенностями (сульфатостойкостью и с умеренной экзотермией) применяют в строительстве для получения специальных видов бетона. До включения в ГОСТ такие цементы выпускали по временным техническим условиям. По мере совершенствования научных разработок по отдельным свойствам бетона, таким, как трещиностойкость, ползучесть, лимитированная усадка, регулируемая кинетика упрочнения, цементы будут выделены в особые ГОСТы.

Сульфатостойкий портландцемент обладает высокими строительно-техническими свойствами; его изготавливают из клинкера, в котором нормирован минералогический состав, в частности содержание минерала C_3A . Этот цемент имеет пониженные экзотермию и прочность (высшая марка цемента 400 из-за более низкого содержания минерала C_3S). Однако можно выпускать такие цементы с более высокими прочностью и сульфатостойкостью, в частности, из клинкера с повышенным количеством минерала C_3A и гипса при мокром помолу на месте работ.

Портландцемент с умеренной экзотермией в отличие от других портландцементов меньше выделяет тепла в первые сроки твердения, что связано с изменением минералогического состава в клинкере. В этом цементе по стандарту резко снижено количество минерала C_3S и не допускаются минеральные добавки, так как его используют в тех зонах гидротехнических массивных сооружений, которые подвергаются совместному действию воды и мороза. Однако цемент с низкой экзотермией применяется не только во внешних зонах. В настоящее время такой цемент не нормируется ГОСТом и его приходится заказывать по отдельным техническим условиям.

В изготовлении цементов с пониженной экзотермией имеется ряд направлений, связанных не только с их получением на цементных заводах, но и спецификой производства бетонных работ (например, помол клинкера на строительной площадке — одно из таких направлений).

Сказанное об изготовлении и применении портландцемента только для внешних частей (зон) гидротехнических сооружений не находится в полном соответствии с работой бетона этих зон. Известны случаи устройства защитных зон из сборных железобетонных плит на высокопрочном цементе. Низкотермичный цемент в наружных зонах может быть заменен портландцементом другой разновидности при уменьшении толщины наружной зоны. Приведенные примеры показывают, что без тщательного анализа работы сооружения (конструкции) нельзя правильно выбирать цемент, оптимальный по свойствам для данного случая.

Анализ способности цемента выделять тепло при реакции твердения (гидролизе и гидратации) показывает, что экзотермический процесс связан с кинетикой твердения и действующим минералогическим составом*. Следовательно, чем меньше в цементе мелких зерен, тем меньше выделится тепла (табл. 1.24). Нами предложено тонкие фракции цемента отмывать или организовать их отбор на цементных заводах, готовя из них быстротвердеющие и высокопрочные цементы, а из крупных фракций — цементы для бетонирования массивных конструкций. Для создания монолитных высококачественных конструкций необходим длительный непрерывный процесс постепенного ввода в реакции гидролиза и гидратаций всех зерен крупных фракций цемента, в противном случае бетон будет иметь низкие технические свойства. После длительного твердения такие бетоны отличаются высокими морозостойкостью и водонепроницаемостью.

Чистые портландцементы с низкой экзотермией используют для сооружений, работающих во внешней агрессивной среде: монолитных телевизионных башен, градирен, силосных башен, ящиков-гигантов для гидротехнического строительства при организации твердения бетона в условиях, близких к стандартным. Внутренние зоны массивных конструкций надо бетонировать, используя смешанные цементы, состоящие из двух и большего числа компонентов, а также пуццолановые или шлакопортландцементы.

Пуццолановые портландцементы. Плотность пуццолановых портландцементов ниже портландцемента из-за наличия в них гидравлических добавок и равна 2700—2900 кг/м³. Пуццолановые портландцементы выпускают марок: 200, 300, 400 и 500 с минимальным пределом прочности при изгибе соответственно 35, 45, 55 и 60 кг/см² (10—1 МПа).

* Действующий минералогический состав связан с качеством и размерами поверхности контакта жидкой фазы — воды с твердой фазой — поверхностью зерен цемента.

Все виды пуццолановых цементов, полученных заводским путем, содержат различные по составу совместно измолотые клинкеры, гидравлические (пуццолановые) добавки и гипс. Разрешается раздельно молоть клинкер с гипсом и гидравлической добавкой с обязательным последующим тщательным смешиванием. Количество вводимой гидравлической добавки (ГОСТ 6269—63) зависит от ее генезиса: добавки осадочного происхождения — 20—30%; добавки вулканического происхождения, а также добавки обожженной глины, топливной золы и глиежи — 25—40%.

Пуццолановый портландцемент может твердеть в воде и во влажных условиях. Под влажными надо понимать такие условия, при которых в твердеющем на воздухе бетоне (растворе) с пуццолановым цементом сохраняется вся вода, введенная при приготовлении бетона. Опыт показывает, что остается открытым вопрос о надежной работе бетона в заданные сроки при применении пуццолановых цементов с любым указанным в ГОСТе количеством и качеством добавок после упрочнения на воздухе.

На строительстве канала им. Москвы был разработан и применен способ мокрой пуццоланизации цемента в бетоносмесителях с мягкой осадочной гидравлической добавкой — трепелом, образующем в воде достаточно устойчивую суспензию. На таком пуццолановом цементе уложено примерно 2,5 млн. м³ бетона в ответственные гидротехнические сооружения этого уникального объекта. Для бетонных дорожных и аэродромных покрытий пуццолановые цементы непригодны из-за того, что нельзя создать условия длительного твердения для полноценного связывания извести (см. § 8) и обеспечения работы во влажных условиях.

Для ряда конструктивных деталей и частей сооружений (фундаментов под опоры мостов, водопропускных труб под насыпями дорог, набивных и забивных свай) пуццолановый портландцемент служит основным вяжущим материалом. Благодаря высокой стойкости в мягкой воде, а также возможности получения бетона с высокой водонепроницаемостью такое вяжущее незаменимо при возведении подземных сооружений (тоннелей, шахт, подземных коммуникаций, массивных конструкций, работающих под напором, подвалных этажей).

Существенным недостатком этого гидравлического вяжущего является высокая водопотребность, из-за чего пуццолановые портландцементы имеют высокую нормальную густоту, превышающую даже наиболее высокий показатель нормальной густоты рядовых портландцементов. Наиболее высокая водопотребность у цементов с трепелом и ему подобными рыхлыми и мягкими добавками, хорошо распадающимися в воде. Нормальная густота пуццолановых портландцементов колеблется в пределах 35%.

Для работы бетона в условиях, аналогичных приведенным при наличии агрессивных сульфатных вод, можно применять сульфатостойкий пуццолановый портландцемент. Как и обычный пуццолановый портландцемент, так и эту его разновидность нельзя использовать в бетоне, предназначенном для сооружений, подвергающих-

Таблица 1.24

№ п. п.	Цемент	Удельная поверхность цемента, см ² /г	П. п. п., %	Изменение температуры бетона и удельной теплоты гидратации цемента			
				Δt бетона, °С	q цемента, ккал/кг	Δt бетона, °С	q цемента, ккал/кг
				Продолжительность твердения, сут.			
				3		7	
1	Портландцемент М 400 Белгородского завода	3130	1,05	21,9	53,7	23,8	50,8
2	Мелкофракционный портландцемент однократной мокрой сепарации из портландцемента № 1	5240	6,87	29,8	73,2	38,2	95,2
3	Грубофракционный портландцемент двойной мокрой сепарации из портландцемента № 2	769	1,21	11,8	29,0	19,4	47,6
4	Портландцемент М 400 Здолбуновского завода	3027	1,23	29,0	74,2	30,6	78,4
5	Портландцемент М 500 Здолбуновского завода	—	—	30,8	78,8	38,2	97,0
6	Грубофракционный портландцемент однократной мокрой сепарации из портландцемента № 5	—	2,18	12,8	31,8	22,0	56,4
7	Портландцемент М 400 Ульяновского завода	3600	2,43	27,0	69,2	36,6	93,7
8	Грубофракционный портландцемент однократной мокрой сепарации из портландцемента № 7	2286	4,35	9,4	24,1	16,7	42,8
9	Грубофракционный портландцемент двойной мокрой сепарации из портландцемента № 4 после 2 сут. вылеживания под водой	1976	4,85	6,7	17,3	7,0	17,9
10	Грубофракционный портландцемент двойной мокрой сепарации из портландцемента № 4 после 1 сут. вылеживания под водой	1699	3,26	7,6	19,5	12,0	30,8
11	Шлакопортландцемент опытного завода в г. Харькове с 60% клинкера и 40% тонкомолотого гранулированного шлака	3300	—	25,4	65,1	31,0	79,4

№ п. п.	Цемент	Удельная поверх- ность цемента, см ² /г	П. п. п., %	Изменение температуры бетона и удельной теплоты гидратации цемента			
				Δt бе- тона, С	q це- мента, ккал/кг	Δt бе- тона, °С	q це- мента, ккал/кг
				Продолжительность твердения, сут.			
				3		7	
12	Гидротехнический це- мент по ГОСТ 4797—64	—	—	—	50,0	—	60,0
13	Измененный среднетер- мичный цемент США II типа	—	—	—	57,9	—	70,2
14	Низкотермичный це- мент США IV типа . . .	—	—	—	47,5	—	55,5

Примечания: 1. Тепловыделение цемента определяли в адиабатических условиях твердения образцов бетона с автоматическим регулированием (регулирование адиабатических условий в термостатах производилось с помощью конвективных термопар).

2. Минералогические составы цементов. № 1 — 66% C₂S, 13% C₃S, 5% C₄AF, 13% C₃A; № 4 и 5 — 60% C₂S, 18% C₃S, 8% C₄AF, 13% C₃A; № 7 — 53% C₂S, 22% C₃S, 8% C₄AF, 14% C₃A.

3. Расход цемента № 1 и 4 в бетоне — 250 кг/м³ при В/Ц=0,7.

4. Численные значения удельного тепловыделения цементов q за t суток твердения в адиабатическом калориметре (ккал/кг) рассчитаны по формуле

$$q(t) = \frac{Ц c_{ц} + В c_{в} + П c_{п} + Ш c_{ш} + \frac{P_{бет}}{2} c_{бет}}{Ц} \Delta t(t),$$

где Ц, В, П, Ш — количество материалов, из которых изготовлен образец бетона, уложенного в форму калориметра, кг; c — с соответствующим индексом — удельная теплоемкость материалов в образце бетона и металла формы; $P_{бет}/2$ — показатель, учитывающий тепло, затраченное на нагрев формы и ее крышки, кг; $\Delta t(t)$ — прирост температуры бетона в калориметре на t суток, °С.

сы переменному увлажнению и высыханию, замораживанию и оттаиванию. Этот цемент особенно эффективен при выполнении зимних работ, где его нельзя заменить другим видом. В этом случае надо применить такой прием бетонирования, при котором не замедлялся бы процесс твердения, так как полноценность реакции цемента с водой связана с температурой и влажностью среды (пуццолановые портландцементы даже в нормальных условиях твердения в начале формирования цементного камня медленнее упрочняются, чем портландцемент).

Следует помнить, что большое содержание воды в бетоне на пуццолановом цементе снижает прочность, водонепроницаемость, морозостойкость и другие свойства, но повышает усадку, если допустить испарение воды из бетона. В этом случае на свойства бетона влияет тип гидравлической добавки. Однако с большей водопотребностью бетонные смеси на пуццолановых портландцементях с гидравлическими добавками, имея меньшую пластичность, хорошо уплотняются при одном и том же содержании воды в составе бетона в случае применения вибраторов и меньше расслаиваются.

Пуццолановые портландцементы при твердении выделяют меньше тепла по сравнению с портландцементами на таком же клинке-

ре, что позволяет их использовать при бетонировании массивов. Это обстоятельство надо учитывать в расчетах при организации зимнего бетонирования методом термоса, где важен эффект тепловыделения цемента. В затвердевшем пуццолановом портландцементе значительное количество извести, выделившейся при гидролизе и гидратации минерала C_3S (см. § 8), связывается с активным кремнеземом гидравлической добавки в низкоосновные гидросиликаты кальция. Этот процесс длительный, превышающий 12 месяцев. При этом из-за низкой концентрации извести в цементном камне становятся неустойчивыми высокоосновные гидроалюминаты кальция (C_3AH_6), которые переходят в низкоосновные соединения вида $C_xAH_y - (xCaO \cdot Al_2O_3 \cdot yH_2O)$.

При использовании гидравлических добавок с высоким содержанием растворимого глинозема (следовательно, и реакционноспособного глинозема), который находится в таких добавках, как вулканические туфы (некоторые виды), глиежи и некоторые другие аналогичные им добавки, часть извести может соединиться с глиноземом и образовать в цементном камне дополнительное количество гидратированного трехкальциевого алюмината. Поэтому такие цементы недопустимы в условиях сульфатной агрессии.

Возможно разрушение бетонов на таких цементах и без воздействия внешней агрессивной сульфатной среды — при твердении бетона, например при обычной тонкости помола цемента и содержании в нем гипса в таком количестве, которое не успевает соединиться с гидратированным алюминатом в гидросульфалюминат в период пластично-упруго-вязкого состояния цементного теста. Особый технико-экономический эффект можно получить, если использовать пуццолановый портландцемент с тепловлажностной обработкой бетона. В частности, ряд названных ранее конструктивных частей сооружений можно изготовить на заводе и использовать в оптимальных условиях для обеспечения их долговечной работы. Если при пропаривании бетон в той или иной мере не набирает часть прочности по сравнению с нормальными (стандартными) условиями твердения, то бетон на пуццолановом портландцементе всегда твердеет с лучшими результатами. В итоге прочность и другие свойства бетонов на пуццолановых портландцементях, твердеющих с ускорением процесса, становятся выше, чем у бетонов, изготовленных на цементе без гидравлических добавок, но на таком же клинкере.

Шлакопортландцемент — особый вид гидравлического вяжущего, изготовленного при тонком измельчении клинкера и гранулированного доменного шлака (до 80%). Необходимо уточнить общепринятое положение (ГОСТ 101782—62) о том, что это гидравлическое вяжущее вещество как и портландцементы твердеет в воде и на воздухе.

Если твердение рассматривать отвлеченно, без учета глубины гидролиза и гидратации цемента, то несомненен факт твердения шлакопортландцемента так же, как портландцемента. Как сказано в § 65, даже без воды цементный камень образуется из зерен це-

мента и паров воды, покрывающих поверхность зерен. Однако в технике важно получить материал со свойствами, которые заданы проектом. Многочисленными и многолетними исследованиями свойств шлакопортландцемента показано, что для достижения высоких результатов надо, чтобы твердение протекало без испарения влаги из бетона и в течение длительного срока (значительно превышающего стандартный, при котором определяется его марка), без расслоения на шлаковую и портландцементную составляющие.

Для этого вяжущего оптимальным считается ускоренный режим твердения с избытком влаги в окружающей среде, когда создаются наиболее благоприятные условия для активизации минералов шлака новообразованиями, полученными при гидролизе и гидратации портландцемента. По ГОСТу шлакопортландцемент выпускают следующих марок: 200, 300, 400 и 500 с соответствующими им пределами прочности при изгибе в 35, 45, 55 и 60 кГ/см² (10⁻¹ МПа). Однако применяя тепловлажностную обработку, на шлакопортландцементе меньшей марки можно получить бетон прочностью, равной прочности бетона на портландцементе более высокой марки. При этом свойства бетона на шлакопортландцементе становятся выше аналогичных свойств бетона на нем, если последний твердел марочный срок при стандартных условиях. Тем более они много выше свойств бетона, изготовленного на портландцементе.

Следует остановиться на анализе работ, в которых показано, что бетон на шлакопортландцементе после длительного периода твердения, исчисляемого годами, обладает низкими прочностью и морозостойкостью даже при относительно невысоком содержании гранулированного шлака — до 50%. Причинами низких свойств бетона является невысокая тонкость помола цемента, применение лежалого цемента, бетонной смеси с избыточной пластичностью и неблагоприятные условия твердения. Любое указанное условие приводит к участию в твердении только портландцементного компонента шлакопортландцемента, шлаковая часть остается балластом. По этой причине необходимо создать условия для активного твердения молотого гранулированного шлака в шлакопортландцементе. В противном случае цемент будет типично смешанным (с неактивными порошками).

Как и во все цементы, в которых имеется минерал C_3A , в шлакопортландцементы при помоле вводится гипс. Положительной особенностью этих цементов является их относительно низкая водопотребность, позволяющая готовить смеси с меньшим содержанием воды (на 15—20 л/м³). По сравнению с портландцементами шлакопортландцементы имеют повышенные прочности на изгиб и растяжение и позволяют получать бетон с низкой ползучестью и весьма высокой морозостойкостью.

Процессы твердения шлакопортландцементов (см. § 8 и 9), как и пуццолановых портландцементов, — двухстадийны*. Любое на-

* Первая стадия — процесс гидролиза и гидратации более активных минералов портландцементного клинкера; вторая стадия — реакция, в частности $Ca(OH)_2$ с минералами шлака.

рушение условий, обеспечивающих процессы каждой стадии, приводит к резкому снижению технических свойств. Это хорошо видно из опытов, проводимых параллельно на одних и тех же составах цемента и бетона. При необеспечении оптимальных режимов приготовления цемента и бетона (или бетона на шлакопортландце-

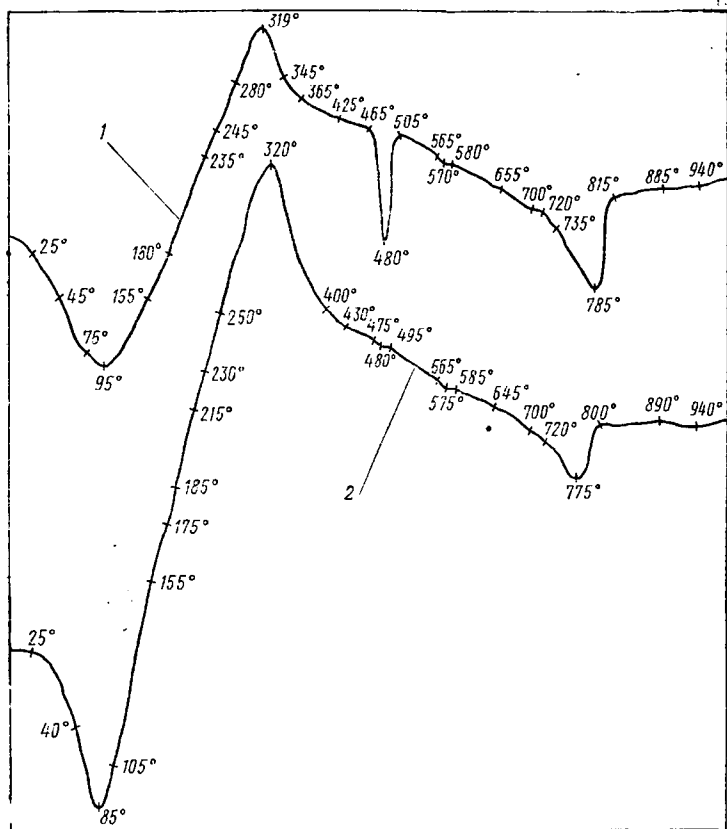


Рис. 1.6. Термограммы дифференциального термографического анализа цементного камня, взятого из бетонных образцов (в возрасте 1 года):

1 — образцы на портландцементе Воскресенского завода подвергались тепловлажностной обработке; 2 — образцы на шлакопортландцементе с 70% клинкера Воскресенского завода

менте) образцы обладают высокой ползучестью и низкой морозостойкостью. Качественное приготовление смеси обеспечивает получение бетона со свойствами, позволяющими его рекомендовать для самых ответственных сооружений (пролетных строений мостов, тоннелей метрополитенов, дорожных и аэродромных плит, набивных и забивных свай, сборных свайных ростверков).

Высокий эффект от пропаривания шлакопортландцемента объясняется связыванием извести минералами шлака. На термограммах (рис. 1.6) видно, как изменился эффект, связанный с дегидратацией $\text{Ca}(\text{OH})_2$ при $465\text{--}504^\circ\text{C}$. Это результат реакции извести с минералами шлака, поверхность которых подвергалась щелочному «возбуждению» и активизации. То же происходит и при сульфатном возбуждении.

На процессе образования гидросульфоалюминатов кальция в итоге сульфатного возбуждения обособывается новый тип шлако-сульфатного цемента, состоящего из молотого шлака и небольших количеств извести и гипса. Этот вид цемента имеет особенности, без учета которых бетон на таком цементе разрушается при нестабильной внешней среде.

Кроме шлакопортландцемента, имеются его разновидности: быстротвердеющий и шлаковый магнезиальный. Быстротвердеющий шлакопортландцемент содержит до 50% шлака и обладает тонкостью помола до $s=4000\text{--}4500\text{ см}^2/\text{г}$. В нормальных (стандартных) условиях бетоны на этом цементе отличаются быстрым нарастанием прочности. В быстротвердеющих шлакопортландцементах снижено содержание шлака, поэтому в цементном камне имеется значительное количество несвязанной извести; после пропаривания морозостойкость бетона становится ниже по сравнению с бетоном на обычном шлакопортландцементе. Действительно, в этом случае снижение морозостойкости связано с ухудшением структуры твердеющего в цементном камне портландцемента, большая часть которого представлена гидратирующимися минералами C_3S ; C_2S ; C_3A и C_4AF (и некоторыми другими фазами портландцементного клинкера), для которых оптимальными являются условия твердения при минимально возможных температурах (близких к нулю).

В стандартных условиях при твердении с заданным количеством воды свойства таких быстротвердеющих цементов лучше. Такие цементы готовят высоких марок — 400 и 500. Через 3 сут. твердения цемент имеет предел прочности при сжатии больше $200\text{ кг}/\text{см}^2$ (10^{-1} МПа), на изгиб — больше $35\text{ кг}/\text{см}^2$ (10^{-1} МПа), что соответствует показателям прочности шлакопортландцемента М200. Для производства этого цемента выбирают клинкер, содержащий повышенные количества минералов C_3S (более 55%) и C_3A (более 8%). Естественно, что от меньшей тонкости помола (менее $4000\text{ см}^2/\text{г}$) и изменения состава клинкерной части и шлаков замедлится твердение.

По имеющимся опытным и практическим данным шлакопортландцемент в железобетонных конструкциях не вызывает коррозии арматуры. Однако нельзя согласиться с безоговорочной рекомендацией применять быстротвердеющий шлакопортландцемент для изготовления методом пропаривания сборного железобетона, подвергающегося в эксплуатации многократному замораживанию и оттаиванию. Опыт показывает, что требуется коренное изменение приемов оценки морозостойкости бетона в конструкциях, так как морозостойкость неармированного бетона отличается от морозо-

стойкости армированного того же состава. Следовательно, чтобы безошибочно назначать долговечные бетоны в ответственные конструкции, надо применять составы, которые имеют максимальную морозостойкость. Полученные исследователями данные о морозостойкости бетона на быстротвердеющем шлакопортландцементе не отвечают указанному положению.

Область применения шлакопортландцементов систематически расширяется. Этот цемент, но с меньшим содержанием шлака, применялся в массивном строительстве (на Каховской и Красноярской ГЭС, в сооружениях черной металлургии), где были организованы вместе с установками по гранулированию шлакового расплава и собственные помольные установки и частично при изготовлении сборного железобетона. Широкий опыт применения шлакопортландцемента известен и из зарубежной практики (например, строительство плотины Бор во Франции).

Бурное развитие сборного железобетона с короткими сроками тепловлажностной обработки заставляет с особым вниманием рассматривать требования к применяемым цементам.

Многолетние работы в этой области (сотрудников кафедры технологии дорожно-строительных материалов МАДИ с Южгипроцементом и НИИЦементом) позволили рекомендовать широкую замену портландцемента на шлакопортландцемент для изготовления сборного железобетона с тепловлажностной обработкой. Особого внимания заслуживает возможность пластифицирования растворов и бетонных смесей на шлакопортландцементе при ускоренных режимах твердения. В этом случае ускорение твердения приводит к резкому возрастанию химического процесса, что позволяет локализовать воздух в контракционных порах и образовывать плотные структуры цементного камня без деструкции. Бетон на шлакопортландцементе при прочих равных условиях имеет также и повышенную сульфатостойкость.

Несмотря на свою «универсальность» шлакопортландцемент можно применять не в любых условиях. Бетоны на этом цементе разрушаются в воде, содержащей свободные кислоты (сточные, болотные и ряд других вод), а также недостаточно стойки в водных растворах с высокой концентрацией магниезиальных солей. Опытные работы последних лет с особой достоверностью показали необходимость пересмотра приемов оценки качества шлаков (см. § 6). Оценка по модулям не дает надежного ответа о возможности успешного использования шлаков. Очень часто на кислых шлаках можно приготовить высокопрочный шлакопортландцемент. Безусловно, на качество шлакопортландцемента влияет не только качество шлака (химико-минералогический состав) и клинкера (химико-минералогический состав клинкера), но и их соотношение и структура шлака.

Магнезиальный шлакопортландцемент отличается от быстротвердеющего шлакопортландцемента только качеством клинкерной части (содержание в нем шлака как и в быстротвердеющем шлакопортландцементе допускается 30—50%). В этом цементе использу-

ется магнезиальный портландцементный клинкер, полученный на основе известково-магнезиальных доломитизированных и глинистых пород. В этом виде цемента раньше допускалось часть шлака (не более 15%) заменять стандартной активной минеральной добавкой, что связано с улучшением какого-либо из свойств шлакопортландцемента или экономических показателей (наличием на месте работ активных добавок или их получением с меньшей стоимостью, чем стоимость шлака). В последнем ГОСТе этот цемент отсутствует.

Смешанные цементы на основе портландцемента. Это название связано с технологией приготовления цемента с различными порошкообразными минеральными добавками, не нормируемыми ГОСТами. Смешанные цементы отвечают широким запросам строительной индустрии, так как применяются для изготовления бетонов относительно невысоких марок, которые выбираются только по показателю прочности. Смешанные цементы можно приготавливать с одной и несколькими порошкообразными минеральными добавками. Такие цементы широко используются не только в бетонах (растворах) относительно невысоких марок, к которым не предъявляется дополнительных требований по качеству (например, морозостойкости), но и в специальных бетонах.

Например, для гидротехнического строительства, внутренних и подводных зон массивного бетона применяли низкотермичный цемент с содержанием клинкерной части (собственно портландцемента) 40—50% и молотого кварцевого песка и трепела 60—50% (от массы смешанного цемента). Молотый кварцевый песок и трепел можно заменить другими молотыми минеральными материалами, если они экономичнее (например, карбонатным порошком и шлаком).

Известно значительное количество составов смешанных цементов, в которых использованы местные добавки, например низкомарочные цементы для кладочных растворов, в которых использованы отходы кирпичного производства (кирпичный бой), с легким и подмоченным цементом.

Для кладочных и штукатурных растворов используют и низкомарочные цементы в смеси с известью, придающей растворным смесям высокую пластичность.

В силу ряда причин, в том числе из-за применения цементов высоких марок, прочность контрольных кубов получается выше проектной. Следовательно, наблюдается перерасход цемента. Если бы для относительно низкомарочных бетонов строители получали цемент в полном соответствии с формулой $R_{\text{ц}} = (2,5-3,5) R_b$, перерасхода цемента не произошло бы. По этой причине производится цемент различных марок, в том числе низкомарочный, названный цементом для строительных растворов (МРТУ 21-39—69). Вследствие грубого помола части шлака на заводах цементной промышленности самая низкая прочность портландцементов составляла в среднем $204,9 \text{ кг/см}^2$ (10^{-1} МПа). Однако этот вид цемента относить к смешанным нельзя.

Действительно, если любой смешанный цемент, содержащий одну или две добавки, как было указано выше, размолоть тоньше, его прочность несколько повысится (рис. 1.7). В шлакопортландцементе указанной прочности (204,9 кГ/см²) при увеличении тонкости помола резко увеличивается прочность, так как мелко измолотый гранулированный доменный шлак является вяжущим и при введении в него извести, гипса или их смеси в соответствующем соотношении обладает высокими строительно-техническими свойствами. В частности, одна из разновидностей такого цемента названа сульфатшлаковой. В состав этого цемента входит 70% гранулированного шлака, 20% клинкера, содержащего не более 8% минерала C_3A и 10% двуводного гипса ($CaSO_4 \cdot 2H_2O$).

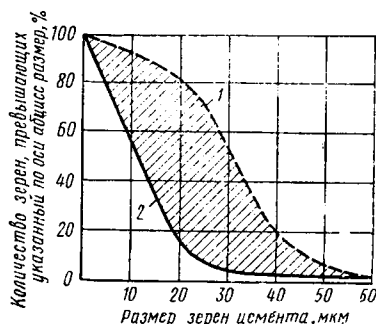


Рис. 1.7. Кривые распределения гранулометрических составов разных по дисперсности портландцементов:

1 — цемент с низким тепловыделением (для нормального твердения требуется длительный срок твердения во влажных условиях); 2 — быстротвердеющий высокопрочный цемент с высоким тепловыделением

Возникновение смешанных цементов следует отнести к инициативе строителей, которые, не получая необходимого количества цементов, организовали помольные установки для изготовления разных по качеству смешанных цементов из клинкера цементных заводов и местных минеральных

материалов. Многолетний опыт применения смешанных цементов показывает, что их целесообразно изготавливать на районных помольных установках. Для этого необходимо не только организовать такие установки с производительностью, при которой выпуск цемента будет рентабельным, но и систематически перестраивать заводы на изготовление цементов только высоких марок.

§ 14. Глиноземистый цемент и цементы на его основе

Появление глиноземистого цемента относится к началу XX в. и родиной его считается Франция. В первую мировую войну свойство этого цемента быстро твердеть в любых условиях (водных и воздушных) позволило в течение 1 сут. возводить бетонные и железобетонные оборонительные сооружения. Глиноземистый цемент получают методом сплавления или спекания (последний способ применяют редко). Сырье после обжига должно обеспечить в глиноземистом цементе преимущественное содержание низкоосновных алюминатов кальция $CaO \cdot Al_2O_3$; $CaO \cdot 2Al_2O_3$; $5CaO \cdot 3Al_2O_3$. В глиноземистом цементе основным минералом, определяющим скорость твердения, является минерал $CaO \cdot Al_2O_3$.

Для получения глиноземистого цемента используют бокситы, содержащие значительное количество глинозема (Al_2O_3) и извест-

няк или известь. В бокситах может присутствовать ряд других соединений; например, уральские бокситы содержат окись железа до 28%, железо в виде гематита — щелочи, фосфорный ангидрид, окись хрома, серу в различных соединениях и др. Структура бокситов различна*. Все это осложняет разработку единого метода подбора состава сырья.

При производстве глиноземистого цемента компоненты назначают на основе практики использования различного сырья. Химический состав глиноземистых цементов**: 30—50% Al_2O_3 ; 35—40% CaO ; 5—15% SiO_2 ; 5—10% Fe_2O_3 ; около 1% MgO , а также могут присутствовать TiO_2 , SO_3 , R_2O . Минералогический состав включает CA , C_5A_3 , C_2S , C_2AS и др.

По ГОСТ 969—66 предусматривается испытание глиноземистого цемента на механическую прочность через 24 ч и 3 сут. Маркой считается прочность цемента в растворах 1 : 3 из смесей пластичной консистенции в призмах (40×40×160 мм). Цемент выпускают трех марок: 400, 500 и 600, предел прочности которых через 24 ч соответственно составляет: 200, 275 и 350 кГ/см^2 (10^{-1} МПа). Из этих данных видно, что через 24 ч на таких цементах можно получать высокие прочности, достигающие 60% марочной. По этой причине глиноземистый цемент назван быстротвердеющим гидравлическим вяжущим.

ГОСТ нормирует сроки схватывания, равномерность изменения объема и тонкость помола цемента. Опыт показывает, что в ряде случаев на стандартном глиноземистом цементе не удается получить быстрого твердения бетона или бетона запроектированной прочности в сроки, значительно превышающие 28 сут. Анализ работы ряда сооружений из бетона на глиноземистом цементе за рубежом показывает, что в бетоне протекают деструктивные процессы [5, 52, 58, 79, 80]. По этой причине в ГОСТ 969—66 имеется указание, что предел прочности при сжатии контрольных образцов — кубиков стандартного раствора после 28-суточного хранения (хотя он не нормируется) должен быть не меньше, чем предел прочности на марочный срок испытания (через 3 сут).

Глиноземистый цемент в отличие от других видов цемента делят на партии по 100 т (а не 500 т по ГОСТ 10178—62).

Рассмотрим некоторые вопросы, связанные с технологией получения глиноземистого цемента. В СССР разработано несколько способов получения глиноземистого цемента. В частности, из высокоглиноземистого шлака — побочного продукта доменного процесса способом доменной плавки. Для получения высокоглиноземистых шлаков (при доменной плавке специальных сортов чугуна) применяют железистый боксит, известняк, кокс, металлический скрап. Температура плавки высокоглиноземистого шлака (1700°С) значительно выше температуры обжига клинкера портландцемента.

* Бокситы — это механическая смесь коллоидных окисей алюминия, железа, кремния, титана с адсорбированной в них водой; в них присутствует алюминий в виде $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ (бемита), $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ (диаспора) и ряд других соединений.

** Сюда включено и содержание закиси железа.

В зависимости от приемов обжига глиноземистого сплава изменяется и его температура, о чем можно судить по температурам в агрегатах (от 1500—1600° С расплава металлического железа при обжиге в вагранках с водяным охлаждением до 2000° С в электропечах). Из сказанного видно, что обжиг глиноземистого сплава производится в вертикальных агрегатах с относительно невысокой производительностью по сравнению с вращающимися печами. По этой причине производство глиноземистого цемента ограничено.

Для приготовления глиноземистого цемента способом спекания требуются значительно более низкие температуры обжига (около 1200—1400° С). Однако в этом случае в высокоглиноземистом расплаве часть соединений (алюминатов кальция) получается в кристаллической модификации, а минерал геленит C_2As — в виде стекла. Установлено, что алюминаты кальция не в кристаллическом виде теряют способность быстро твердеть, в то время как закристаллизованный геленит является инертным минералом, а геленит в стекловидном состоянии — активным продуктом обжига. Процесс формирования минеральных фаз следует организовать так, чтобы каждая составляющая приобретала свойства вяжущего. Решением этой проблемы сейчас занимаются исследовательские организации.

Для оценки качества глиноземистого цемента так же, как и для любого другого, следует считать надежными и быстрыми приемы структурного анализа: петрографию и рентгеноскопию. Расчет минералогического состава по химическому, как это делается для портландцементного клинкера, производить нельзя в силу ранее изложенных положений. В первые часы процесса твердения глиноземистого цемента (с высоким экзотермическим эффектом при упрочнении) должен протекать при температуре не выше 20° С. Повышение температуры приводит к снижению прочности (до 50—60%). После первых 6 ч твердения при температуре 20° С последующее за ними повышение температуры бетона не вызывает разрушения цементного камня на глиноземистом цементе. Основной причиной такого снижения прочности считается возникновение перекристаллизации новообразований, получившихся при гидратации алюминатов и, в частности, гидроалюминатов кальция $CaO \cdot Al_2O_3 \times 10H_2O$ — потеря стабильности образовавшейся структуры.

Из гексагональных низкоосновных гидроалюминатов кальция формируются соединения, аналогичные образующимся при гидратации минерала C_3A в портландцементе, с кристаллами кубической, более устойчивой, формы — его гидратные соединения C_3AH_6 . Считается, что в разрушении цементного камня участвует и выделяющаяся из кристаллогидратов ничем не связанная вода. Тот же процесс, по-видимому, может протекать в жарком климате длительный период времени.

Однако, если известны причины разрушения цементного камня, то нет достаточных данных о причинах разрушения сооружений, возведенных десятки лет назад. Например, неизвестно, в каких температурных условиях протекал первый период гидратации цемента вслед за его затвердеванием и какие составы цемента были приме-

нены. Следует иметь в виду и другие особенности этого цемента, без учета которых его не следует применять. Например, особое значение для производства работ имеют сроки потери пластичности бетонной смеси (что, естественно, связано со сроками схватывания цементов). Известно, что регулирование сроков схватывания портландцементов достигается с помощью гипса, а глиноземистого цемента — с помощью иных добавок. Часть их не только удлиняет сроки схватывания, но и тормозит, а в определенных пределах прекращает твердение (например, 1% сахара). К доступным замедлителям схватывания относятся соляная кислота, ее соли (NaCl , KCl и др.). Ускоряют сроки схватывания портландцемент, известь, серная кислота, ее соли и др. По указанной причине глиноземистый цемент нельзя хранить в одном складе с портландцементом.

Из-за изменения прочности глиноземистых цементов при твердении после затворения в условиях температур выше 20°C нельзя применять пропаривание и электрообогрев бетонов на таких цементах. Осложняются и условия зимних работ. Действительно, при отрицательных температурах нельзя подогревать воду, так как ввиду высокой экзотермии цемента, значительно более высокой, чем портландцемент*, будет нарушено условие твердения за первые 6 ч. Бетонирование массивных конструкций на глиноземистом цементе также недопустимо по указанной причине.

Бетоны на глиноземистых цементах обладают повышенной химической стойкостью в мягкой воде, в воде, насыщенной сульфатами натрия, кальция, магния, алюминия, в морской воде, в минерализованных и болотных водах (кислых, содержащих углекислоту) и других водных средах. Бетоны на глиноземистом цементе при соблюдении правил рационального проектирования имеют высокую морозостойкость, исчисляемую тысячами циклов, высокую водонепроницаемость и низкую ползучесть.

Свойства цементов, полученных как на основе глиноземистых цементов, расширяющихся, напрягающих и др., так и на портландцементе, можно менять в нужном направлении путем введения добавок. Для строительства требуются разнообразные вяжущие, в том числе такие, которые при твердении на воздухе будут расширяться и создавать напряжение в арматуре**. Безусадочные и расширяющиеся цементы могут быть изготовлены на базе высокоалюминатных портландцементов, содержащих большое количество гипса (близкое к эквивалентному) с C_3A [64, 70] (см. табл. 1.26—1.28). Свойства гидросульфоалюминатов изучались при разработке рецептур расширяющихся и напрягающих цементов. В цементном камне требовалось создать высокоосновные гидросульфоалюмина-

* Экзотермия глиноземистого цемента за 28 сут. составляет 75—120 кал/г (315,0—504,0 кДж/кг), что близко к экзотермии портландцемента высоких марок.

** Высокоосновный гидроалюминат кальция $4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 13\text{H}_2\text{O}$ получают после совместного перемешивания смеси глиноземистого цемента и извести-пушонки, взятых в равных количествах, которую после затворения водой через 48 ч подвергают при систематическом перемешивании термической обработке в течение 5 ч при $120\text{—}150^\circ\text{C}$ (например, в гипсоварочном котле), а затем сушке.

ты, стабильные в конкретных условиях работы бетона (раствора). Процесс расширения продуктов реакции должен проходить в назначаемые сроки, а возникающие при этом напряжения гасятся конструктивными приемами (стенками деталей или частей сооружения, швы между которыми заполняются расширяющимся раствором или арматурой). Разновидностью водонепроницаемого расширяющегося цемента ВРЦ является быстросхватывающееся и быстротвердеющее вяжущее, широко используемое при зачеканке швов между элементами отделки тоннелей метрополитенов. Такой цемент состоит примерно из 70—75% глиноземистого цемента, 10—11% высокоосновного гидроалюмината кальция и 20—22% полуводного строительного гипса ($\text{CaSO}_4 \cdot 0,5\text{H}_2\text{O}$). Нормами предусмотрено: 1) при воздушном твердении цементного теста нормальной густоты через 24 ч линейное расширение — не менее 0,05%, а после 28 сут. — не менее 0,02%; 2) при водном твердении (спустя 1 ч после изготовления образец помещается в воду) через 24 ч линейное расширение — не менее 0,2 и не более 1%; за последующие 3 сут. величина дальнейшего расширения по сравнению с суточной должна составлять не больше 20%. Испытания расширяющегося цемента проводятся по особой методике, учитывающей его специфические свойства и достаточно узкую область использования. Действительно, сроки схватывания такого цемента составляют менее, чем 10 мин (начало схватывания наступает после 4 мин, следовательно, интервал периода схватывания составляет около 6 мин).

Прочность расширяющегося цемента определяют не только на образцах призмах из растворных пластичных смесей состава 1:2 размером $31,5 \times 31,5 \times 100$ мм, но и на кубиках размером $20 \times 20 \times 20$ мм, изготавливаемых из чистого цементного теста. Формы снимают с образцов через 30 мин после затворения водой. Твердение кубиков через 1 ч после изготовления протекает в воде с температурой $20 \pm 3^\circ \text{C}$. Прочностные показатели образцов даны в табл. 1.25.

Таблица 1.25

Образцы	Предел прочности, кг/см ² (10^{-1} МПа), после твердения через		
	6 ч	3 сут.	28 сут.
Кубики $20 \times 20 \times 20$ мм	75	300	500
Призмы $31,5 \times 31,5 \times 100$ мм	120	200	—

При испытании на водонепроницаемость образцы цементного камня на ВРЦ после 24 ч твердения при давлении до 6 ат (10^{-1} МПа) не должны пропускать воду.

Известны следующие виды расширяющихся цемента: гипсоглиноземистый цемент ГГРЦ из тщательно перемешанной смеси высокоглиноземистого шлака (И. В. Кравченко) не более 30% и дву-

Таблица 1.26

№ п.п.	s, см ² /г	Количество гипса в це- менте, %	Полнота смеси, мм	Предел прочности при сжатии, кг/см ² (10 ⁻¹ МПа)												Внешний вид и сроки снятия образцов с испытания	Величина относитель- ной деформации, мм/м, при твердении в воде, сут.		
				Твердение в водопроводной воде, сут															
				Твердение в 5%-ном растворе Na ₂ SO ₄ , сут															
				3	7	28	90	180	365	1	2	3	6	12	36				
1	3000	—	120	54	69	106	133	172	204	83	64	95	—	—	Разрушение че- рез 3 мес.	0,131	0,331	0,462	
2	3000	3	148	76	102	128	225	216	225	136	158	143	—	—	Разрушение к 5 мес.	—	—	—	
3	3000	10	152	24	31	55	85	128	—	61	68	88	99	99	Изменений нет	2,250	2,581	2,656	
4	3000	15	140	26	35	48	69	77	—	70	82	83	107	130	Трещины на уг- лах	2,337	6,487	22,950**	
5	>5000*	—	132	163	217	257	348	390	—	283	—	—	—	—	Разрушение че- рез 1 мес.	0,250	0,569	0,781	
6	>5000	3	137	157	220	245	326	171	273	258	252	285	282	—	Разрушение к 10 мес.	—	—	—	
7	>5000	10	121	152	204	299	358	240	—	258	288	333	344	282	Много трещин	0,131	0,434	0,494	
8	>5000	15	—	178	141	228	303	350	—	252	201	169	236	144	Изменений нет	2,975	3,356	3,544	

* Образцы приготовлены на цементе мокрого помола.

** Балочка сильно деформировалась (набухла, искривилась, ребра округлились).

Примечания: 1) цемент состава: 49% C₃S; 23% C₂S; 7% C₃A; 11% C₄AF; 2) образцы, не имевшие изменений к 36 мес., не имеют их и к 48 мес.

Таблица 1.27

№ п. п.	S, см², г	Количество гипса в це- менте, %	Полужирность цемента, мм	Предел прочности при сжатии, кг/см²(10 ⁻¹ МПа)												Внешний вид и сроки снятия образцов с испытания	Величина относитель- ной деформации, мм/м, при твердении в воде, сут.		
				Твердение в водопроводной воде, сут.						Твердение в 5%-ном растворе Na₂SO₄, сут.									
				3	7	28	98	180	365	1	2	3	6	12	36		90	730	1110
1	3000	—	110	50	101	123	184	193	—	95	106	69	—	—	—	0,000	0,050	0,000	
2	3000	3	168	88	127	182	269	236	303	164	187	176	—	—	—	—	—	—	
3	3000	10	142	67	74	124	220	217	—	109	128	127	130	154	205	0,406	0,437	0,456	
4	3000	15	144	31	47	47	74	106	123	68	92	100	110	137	—	2,450	7,125	7,106	
5	3000	20	145	37	42	62	77	90	—	90	82	97	116	132	163	—	—	—	
6	>5000*	—	127	114	193	291	306	378	—	294	348	278	—	—	—	0,000	0,050	0,081	
7	>5000	3	120	217	304	379	410	407	446	418	319	427	425	—	—	—	—	—	
8	>5000	10	115	204	240	320	397	397	—	303	303	265	232	157	—	0,119	0,062	0,175	
9	>5000	15	107	191	274	275	431	432	—	289	271	318	241	251	162	2,094	2,275	2,356	
10	>5000	20	105	143	157	235	235	240	—	143	212	128	125	113	131	—	—	—	

* Образцы приготовлены из цемента мокрого помола.
Примечания: 1) цемент состава: 51% C₃S; 22% C₂S; 11% C₄A; 11% C₄AF; 2) образцы, не имевшие изменений к 36 мес., не имеют их и к 48 мес.

Таблица 1.28

№ п. п.	S, см ² /г	Количество гипса в цементе, %	Подвижность смеси, мм	Предел прочности при сжатии, кг·см ² (10 ⁻¹ МПа)												Внешний вид и сроки снятия образцов с испытателя	Величина относительной деформации, мм/мм, при твердении в воде, сут.		
				Твердение в 5%-ном растворе Na ₂ SO ₄ , сут.															
				Твердение в водопроводной воде, сут.															
				3	7	28	90	180	365	1	2	3	6	12	36				
1	3000	—	139	35	90	150	200	262	269	175	200	180	181	225	132	0,195	0,225	0,262	
2	3000	3	182	59	89	139	195	216	249	152	251	—	189	173	—	—	—	—	
3	3000	10	135	45	55	70	120	164	247	100	128	146	144	226	—	0,331	0,431	0,450	
4	3000	15	132	48	57	82	95	120	147	90	115	125	173	182	212	0,400	0,906	1,019	
5	3000	20	—	33	42	68	95	116	—	70	93	108	136	—	148	—	—	—	
6	>5000*	—	135	Не имеет прочности	127	320	322	350	393	359	325	287	285	298	50	0,087	0,069	0,075	
7	>5000	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
8	>5000	5	131	190	243	285	285	340	—	376	396	333	296	277	166	0,094	0,306	0,306	
9	>5000	10	130	193	265	363	421	359	236	275	256	381	362	386	282	0,131	0,163	0,163	
9	>5000	15	115	186	213	296	422	422	—	315	356	293	234	342	250	0,831	0,137	1,456	

* Образцы затвердели через 13 сут., так как при созданных условиях опыта пролонгатороможение процесса твердения; образцы на цементе мокрого помола.
Примечание. Цемент состав: 58% C₃S, 19% C₂S, 5% C₃A, 16% C₄AF.

водного гипса; портландцемент РПЦ из тщательно перемешанной смеси портландцемента с небольшим количеством порошка высокоглиноземистого шлака, гипса и активной минеральной добавки для связывания извести, выделяющейся при гидролизе минерала алита в портландцементе; цемент (предложенный П. П. Будниковым) из смеси портландцемента, 15% расширяющейся добавки — прокаленного при 800°C каолина, извести или гипса; гипсосиликатный расширяющийся портландцемент, состоящий из тонкомолотого портландцемента с высоким содержанием минерала C_3A и двуводного гипса, добавляемого в эквивалентном количестве по отношению к C_3A , в этом цементе алюминат полностью связан в высокоосновный гидросульфалюминат.

В табл. 1.26—1.28 приведены примеры подбора состава гипсосиликатного расширяющегося цемента по показателю величины расширения материала. Все составы цементов с тонкостью помола более $5000\text{ см}^2/\text{г}$ приготовлены с 0,3% с. с. б.; такая тонкость помола, полученная в водной среде, создает условия для реакции C_3A с водой сразу же при затворении. Образцы размером $3\times3\times3\text{ см}$ изготовлены из пластичной растворной смеси при $\text{В/Ц}=0,50$. После 3 сут. твердения в стандартных условиях образцы были помещены в раствор Na_2SO_4 .

Таблица 1.29

Тонкость измельчения гипса	Введение гипса в виде	Предел прочности при сжатии, кг/см^2 (10^{-1} МПа)	Условия твердения гипса
Грубый помол (преобладают зерна размером 10—15 мкм)	Порошка	199	Во влажных условиях 5 сут. и в воде 2 сут.
Тонкий помол (преобладают зерна мельче 5 мкм)	Суспензии	214	
	Порошка	229	Во влажных условиях 24 ч и в воде 5 сут., распалубка через 24 ч
	Суспензии	391	

В гипсосиликатном цементе весьма показательна роль гипса, вступающего в реакцию с трехкальциевым алюминатом. Так, из малоалюминатного клинкера (расчетного минералогического состава: 60% C_3S , 13% C_2S , 3,1% C_3A , 19,4% C_4AF и 4% гипса) были приготовлены кубики состава 1 : 0 (из цементного теста) при соотношении $\text{В/Ц}=0,3$. Гипс был размолот до разной дисперсности (тонкости), чтобы доказать эффект различной скорости образования гидросульфалюмината. В табл. 1.29 приведены результаты определения прочности таких образцов.

Попытка одновременного погружения в воду кубиков после 24 ч твердения во влажных условиях показала, что образцы № 3 и 4 не теряли формы, а образцы № 1 и 2 (на более грубоизмолотом гипсе) распадались. Следовательно, о процессе твердения нельзя судить только по количеству введенного гипса. В этом опыте показано, что

один и тот же цемент даже с минимальным содержанием минерала C_3A из-за изменения дисперсности гипса меняет связность своих новообразований, которая при этом не всегда характеризуется изменением предела прочности. Как видно из изложенного, свойства цементов этого вида являются результатом организации направленного образования структуры цементного камня, в котором создается напряженное состояние вследствие образования высокоосновного гидросульфоалюмината $3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 3CaSO_4 \cdot 31H_2O$ в среде с высоким содержанием извести — в жидкой фазе, насыщенной известью; это обеспечивает их стабильность (невозможность последующего растворения в жидкой фазе) и быстрый рост кристаллических новообразований. При образовании гидросульфоалюмината кальция при низкой концентрации извести и растворении низкоосновных гидроалюминатов кальция объем образцов незначительно увеличивается, поэтому этот цемент не используют при заполнении полостей омоноличивания конструкций высокой водонепроницаемости.

Ведутся исследования в области получения расширяющихся цементов с нормированной величиной линейного расширения, позволяющей передавать напряжение от растяжения бетона на арматуру независимо от ее размещения. Следовательно, появляется возможность изготавливать некоторые сборные напряженно-армированные конструкции, не прибегая к натяжению арматуры механическими, термическим или комбинированным термомеханическим приемами. Из-за сложности определения величину напряжения арматуры не измеряют, о ней судят по величине расширения. Такой напрягающий цемент состоит из 65—75% портландцемента, 13—20% глиноземистого цемента и строительного ($CaSO_4 \cdot 0,5H_2O$) или природного гипса ($CaSO_4 \cdot 2H_2O$).

Глиноземистый цемент можно заменить алунитом — горной породой, в которой содержится основная соль сульфата алюминия и калия. Рост напряжения вызывается гидротермальной обработкой изделий (пропариванием), при этом прочность бетона после обработки изделий систематически растет. В США напрягающие цементы применяют для строительства бетонных полов зданий и в дорожном строительстве. Напряжения этих цементов должны точно рассчитываться путем применения совершенной технологии приготовления цемента с соблюдением составов указанных материалов и растворных смесей. Расход цемента значителен и достигает 800 кг/м^3 . Сроки схватывания напрягающих цементов регулируются содержанием $CaSO_4 \cdot 0,5H_2O$ (по техническим условиям начало схватывания — более 2, а конец — менее 6 мин) и $CaSO_4 \cdot 2H_2O$ (соответственно 8 и 25 мин). В частности, при изготовлении самонапряженных железобетонных труб растворная смесь наносится на металлический сердечник путем торкретирования*. В ряде случаев

* Торкретирование (дословно-уплотненная структура) — механическое набрызгивание на какую-либо поверхность (под давлением) растворной и бетонной смеси.

приготавливают смешанные глиноземистые цементы по аналогии со специальными портландцементами. Напрягающие цементы предложены и изучаются В. В. Михайловым с сотрудниками.

Смешанные глиноземистые цементы можно изготавливать с различными минеральными добавками, которые вводят для регулирования свойств. Ангидрито-глиноземистый цемент, содержащий 25—30% ангидрита CaSO_4 (предложен П. П. Будниковым), приобретает высокую прочность при твердении в любых температурах. Такой цемент имеет высокую коррозиестойчивость в минерализованных водах и позволяет получать при пропаривании более высокую прочность, чем при твердении в стандартных условиях, низкую водопотребность (нормальную густоту теста примерно при 20% воды); сроки схватывания близки к стандартным для портландцемента.

Таблица 1.30

Цемент	В/Ц	Модуль упругости раствора 1:1* при возрасте образцов, сут.		В/Ц	Модуль упругости раствора 1:1* при возрасте образцов, сут.		В/Ц	Модуль упругости раствора 1:2* при возрасте образцов, сут.	
		40	72		40	72		40	172
Глиноземистый . . .	0,38	344 000	349 000	0,46	288 500	274 500	0,46	443 000	387 000
Глиноземистый с песком . . .	0,35	352 600	306 000	0,44	289 000	260 500	0,44	294 000	—

* Изопластичная смесь, вызывающая различие в В/Ц смеси.

Для повышения качества глиноземистого цемента, чтобы исключить образования при обжиге клинкера инертного минерала геленита C_2AS , в сырьевую массу вводят гипс, что проще, чем использование только бокситов с пониженным содержанием кремнезема, который связывает часть глинозема. В таком цементе образуется гидравлически активное соединение $3(\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3) \cdot \text{CaSO}_4$. Если в сырьевой смеси соотношение окислов Al_2O_3 и SiO_2 меньше трех (когда применяется некондиционный боксит), такой цемент, названный белито-глиноземистым, содержит повышенное количество белита и быстро упрочняется. К цементу по разным причинам приходится добавлять порошки из обычных шлаков и другие инертные минеральные порошки, тогда он становится менее прочным и меньше выделяет тепла.

Как портландцемент с минеральными добавками, так и глиноземистый цемент с добавками является смешанным. Как видно из табл. 1.30, показатель модуля упругости изменяется в зависимости от В/Ц, составов раствора и цемента при одной и той же исходной прочности. И в этом случае нельзя считать, что между прочностью и модулем упругости материала для раствора (бетона) всех составов существует прямая зависимость (показатель прочности глиноземистого цемента состава 1 : 3 через 3 сут. равен 490, через 7 сут. — 501 и 28 сут. — 500 кг/см^2 (10^{-1} МПа), а для глиноземистого с песком все цифры соответственно количеству введенной минераль-

ной добавки будут меньше). Рост В/Ц с 0,38 и 0,36 до 0,46 и 0,44 у любого цемента сказывается на показателе механической прочности (ее уменьшении), как и на значении модуля упругости. Материал стал более пористым из-за увеличения в цементном камне количества свободно испаряющейся воды и как бы более упругим. Как видно из табл. 1.30, в жирных составах раствора с соотношением цемента к песку 1 : 1 модули упругости образцов при близких значениях В/Ц (0,38 и 0,36; 0,46 и 0,44) в пределах точности опыта можно считать весьма близкими. Следовательно, состав цемента не выявляется из-за большого количества цемента в образцах на обоих видах цемента, обеспечивающего для каждого из них заполнение всех пустот в уплотненном песке. Уменьшение количества цемента до 1 : 2 сразу сказывается на изменении показателя модуля упругости. Увеличение содержания песка в образцах на глиноземистом цементе делает их менее деформативными, более жесткими, изменяя модуль.

§ 15. Тампонажные цементы

Одним из особых видов цемента, необходимых при производстве строительных работ, являются тампонажные цементы, имеющие разнообразные составы и свойства. Массовое использование тампонажных цемента связано с производством буровых работ, требующих цементации разбуриваемых пород.

Широкий объем бурения связан с выявлением залегания нефти, газа, других полезных ископаемых, определения водоносных горизонтов, пород, залегающих на разных глубинах. Особенности пробуривания толщ грунтов и горных пород (их глубина, сложение, наличие водоносных горизонтов, состав воды в них, температура в скважинах) вызывают необходимость изготовления цемента с различными свойствами. Так, при проходе скважин в трещиноватых породах применяют цемент с наполнителем — волокнистым асбестом, сокращающим расход цемента. Без такого наполнителя большое количество цемента уходит в породу по ее трещинам. Этот цемент назван волокнистым, в нем содержится около 3% асбестового волокна, добавляемого к цементу в мельницу в процессе помола.

К тампонажным цементам предъявляют следующие требования: стойкость цемента в конкретных условиях работы в скважинах; быстрое нарастание прочности до заданных величин и создание высокой герметичности скважин.

Для приготовления тампонажных растворов с минимальным количеством воды (примерно 40—45% воды) должна обеспечиваться стабильность цементного теста, его транспортабельность и устойчивая работа перекачивающих устройств; цементное тесто должно сохранять заданную текучесть на весь период работ, связанных с его приготовлением и перемещением к месту последующего твердения.

Так, для тампонирования «холодных» скважин, в которых температура ниже 40° С, применяют портландцемент с высоким содержанием минерала C_3A и гипса; тонкомолотый портландцемент с

высоким содержанием минерала C_3S и гипса. Эти цементы обеспечивают нужную скорость схватывания раствора и быстрый рост прочности. Наличие в них повышенного количества гипса обеспечивает заданную пластичность раствора.

Для тампонирования «горячих» скважин, в которых температура выше $40^\circ C$, но не превышает $75^\circ C$, применяют портландцемент с замедленным схватыванием, что обеспечивает стабильность заданной пластичности растворов на период производства работ. Цементы, отвечающие указанным условиям, содержат минимальное количество минерала C_3A (или совсем его не содержат), повышенное C_2S и C_4AF и относительно немного минерала C_3S .

Если температура в скважинах выше $75^\circ C$, для замедления сроков загустевания растворов необходимо применять цементы с иной минералогической характеристикой. Для указанных условий были предложены вяжущие, представляющие смесь тонкоразмоловых доменных шлаков с песком и высушенным нефелиновым * шлаком и шлаком (или песком). Эти вяжущие названы цементами для сверхглубоких скважин.

При производстве тампонажных работ в нефтяных скважинах, выделяющих значительное количество газа, необходимо повысить плотность цемента, для этого в него вводят минеральные порошки с большей плотностью (до 40—60% гематита или барита). Эти цементы названы утяжеленными. Повышение плотности цемента связано с необходимостью ввести в скважины глинистый раствор повышенной плотности (2200—2300 кг/м³) — промыть скважины. Следовательно, для последующего введения в скважину цементного раствора важно не допустить смешения растворов (проникания глинистого раствора в цементный), чтобы не снизить расчетную прочность цементного камня.

Один из таких утяжеленных цемента разработан в Гипроцементе (К. Н. Зильберманом), в минерале C_2S которого содержится в виде твердого раствора силикат бария $2BaO \cdot SiO_2$.

Повышение водостойкости такого цемента достигается введением в его состав гипса. Такой цемент назван гипсобариевым. Для тампонажных работ иногда применяют жаростойкие цементы, которые приготавливают на основе глиноземистых цемента с огнеупорными наполнителями заданной granulometрии (например, магнезитом, шамотом). Такие цементы необходимы для тампонирования скважин, устраиваемых при подземной газификации углей (идея которой выдвинута в 1888 г. Д. И. Менделеевым).

Тампонажные портландцементы (ГОСТ 1581—63) предназначены к использованию в холодных и горячих скважинах. В первом случае цемент испытывают после 2 сут. твердения при температуре $22 \pm 3^\circ C$, а во втором — при $75 \pm 3^\circ C$. Начало схватывания цемента для холодных скважин при указанной температуре и $V/C=0,5$ дол-

* Нефелиновый шлак — отход при производстве глинозема Al_2O_3 занимает промежуточное положение между портландцементом и основным доменным шлаком. Ввиду высокого содержания минерала C_2S может быть назван беликовым шлаком.

жно наступать не ранее чем через 2 ч, для горячих скважин — не ранее чем через 1 ч 45 мин. У образцов-балочек размером 40×40×160 мм из цементного теста с распылом конуса не меньше 180 мм предел прочности через 2 сут. твердения в холодных скважинах должен быть не менее 27, в горячих — не менее 62 кГ/см² (10⁻¹ МПа).

В ГОСТе на тампонажный портландцемент указано, что он является разновидностью портландцемента. Поэтому кроме требований, типичных для портландцементов, в ГОСТе приведены специфические требования, например, к количеству ангидрида серной кислоты, окиси магния и др. Для холодных скважин допускается не более 15% активных минеральных добавок, для горячих содержание добавок в цементе зависит от их природы. Эти добавки должны быть только осадочного происхождения; их можно заменить гранулированным доменным шлаком в количестве, не превышающем 15%. Инертные добавки в обоих видах цемента не должны превышать 10%; для холодных скважин рекомендуется применять кварцевый песок и кристаллический известняк, для горячих — только кварцевый песок.

§ 16. Белые и цветные цементы

Цветные цементы — разновидность портландцемента. Широкое применение различных по цвету цементов в сборном железобетоне, например в домостроении, обеспечивает долговечность окраски конструктивных элементов зданий при богатом разнообразии цвета и чистоте их тона. В ряде случаев этот цемент находит применение в отделочных работах, в частности для приготовления растворов.

Массовый выпуск цветных цементов в большей мере, чем изготовление портландцементов и глиноземистых цементов, зависит от качества сырьевых материалов. Для широкого использования этого вида цемента в отделочных работах решающее значение имеет размещение цементных заводов.

Т а б л и ц а 1.31

Наименование цемента	Химический состав, %					
	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	MnO
Белый	64,5—69,77	22,8—26,68	4,1—7,53	0,22—0,89	0,26—2,0	0—0,02

Наименование цемента	П. п. п., %	KH, %	Минералогический состав, %			
			C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF
Белый	0,24—3,75	0,82—0,88*	33—50	35—50	14—17	0,9—1,4

* Силикатный модуль белых цементов — 3,2—4,8, а глиноземистый — 10—25. Температура обжига клинкера белого портландцемента выше, чем обычного, так как в нем меньше плавней. Обжиг производится на беззольном топливе — газе (или мазуте) с применением фторсодержащих минерализаторов, вводимых в сырьевую смесь.

Рассмотрим особенности состава цемента и общие условия его приготовления, усложняющие производство. Проанализируем химический и минералогический составы сырья (табл. I.31), используемого для приготовления белого цемента, на основе которого осуществляется производство цветных цементов.

Белый цемент (см. § 3 и 4) отличается от обычного портландцемента меньшим (примерно в 6 раз) содержанием окислов железа (см. табл. I.31). По этой причине в белом и других цветных цементах наиболее высок процент трехкальциевого алюмината и меньше всего алюмоферрита. Портландцемент имеет темно-серый цвет вследствие высокого наличия окрашивающих окислов, к которым надо отнести и окись железа. Чем меньше в цементах окисей железа и марганца, тем белее цемент. На белизну и окраску цемента [58], кроме окисей железа и марганца, влияет даже незначительное количество хрома (даже тысячные доли процента), валентность окисей железа и марганца в клинкере, условия помола (металлические мелющие тела). В частности, для того чтобы избежать загрязнения сырьевой смеси железом и окислами железа, применяют мелющие тела из уралита (высокоглиноземистого материала) или фарфора, а мельницу футеруют фарфоровыми и кремниевыми плитами или особо трудно истираемой сталью.

Белизна белого цемента сравнивается с эталоном белизны — серноокислым барием. Степень белизны цемента характеризуется по специальной шкале ГОСТ 965—66. При меньшем содержании Fe_2O_3 и MnO (см. табл. I.31) белизна цемента может достигать 80% эталонной белизны. Белый цемент — основа для получения цементов различной цветовой гаммы. Белый цемент — тонко измельченный активный минеральный порошок, в который при помоле клинкера вводят гипс для регулирования сроков схватывания, а также гидравлическую добавку — диатомит (белого цвета) в количестве 5—10% от массы клинкера для повышения устойчивости против появления известковых выцветов. Коэффициент яркости белого цемента, как правило, составляет 78—85%.

При производстве белого портландцемента необходимо отбеливание клинкера — снижение красящей способности окислов железа, чего достигают:

1) воздействием в течение нескольких минут на клинкер восстановительной среды (генераторного газа в аппарате-отбеливателе при 800°C и последующем охлаждении до 200°C) — без доступа кислорода; в этом случае окись железа переходит в магнитную закись-окись; 2) резким снижением растворимости окислов железа белитом при быстром охлаждении, образованием алюмоферрита кальция C_6AF_2 , а не $\text{C}_6\text{A}_2\text{F}$, что обеспечивает в белом клинкере портландцемента более концентрированное распределение окиси железа (на меньшем числе частиц алюмоферрита). Резкое снижение температуры клинкера с 1250—1350 до 500—600 $^\circ\text{C}$ получают при охлаждении его водой с таким расчетом, чтобы клинкер, извлеченный из воды, за счет оставшегося в нем тепла мог высохнуть до помола.

В зависимости от вида нормируется количество белой добавки, вводимой в мельницу при помоле клинкера. Так, белого диатомита, соответствующего требованиям ГОСТ 6269—63, разрешается вводить не более 6%, белой инертной минеральной добавки — не более 10% от массы цемента. По договоренности потребителя с поставщиком при помоле клинкера допускается введение в цемент ПАВ, пластифицирующих и гидрофобизирующих цементы. Цемент выпускается трех марок по прочности на сжатие: 300, 400 и 500, с соответствующими показателями прочности на изгиб: 45, 55 и 65.

Изготовление и испытание образцов раствора состава 1 : 3 осуществляется в полном соответствии с ГОСТ 310—60. При испытании особое внимание обращают на белизну цемента, с учетом которой его маркируют на три сорта: высший, БЦ-I, БЦ-II, с соответствующими коэффициентами яркости (в процентах от яркости BaSO_4): 80, 76 и 72.

Для получения цветных цементов используют белый цемент и красящие вещества: синтетические минеральные и органические пигменты, природные минеральные пигменты и красковые руды. Цветные портландцементы производят и на основе цветных клинкеров. Рассмотрим в общем виде вопросы, связанные с получением цветных цементов на указанных основах.

Цветной цемент производят на основе белого клинкера и красящих веществ. Качество белого цемента и красящих веществ влияет: на устойчивость цветового колера при эксплуатации бетонов (растворов), выполненных на основе цветных цементов, на их физико-механические свойства (усадку, морозостойкость, водопоглощение, ползучесть, выцветоустойчивость). Например, большое содержание в цементах диатомита (около 10—15%) повышает усадку цемента, так как увеличивает водопотребность бетонных (растворных) смесей (аналогично пуццолановым и пуццоланизированным* портландцементам); увеличивает усадку по указанной причине и глинистая порода красковой руды. Появление на поверхности изделия или конструкции усадочных трещин не только портит внешний вид, но и во многих случаях снижает их надежность.

Красящие вещества могут также значительно снизить морозостойкость цветных цементов. Такие красящие вещества, как ультрамарин и окис хрома, достаточно светостойкие при эксплуатации бетонов (растворов), изготовленных в естественных условиях твердения, не сохраняют свою окраску при пропаривании.

Весьма важное свойство цементного камня — выцветоустойчивость достигается ранее указанными мерами, из которых особый эффект дает гидрофобизация цемента. В этом случае не происходит миграция водных растворов по капиллярам цементного камня. Отвод воды от частей здания или сооружения (например, с проезжей части мостов, от бордюрных камней, плит балконов) обеспечивают конструктивными приемами.

* Пуццоланизированными названы цементы, содержащие гидравлические добавки в меньших количествах, чем в пуццолановых портландцементях.

Минеральные пигменты (синтетические и природные) получают путем тонкого измельчения красковых руд. Пигменты не растворяются в воде, масле и разных растворителях. Поэтому их необходимо тонко измельчать и тщательно размешивать в массе зерен белого портландцемента. Порошки из красковых руд в воде, масле и других жидкостях образуют тонкозернистые суспензии, которые применяют для производства красок.

Для приготовления цветных цементах используют руды: охру железокислую, охру глинистую классов А и Б, охру карбонатную, сурик, бурый железняк, мумию, марганцовую руду и другие из разных месторождений. В железных рудах преобладает Fe_2O_3 (до 78,33%), в марганцевых — MnO (до 70,15%). Добычу кусковых руд целесообразно производить селективными методами, что не всегда осуществимо из-за особенностей их залегания. Перечисленные руды, вводимые в помол совместно с клинкером в количестве 0,5—15%, обеспечивают желто-красную, коричневую и черную гаммы цветных цементах*. Так, $\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ обеспечивает получение желтого цвета, Fe_2O_3 — красного, $\text{FeO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$ — черного.

Для создания цементах голубого, зеленого и терракотового цветов требуются синтетические и органические пигменты, которые пока дефицитны. Технология получения синтетических пигментов достаточно сложна, но суть ее состоит в осаждении гидрата окиси железа из раствора железного купороса $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ и прокаливании осадка при температуре от 200 до 900°С. При этом в процессе осаждения вводят добавки (например, поваренную соль) для достижения нужных оттенков.

Органические пигменты добывают из многочисленных органических соединений. Их вводят в цемент в незначительном количестве (0,1—0,3%) для получения чистых и ярких цветов. Однако значительное число органических пигментов уступает минеральным пигментам по светостойкости (отмечается резкое ухудшение цвета при действии ультрафиолетовых лучей в течение 15 ч). Светостойкими и стойкими против действия кислот, щелочей и атмосферных воздействий кислот является зеленый и голубой фталоцианиновые пигменты.

В настоящее время наиболее дешевыми и доступными для массового применения при изготовлении цветных цементах считаются красковые руды, перемалываемые совместно с белым клинкером. Красковые руды должны пройти процесс обогащения (разборки руды и отделения зерен кварца и других примесей) и поступать на цементные заводы в виде сухого порошка.

§ 17. ГОСТы и СНИПы на вяжущие материалы

Большое различие в строительно-технических свойствах вяжущих потребовало выпуска отдельных ГОСТов. Для полноценного

* Часть руд при разных температурах сушки имеет особенность резко изменять цвет. Например, при пропаривании окись хрома и ультрамарин изменяют цвет изделия, при 300—400°С изменяется цвет бурого железняка до вишнево-красного, а желтой охры — до розового и красного.

использования свойств вяжущих на строительстве недостаточно сведений, содержащихся в ГОСТах, что вызывает проведение дополнительных исследований в строительных и научно-исследовательских организациях, результаты которых должны быть постепенно сведены в каталоги свойств вяжущих.

Рассмотрим историю развития стандартов на гидравлические вяжущие материалы. В статье, опубликованной в 1807 г. В. М. Севериным в «Технологическом журнале», были описаны свойства вяжущего, полученного в результате обжига мергелей и обладающего водостойкостью. Спустя примерно 50 лет после открытия цемента вся мировая промышленность стала выпускать около 2 млн. т цемента. На территории бывшей Российской империи в 1856 г. был пущен первый цементный завод, в 1866 г. — два, а к 1887 г. — девять. В отсталой России цементная промышленность развивалась крайне медленно, постоянно встречая конкуренцию со стороны английских и германских цементных заводов, которые начали работать значительно ранее русских. Сложная технология производства цемента нуждалась в огнеупорах и оборудовании, поставляемых из-за рубежа.

Еще в 1819 г. в Петербургском институте инженеров путей сообщения (ныне ЛИИЖТ им. В. Н. Образцова) систематически изучались свойства гидравлических вяжущих. В организации исследований русского цемента и смелого внедрения его в строительство выдающуюся роль сыграли русские ученые А. Р. Шуляченко и Н. А. Белелюбский, которые в течение многих лет являлись руководителями регулярно созываемых съездов представителей русской цементной промышленности. С 1885 по 1912 г. состоялось 14 таких съездов. Ведомство путей сообщения явилось той организацией, которая первой начала широко применять русский цемент, что совпало с началом больших для того времени работ по строительству железных дорог и портов.

В 1881 г. в России были выпущены первые технические условия на поставку цемента ведомству путей сообщения. Эти нормы разработаны А. Р. Шуляченко и И. Г. Малюгой. А. Р. Шуляченко заложил научные основы испытания цемента, которые продолжают систематически развиваться. Уже в 1892 г. на основе работ Н. А. Белелюбского, который провел серию сравнительных испытаний, можно было утверждать, что русские цементы по качеству не уступали зарубежным. Ход дальнейшей разработки технических условий приведен в табл. I.17.

Однако было бы неправильным не обратить внимание на ряд существенных недостатков, которые до сих пор не устранены из ГОСТов на цемент. К ним относятся:

1. Невозможность определения не только двух, трех сроков упрочнения образцов, а всей кинетики твердения цемента, начиная с конца схватывания и кончая любыми сроками, имеющими практическую значимость, возможность определения прочности расчетным путем, без механического испытания образцов, используя лишь физико-химические и минералогические характеристики цемента.

Страна	Портландцемент	Вид растворной смеси	Предел прочности, кг/см ² (10 ⁻¹ МПа)													
			при сжатии			при изгибе							при растяжении			
			Продолжительность твердения, сут.													
			1	3	7	28	1	3	7	23	1	3	7	28		
Болгария	Обыкновенный Быстротвердеющий	Жесткий	—	—	200	300	—	—	—	—	—	—	18	25		
			—	250	—	450	—	—	—	—	—	25	30			
Венгрия	Обыкновенный Быстротвердеющий	»	—	—	200	280	—	—	—	—	—	—	15	22		
			250*	—	400	500	—	—	—	—	20*	—	27	30		
ГДР	Низкопрочный Обыкновенный Высокопрочный	Пластичный	—	—	110	225	—	—	—	—	—	—	—	—		
			—	150	225	325	—	30	25	40	—	—	—	—		
			100	300	360	425	25	50	60	60	70	—	—	—		
Польша	Обыкновенный Высокопрочный	»	—	—	130	250	—	—	—	—	—	—	—			
			—	180	280	400	—	35	30	45	50	65	—	—		
ЧССР	Обыкновенный Быстротвердеющий	Жесткий	—	—	200	275	—	—	—	—	—	—	18	25		
			—	275	375	425	—	—	—	—	—	25	18	30		
Англия	Обыкновенный Быстротвердеющий	Пластичный	—	112	176	—	—	—	—	—	—	21	26	—		
			112	246	—	—	—	—	—	—	21	32	—	—		
Италия	Обыкновенный Быстротвердеющий	Жесткий	—	—	380	500	—	—	—	—	—	—	26	32		
			—	290	500	680	—	—	—	—	—	21	31	37		

США	Обыкновенный Быстроотвердеющий Низкотермичный Умеренносульфато- стойкий Сульфатостойкий	Пластичный	— 88	63 176	127 — 56 105 105	210 — 141 210 210	— — — — —	— — — — —	— — — — —	— 19	10 26 — 9 9	20 — 12 18 18	25 — 21 23 23
Финляндия	Обыкновенный Быстроотвердеющий Низкотермичный	»	— 100	150 300	225* 375 125	350 450 250	30 50 —	40 60 30	60 70 50	— — —	— — —	— — —	— — —
Франция	Обыкновенный Быстроотвердеющий Высокопрочный Сверхпрочный	»	— 160*	— — — —	160 315 215 355	250 400 340 500	— — — —	— — — —	— — — —	— 18*	— — — —	20 25 20 30	25 30 25 35
Швейцария	Обыкновенный Высокопрочный	»	— —	— 370	300 490	400 590	— 55	50 65	65 75	— —	— —	— —	— —
Швеция	Обыкновенный Быстроотвердеющий Низкотермичный	»	— 150	— 325	250 400 150	400 500 275	— 60 —	45 65 30	65 70 50	— — —	— — —	— — —	— — —

* Через 2 сут.

Таблица 1.33

Страна	Образцы для испытания	Содержание воды, %		Метод формирования		Оборудование
		восьмерки и балочки	кубики	восьмерки и балочки	кубики	
Болгария	Восьмерки и кубики	8	8	Трамбование 150 ударов	Трамбование 150 ударов	На копре Беме
Венгрия	То же	$V/C=0,3$	$V/C=0,3$	Трамбование 120 ударов	То же	На копре Клебе грузом 2 и 3,2 кг с высоты 25 и 50 см
ГДР	Балочки	15	—	Ручной	—	—
Польша	»	15	—	»	—	—
ЧССР	Восьмерки и кубики	По выступанию воды при трамбовании на копре Беме после 90—100 ударов		Трамбование 150 ударов	Трамбование 150 ударов	На копре Беме
Англия	То же	$0,195H+2,5$	10	Ручной	Вибрирование	Виброплощадка
Италия	»	По пробе Вика	По пробе Вика	Трамбование 120 ударов	Трамбование 150 ударов	На копре Клебе грузом 2 и 3 кг с высоты 25 и 50 см
США	»	$\frac{H}{4} + 6,5$	По растеканию раствора состава 1 : 2,75	Ручной в два слоя	Ручной в два слоя	Ребро кубика 5,08 см
Финляндия	Балочки	14	—	Ручной	Ручной	—
Франция	Восьмерки и кубики	11—12	11—12	Ручной без ударов	Ручной без ударов	—
Швейцария	Балочки	11	—	Ручной	—	—
Швеция	»	14	—	»	—	—

Примечание. Виды портландцемента и раствора смеси указаны в табл. 1.32.

2. Отсутствие в ГОСТах необходимых для строительного производства всех конструктивно-технических характеристик. В этом отношении ГОСТ на сульфатостойкий портландцемент имеет большие преимущества по сравнению с ГОСТами на другие цементы. Сведения о марке недостаточны для выбора цемента. Следует расширить сведения о цементах, указав области и условия их применения.

3. Отсутствие указаний о необходимости использования разных методик испытания цементов. Это нужно для выбора цементов с наиболее высокими свойствами из серии цементов (например, для выбора цементов, которые должны твердеть при обычных положительных температурах внешней среды, когда такие условия для всех испытываемых цементов являются оптимальными). Однако на базе того же портландцемента можно изготовить другие цементы, например пуццолановые, шлакопортландцементы, для которых оптимальными являются условия твердения при повышенных температурах. Поэтому испытание по единой методике показывает только одну сторону вопроса, а именно, что за один и тот же срок цементы имеют меньшую прочность, но остается открытой вторая сторона, имеющая не только научный, но и прямой производственный интерес.

Испытание при повышенных температурах покажет полное преимущество пуццолановых и шлакопортландцементов по сравнению с исходными портландцементами, следовательно, вскроет несостоятельность широко практикующихся приемов изготовления сборного железобетона преимущественно на портландцементях. Кроме существующей имеются и другие методики испытания, которые должны выявить качество цемента, а расчетные приемы позволят осуществить выбор цемента с наилучшими технико-экономическими показателями.

Какое же различие в процессе выполнения бетонных работ может резко повлиять на твердение цемента, выявив его специфические физико-химические особенности? Это — условия, в которых происходит твердение. Следовательно, зная, что твердение цементов с гидравлическими добавками, шлаковым компонентом протекает отлично от твердения портландцементов, необходимо их испытывать по другой методике, выявляющей именно эту принципиальную особенность — особенность формирования структуры цементного камня при разных температурах. По этой причине, несмотря на кажущееся различие в методах испытания цемента в разных странах, существо их остается одинаковым.

В табл. I.32 и I.33 приведены сведения о методах испытания цемента в разных странах и показатели прочности. Различие в методах испытания сказывается и на их результатах. Один и тот же цемент, испытанный по разным методикам, покажет разную прочность (большую или меньшую) в зависимости от количества воды, которое применяется для затворения, качества стандартного песка, способа перемешивания и уплотнения смеси, размера образцов. По этой причине нельзя сравнивать между собой качество цементов,

испытанных по разным методикам, не внеся в них соответствующие коррективы.

Из таблиц видно, что цемент можно замешивать с песком в смесях двух видов: жесткой и пластичной, которые содержат различное количество воды. Так, в СССР цементы ранее испытывали в жестких смесях с малым количеством воды. Последние годы их испытывают в пластичных смесях по ГОСТ 310—60. Такое испытание дает более близкие показатели, приготовление смесей и формирование образцов проходит проще и быстрее, можно изготавливать балочки, а не кубики, что позволяет получать показатели по двум видам разрушения — изгибу и сжатию.

Естественно, от вида смеси зависит и прием ее уплотнения: жесткие смеси формируются путем трамбования, пластичные — вибрированием и ручным штыкованием. Для перемешивания и уплотнения смесей существует набор оборудования, которое в разной степени отличается одно от другого, что сказывается и на результатах испытания. По этой причине в каждой стране в стандартах дается точное название приборов, приемов изготовления смесей и образцов из них, сроков испытания и точного режима твердения цемента.

Определение показателей прочности цемента на растяжение, весьма интересное для анализа свойств цемента, сложно проводить прямыми испытаниями образцов восьмерок. Сложность испытания заключается в необходимости применять особо точные приборы для разрыва. Применение рычажных приборов Михаэлиса массового изготовления приводило к резкому отклонению показателей прочности от истинных величин. По этой причине испытание прочности в балочках, когда определяется косвенный показатель сопротивления растяжению при изгибе, следует считать более удачным.

Для стандартов почти всех стран остается общим обязательное определение химического состава цемента, в том числе: окиси магния MgO , щелочей K_2O и Na_2O ; п. п. п., нерастворимого остатка SO_3 ; определение минералогического состава цемента, а также тонкости помола, равномерности изменения объема, сроков схватывания. Без этих нормируемых стандартом характеристик цемент в строительстве не может быть использован. Указанные показатели цемента следует отнести к категории тех, которые позволяют браковать цемент, применение которого приводит к разрушению бетона вследствие возникновения процессов деструкции в твердеющем цементном камне. Разрушение может произойти в различный срок после возведения сооружения.

Так, при наличии в цементе избыточного количества MgO (в виде минерала периклаза) разрушение может произойти через длительный период, так как MgO (указанной структуры) вступает в реакцию с водой в обычных условиях исключительно медленно; природа разрушения бетона из-за неравномерности изменения объема формирующегося цементного камня иная, и разрушение происходит в короткие сроки, вслед за окончанием бетонных работ.

Сказанное ранее о разрушении бетона из-за неверного выбора цемента, в конечном счете, связано с возникновением процессов, вызывающих деструкцию от наличия во внешней среде агрессивных агентов (см. § 61—64). В рассматриваемом случае возникают процессы, приводящие к деструкции формирующегося цементного камня из-за того, что в нем имеются химические соединения, побочная реакция которых с водой не должна протекать в условиях, типичных для получения цементного камня с высокими техническими свойствами. Из факторов, вызывающих деструкцию, при наличии указанных реакций, которые можно именовать побочными для основных соединений цемента, являются физические факторы. Новые гидратированные соединения, например, MgO , занимают больший объем, чем исходные компоненты, следовательно, в структуре цементного камня возникают напряжения, превышающие допустимый предел для материала, в котором формируются эти новообразования. Наличие недопустимых в цементе веществ обязательно вызовет их реакцию с водой и последующее разрушение бетона.

Строительные нормы и правила на неорганические вяжущие и добавки для бетона и растворов (СНиП I-B.2—62) — основной нормативный документ для их выбора и применения. В нем даны основные определения и стандартные показатели качества. В СНиПе изложены особенности условий твердения указанных вяжущих, деление вяжущих на марки по прочности при сжатии, номенклатура добавок к вяжущим, растворам и бетонам. Однако в нем, как правило, не дается детальных пояснений к каждому пункту, который обязан быть в точности выполнен в полном соответствии с содержащимися в нем указаниями. Например, в п. 2.4 сказано, что «...гидрофобный портландцемент не комкуется и практически не теряет прочности при длительных перевозках и хранении». Или в п. 2.14 сказано: «шлакопортландцемент — гидравлическое вяжущее, твердеющее в воде и на воздухе, получаемое путем совместного измельчения клинкера, необходимого количества гипса и доменного гранулированного шлака или путем тщательного смешивания тех же материалов, измельченных отдельно. Весовое содержание шлака в шлакопортландцементе должно находиться в пределах 30—70%...». Указанная редакция весьма лаконична, так как предполагается, что СНиПом пользуется специалист.

Действительно, широко известно, что тепловлажностные условия являются оптимальными для твердения шлакопортландцемента с высоким содержанием шлака (пропаривание при $100^{\circ}C$ и 100% относительной влажности воздуха). Для шлакопортландцементов с относительно невысоким содержанием молотого шлака — 30—40% оптимальными следует считать условия твердения в воде, во влажном грунте или на воздухе при обеспечении его высокой влажности (тех же 100% относительной влажности воздуха). Следовательно: а) отсутствие в СНиПе более подробных сведений о шлакопортландцементе не должно приводить к ухудшению качества бетона на шлакопортландцементе; б) применение шлакопортландцемента с поверхностно-активными гидрофильными и гидрофобизирующи-

ми веществами или с их комплексом особенно резко улучшает свойства пропариваемых бетонов; о таких цементах не упоминается в СНиПе по той причине, что в настоящее время их не изготавливает цементная промышленность.

Эти примеры показывают на необходимость творческого использования технических документов, которое проверяется итогами принятых решений.

В СНиПе, как правило, не приводится обоснование технических требований. Например, в п. 2.20 сказано, что... «при повышении во время твердения температуры бетона на глиноземистом цементе выше 25—30° С из-за тепловыделения или нагрева по различным причинам, либо при его твердении в теплом и влажном климате возможно снижение его прочности до 50%...»*.

В п. 3.3 сказано, что «растворы и бетоны на гидравлической извести после затвердения на воздухе продолжают твердеть и сохранять свою прочность также и под водой». Что следует иметь в виду для иных случаев применения гидравлической извести? Для работы бетонов (растворов), приготовленных на этом вяжущем, нельзя допускать поочередного воздействия воды и мороза.

В СНиПах, как правило, развивается наиболее существенная часть основных технических положений соответствующих им ГОСТов. Так, в п. 2.17, повторяющем основные положения о составе пуццоланового портландцемента — гидравлического вяжущего, твердеющего в воде и во влажных условиях**, сказано: что «...бетоны, изготовленные из пуццоланового портландцемента, отличаются повышенной водостойкостью и водонепроницаемостью... Морозостойкость и воздухостойкость бетонов на пуццолановом портландцементе ниже, чем бетонов на портландцементе...». В СНиПе вопрос о свойствах таких бетонов не ограничен приведенными здесь особенностями. Следовательно, ознакомившись с условиями назначения пуццолановых или любых других цементах, можно избежать ошибок в их использовании.

В п. 2.26 изложено основное техническое требование, предъявляемое к цементам. В нем сказано: «Цементы должны удовлетворять техническим требованиям в части расчетного химико-минералогического состава, физико-механических показателей и специальных требований, предусмотренных действующими стандартными и техническими условиями на производство, испытания и приемку цементах. Контроль качества цементах производится в соответствии с требованиями ГОСТов и ТУ». Это очень важное положение, базирующееся на многолетних фундаментальных работах и обширной практике строительства, к сожалению, не нашло должного отраже-

* Опыт показывает, что твердение бетона на глиноземистом цементе первые 6 ч должно проходить при температуре не выше 20° С. В зависимости от нарушения этого условия будет происходить большая или меньшая деструкция цементного камня на глиноземистом цементе, связанная с образованием соединения $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, а не $2\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$.

** Как видно из описания условий твердения пуццоланового портландцемента, его нельзя применять для конструкций (сооружений), находящихся на воздухе.

ния для большей части видов и марок цемента в ГОСТах на цементы.

По этой причине при производстве работ, в которых бетон сооружений проектируется по комплексной марке, необходимо в соответствующих случаях выяснять, имеет ли цемент перечисленные показатели технических требований. Это осуществляется путем запроса сведений о цементе у лабораторий заводов-поставщиков, а также у научных организаций, работающих в области исследований цемента.

В п. 2.29 сказано, что «при надлежащем технико-экономическом обосновании допускается домол цементов в целях повышения их активности и уменьшения расхода». Смысл этого технического мероприятия весьма широк, он базируется на исследованиях и практике работ. Действительно, иногда цемент после поступления на строительство по ряду причин не используется в течение определенного периода и теряет свою активность. В другом случае полученный цемент недостаточно активен для конкретного случая его использования. Может также поступить цемент со сроками схватывания, которые не удовлетворяют требованиям производства работ, но в то же время находятся в полном соответствии с требованиями ГОСТа. В этом случае домол цемента с введением дополнительного количества гипса (в пределах требований стандарта до 3,5% в расчете на SO_3) позволит удлинить сроки схватывания.

Следовательно, указания СНиПа нацеливают специалиста на правильное решение многообразных производственных задач в полном соответствии с требованиями ГОСТов и основными научными положениями из области химии силикатов, технологии бетонов, организации производства и ряда других наук, обеспечивающих производство строительных работ на высоком техническом уровне.

ВОДА ДЛЯ ЗАТВОРЕНИЯ БЕТОННОЙ (РАСТВОРНОЙ)
СМЕСИ И ВОДА-СРЕДА

§ 18. Вода для затворения смеси

Качество воды зависит от степени ее минерализации (содержания растворенных в ней минералов горных пород и газов), содержания соединений из отходов промышленного производства и продуктов жизнедеятельности органического мира. Для строителя важно знать возможность использования воды различной минерализации, с содержанием органических веществ, механических примесей. Между качеством воды для затворения бетонной (растворной) смеси и качеством воды-среды, в которой будет находиться поверхность бетонных (железобетонных) сооружений, большая разница. Общие положения о том, что вода для затворения должна быть по возможности чистой, требуют рассмотрения.

В природе совершается непрерывный круговорот воды, поэтому естественно и систематическое изменение ее химического состава. В зависимости от условий, в которых протекает вода — растворитель окружающих ее внешних сред (почв-грунтов, пластов внутри земли, карстовых массивов, отдельных линз в земной коре, водных бассейнов), ей дается соответствующее название.

Грунтовые воды — подземные потоки, питающиеся дождевыми, талыми водами и болотами, как правило, выходят на поверхность в виде ключей и небольших ручейков. Эти подземные воды текут по водоупорной толще горных пород (образуют поток воды над первым водоупорным слоем). Минерализация и состав этой воды находятся в прямой зависимости от тех горных пород, по которым протекает грунтовая вода. При небольшой растворимости пород степень минерализации воды весьма незначительна. Например, поток грунтовой воды, проходящий через карбонатные породы (известняк и доломит), имеет достаточно высокую временную (гидрокарбонатную) жесткость, характеризующуюся содержанием ионов HCO_3' . Следовательно, чем разнообразнее на пути прохождения потока воды и растворимее горные породы (или составляющие их минералы), тем больше в ней растворимых соединений (особенно часто в таких минерализованных водах можно обнаружить ионы Na^+ , C^+ , Mg^{++} , Cl' , SO_4'' , HCO_3' , т. е. хлориды, сульфаты и бикарбонаты натрия, кальция и магния). Такие же соединения находятся в морях и океанах.

В грунтовых водах имеются некоторые органические растворимые вещества. Биохимические процессы протекают в верхнем слое потока почвенной воды. Они обусловлены наличием на растительном слое почвы органической жизни (трав, кустарников, деревьев). По этой причине, в частности, болотные воды имеют высокую кислотную агрессивность. Органическая жизнь поверхностного слоя значительно изменяет состав воды и ее агрессивное воздействие на бетон.

Воды разного генезиса различаются не только по составу, но и по количеству тех или других соединений. Присутствие небольшого количества растворенных солей показывает, что такие воды являются мягкими. В табл. II.1 приведены составы некоторых вод.

В некоторых странах из океанической и морской воды для удовлетворения бытовых нужд получают поваренную соль, для технических целей — бром, металлический магний (в 1 м³ такой воды содержится примерно 30 кг соли, 1,3 кг магния, 66 г брома, в малых концентрациях ценнейшие элементы таблицы Менделеева — марганец, иод, ванадий, никель, уран).

Междупластовые воды находятся в толще горных пород, в своеобразной обойме из двух водоупорных слоев, между которыми в водоносном горизонте течет поток. Такие воды в большей степени изолированы от попадания в них почвенных, загрязненных вод (в частности, артезианские питьевые воды — междупластовые воды). Химический состав и степень минерализации таких вод связаны с условиями их протекания в толще горных пород. Следует заметить, что в силу расположения в толще пород на достаточной глубине от дневной поверхности эти воды стабильны в любой период года. Изменение состава прямым образом связано с их положением в водоносных слоях.

Карстовые и линзовые воды характерны значительным колебанием химического состава и степени минерализации, что связано с разнообразием мест их образования при поступлении атмосферных осадков в растворимые горные породы и составляющие их минералы. Эти воды, как правило, образуются за счет поступления атмосферных осадков в толщу пород, потерявших монолитность.

Поверхностные речные воды в зависимости от источников, питающих реки, и пород, по ложу которых протекает поток, имеют различные химический состав и степень минерализации (табл. II.1). Воды небольших речек с питанием из болот или воды, протекающие

Таблица II.1

Вода	Содержание в воде ионов, мг/л							Содержание в воде солей, г/л
	K ⁺ + Na ⁺	Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	Cl ⁻	SO ₄ ⁼⁼	HCO ₃ ⁻	плотный осадок	
Грунтовая	849,5 931,5	493,5 483,5	116,2 103,2	716,8 709,7	2442 2492	67,1 79,3	4728 5742	— —
Речная	3,2 169,0	4,6 173,0	2,1 51,5	3,0 210,0	2,6 480,0	24,4 268,0	— —	— —
Морская и океаническая:								
Атлантического океана	—	—	—	—	—	—	—	33,2—37,9
Черного моря	—	—	—	—	—	—	—	10,0—18,5
Кара-бугазского залива	—	—	—	—	—	—	—	До 164,0
Балтийского моря	—	—	—	—	—	—	—	1,0—20,0

по хорошо промытым горным породам с высокой степенью растворимости или в местах выхода, например, сульфатных пород и т. д., имеют различную степень минерализации. Следует иметь в виду, что в реки в различное время года с меньшей или большей интенсивностью иногда попадают воды промышленных предприятий.

Озерные воды характеризуются климатической зоной расположения (интенсивностью испарения), наличием или отсутствием из озера стока вод, рельефом местности и другими условиями. Поэтому степень минерализации и химический состав озер могут значительно отличаться — от пресной воды до сильно минерализованной с содержанием 350 г/л солей, позволяющей организовать промышленную добычу солей.

Морские и океанские воды в зависимости от объема бассейнов более или менее стабильны по составу и минерализации. В океанских водах, наиболее стабильных по составу и степени минерализации, содержатся соли: хлористые и сернокислые натрий, магний и калий, бикарбонат кальция, бромистый магний.

Во многих рекомендациях для затворения смеси считается возможным использовать только воду, пригодную для питья. Перечисленные здесь сведения показывают, что, кроме некоторых составов артезианской воды, другие виды воды без санитарно-технической обработки не пригодны для питья. Следует отметить, что в технических целях не любую воду можно использовать из-за ее состава. Для изготовления бумаги, текстиля, вискозы, в энергетическом хозяйстве, теплофикации, в том числе при эксплуатации бетонных и железобетонных конструкций (сооружений) к качеству воды предъявляют специальные требования, а качество воды-среды учитывается при проектировании бетонных сооружений. Например, в ГОСТ-8424—63 к воде для приготовления и поливки бетона предъявляются одни и те же требования, что во многих случаях усложняет работу.

Действительно, требование применять для приготовления и поливки дорожного бетона воду, пригодную для питья, не точно. Как известно, сильно минерализованные воды источников, применяемые для лечебных целей, пригодны для питья, но не годятся для поливки бетона. Обычную питьевую воду, специально обработанную, явно не целесообразно расходовать на поливку бетона, так как для этой цели можно использовать воду, не прошедшую такой обработки (пресную воду прудов, озер, рек).

Вода, применяемая для приготовления бетонной (растворной) смеси, не должна содержать химических соединений и примесей, которые могут влиять на строительно-технические свойства: изменять сроки схватывания в такой степени, что это скажется на условиях работы, тормозить твердение цемента, снижать морозостойкость, повышать водо- и газопроницаемость, вызывать деструктивные процессы в цементном камне, образовывать высолы на поверхности сооружения и вызывать многие другие отрицательные явления.

Чтобы не допустить в работу непригодную воду, необходимо произвести ее химический анализ. Можно отметить, что в ГОСТе на гидротехнический бетон регламентируются требования к воде для приготовления и поливки бетона. И в этом ГОСТе указано на недопустимость содержания в воде примесей, влияющих на нормальное течение схватывания и твердения; разрешается применять для затворения смеси морскую воду, содержащую не более 2% солей и для поливки неармированного массивного бетона сооружений (конструкций), если на их поверхности допускается появление выцветов (выделение солей — высолов).

В этом ГОСТе особое внимание обращено также на воду, которую нельзя использовать ни для затворения бетона, ни для его поливки. Такое запрещение касается разных по составу болотных и промышленных сточных вод, а также вод, загрязненных примесями кислот, солей, нефти, масел (и аналогичных им вредных примесей): При этом нормируется: их водородный показатель pH ($\text{pH} < 4$) и содержание сульфатов (в расчете на ион SO_4^{2-} не более 0,27% от массы воды или 2700 мг/л). Если эти показатели сравнить с составом воды, приведенном в табл. II.1, то по содержанию ионов SO_4^{2-} подходит грунтовая, а также речная вода двух составов.

Исследования, проводимые на протяжении десятков лет, показали, что недопустимо применять болотную и торфяную воду, содержащую органические вещества. Грунтовые, речные, озерные и морские воды в преобладающем числе источников пригодны для затворения смеси; морские воды не пригодны для длительной систематической поливки бетона; воды, содержащие соли, например хлориды, сульфаты, можно использовать после опытного затворения, при котором выясняется изменение скорости схватывания смеси.

Применение той или другой воды следует связывать с наличием или отсутствием арматуры в бетоне. Зимой в воду затворения при работе на холодных бетонах добавляют соли в значительных количествах: хлористые кальций и натрий, нитриты и нитраты кальция, мочевины, их различные комбинации и др. Следовательно, добавка солей при затворении смесей не только возможна, но и должна стать необходимым технически оправданным мероприятием. Зная, как влияют различные соли на процессы твердения бетона и имея анализ воды, намеченной для использования, легко определить ее пригодность. Заметим, что уход за бетоном при регулярной поливке более 60 дней требует во много раз большего количества воды, следовательно, в этом случае без анализа нельзя утверждать о недопустимости использования такой воды для ухода за бетоном.

§ 19. Вода-среда

Воздействие воды на бетон сооружений (конструкций) не должно приводить к снижению технических свойств материала. Однако известно много случаев постепенного разрушения бетона из-за возникновения в цементном камне различных коррозионных процессов

(см. раздел второй, гл. X). Учитывая разнообразие химического состава и минерализации воды и случаи коррозии бетона, при проектировании бетона надо принимать во внимание предполагаемые условия работы объекта (фундаментной части, надземной или надводной частей сооружения и т. д.).

Для того чтобы оценить состав воды и решить вопрос об ее агрессивности, необходимо в полном соответствии с нормами и техническими условиями (СН 249—69 «Инструкция по проектированию. Признаки и нормы агрессивности воды-среды для железобетонных и бетонных конструкций») взять пробы воды и отправить их в химическую лабораторию для производства целевого химического анализа. Такой анализ надо выполнять в строгом соответствии с перечнем, содержащимся в табл. II.2, при этом необходимо выяс-

Таблица II.2

№ п.п.	Перечень определений	Прием определения
1	Бикарбонатная щелочность (HCO_3^-)	По ГОСТ 3687—47 с проведением анализа немедленно после вскрытия бутылки
2	Окисляемость	Общепринятая методика
3	Содержание ионов магния (Mg^{++})	По ГОСТ 3280—47
4	Содержание ионов натрия и калия (Na^+ и K^+)	Расчет по разности определенных анионов и катионов и прямым методом
5	Содержание водородных ионов (рН-водородный показатель)	Общепринятая методика с проведением анализа немедленно после вскрытия бутылки (колориметрическим или электрометрическим способом)
6	Содержание сероводорода (H_2S)	Общепринятая методика с условием консервации пробы на месте отбора
7	Содержание свободной углекислоты	Общепринятая методика с проведением анализа немедленно после вскрытия бутылки
8	Содержание сульфатных ионов (SO_4^{--})	По ГОСТ 4389—58

Примечания: 1. Наличие в воде тех или других ионов сначала определяют по качественному анализу сухого остатка, после чего находят их количество.

2. Надо обратить особое внимание на срочность анализов № 1, 6, 7. Наиболее целесообразно определять эти компоненты воды не позднее чем через день после отбора пробы.

нить признаки и нормы агрессивности воды-среды (выщелачивающую, общеокислотную, углекислую, сульфатную, магниальную, аммонийную, щелочную агрессивности). Анализ воды, полученный из лаборатории, позволяет, пользуясь нормативами СН 249—69, оценить степень агрессивности воды и назначить для ее предотвра-

щения соответствующие мероприятия, которые в деталях рассмотрены в гл. X. Отметим, что при определении степени агрессивности воды-среды в указанных нормах особое внимание обращено на напор воды на бетон, коэффициент фильтрации грунта, прилегающего к сооружению (конструкции). Мероприятия, назначаемые при проектировании бетона, должны быть обоснованы технико-экономическим расчетом.

§ 20. Пределы содержания песка в бетоне

По геологической классификации, предложенной еще в 1931 г. Институтом геологической карты ГГРУ, рыхлые отложения разделены на: псефиты (камешки), псаммиты (песок), алевриты (микропесок или силит) и пелиты (глины). В табл. III.1 приведена геологическая классификация песка, отличная от стандартной строительной. Заметим, что во многих случаях в залеганиях рыхлых отложений указанные фракции перемешаны. Например, в аллювиальных отложениях горных рек Киргизской ССР содержится не более 25% песчаных и пылеватых зерен; это типично и для отложений многих рек Уральского района, например, р. Белой и Камы.

Количество песка в бетоне (растворе) * меняется в значительных пределах, что связано с составом бетона, требуемыми свойствами и т. д. К песку для растворов, применяемых в кладке и штукатурных работах, предъявляются требования, учитывающие состав бетона (раствора), следовательно, его технические свойства, количество песка (его природу, чистоту, зерновой состав, шероховатость, форму и огранку зерен). При подборе состава бетона по методу абсолютных объемов (см. § 41) долю песка в бетоне вычисляют из выражения

$$r = \frac{V_n^{ab}}{V_n^{ab} + V_{г(щ)}^{ab}},$$

где V_n^{ab} — абсолютный объем песка в абсолютном объеме заполнителей; $V_{г(щ)}^{ab}$ — абсолютный объем гравия (щебня) в абсолютном объеме заполнителей.

Для бетона численное значение $r=0,25-0,4$ прямым образом зависит от объема пустот в гравии (щебне). Чем больше пустотность крупного заполнителя, тем больше значение коэффициента r

Таблица III.1

Классификация	Наименование песков и размер зерен, мм			
	Грубый 1—2	Крупный 0,5—1	Средний 0,25—0,5	Мелкий 0,1—0,25
Геологическая				
Строительная	Рядовой нефракционированный строительный 0,15—5			

для плотных бетонов. Для жестких бетонных смесей значение r ниже, чем для пластичных смесей, и составляет 0,25—0,34. Как и в пластичных бетонах, диапазон чисел также связан с объемом

* Здесь рассмотрен раствор, обеспечивающий получение технического камня с теми же свойствами, что и при наличии в нем, кроме песка, гравия (щебня)

пустот в гравии (щебне). В свою очередь, пустотность песка, которая связана с ранее сказанным о его качестве, влияет на расход цемента в бетоне. При этом различные технические свойства бетона значительно меняются при использовании песков неодинакового качества.

С увеличением размера зерен песка (условно обозначается модулем крупности $M_{кр}$) прочность бетона при прочих равных условиях возрастает. Это, в частности, связано с уменьшением поверхно-

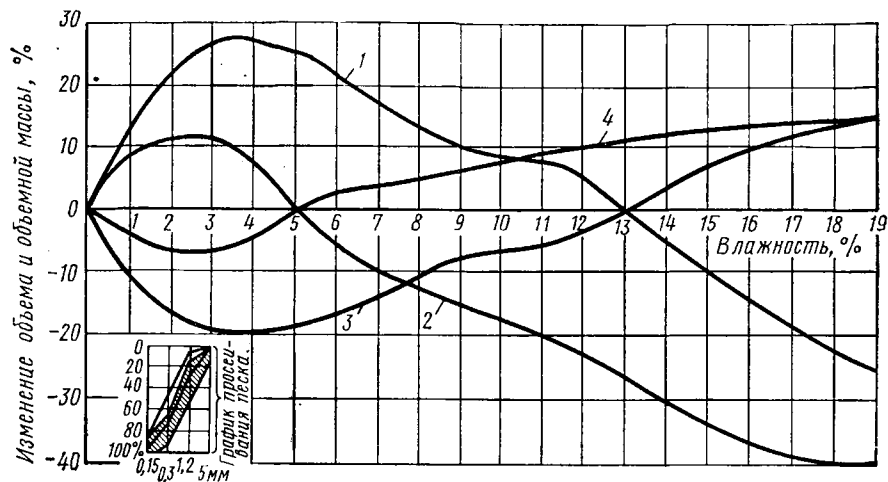


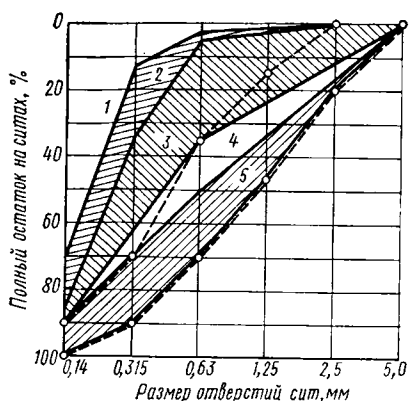
Рис. III.1. График изменения объема (кривые 1 и 2) и объемной массы (кривые 3 и 4) образца песка с плотностью $2,6 \text{ г/см}^3$, объемной массой $1,58 \text{ г/см}^3$, пустотностью $39,2\%$ в зависимости от влажности:

1 и 3 — в рыхлом состоянии без вибрирования; 2 и 4 — при вибрировании с частотой 3000 кол/мин

сти контакта зерен песка с цементным камнем. Действительно, при использовании мелкого песка и одной и той же технологии смешивания песка, цемента и воды необходимо добиваться равномерного распределения цементного теста на большей поверхности зерен песка. Практически этого достичь не удастся. В случае применения мелкого песка на качество смешивания влияет и особенность распределения пленок воды на поверхности мелких зерен, т. е. у песков различного зернового состава различна степень разрыхления. На рис. III.1 видно, как содержание воды сказывается на изменении объема песка, что характеризует степень его разрыхления. Опытами Фере было показано, что для кварцевых зерен песка, названных им грубыми (наиболее крупными), средними и мелкими, на каждый песок требуется 3, 9 и 23% воды, чтобы получить на одном цементе одинаковую стандартную пластичность растворной смеси.

Влияние качества песка (рис. III.2) на пластичность растворной смеси было учтено в стандартах при выборе песка для испытания

цементов. Особенно наглядно роль зернового состава песка выявляется при испытании растворов. Исходя из материалов исследований, осуществленных в Гипроцементе МПСМ СССР при разработке стандарта на испытание цементов в пластичных растворах, пески делят на три фракции (табл. III.2): I — зерна размером



1,50—1,02; II — 0,80—0,54; III — 0,200—0,102 мм. Из указанных фракций подбирают различные составы песка, которые затем используют для приготовления растворов жесткой консистенции.

Рис. III.2. Области просеивания песков:

1 — тонкого песка с $M_{кр} < 1,2$; 2 — очень мелкого песка с $M_{кр} = 1,1—1,6$; 3 — мелкого песка с $M_{кр} = 1,5—2,0$; 4 — песка средней крупности с $M_{кр} = 1,9—2,5$; 5 — крупного песка с $M_{кр} = 2,4—3,5$

Таблица III.2

№ п. п.	Содержание фракций, %, при фракции песка			Содержание воды, %	Предел прочности образцов после 7 сут. водного твердения $кг/см^2$ (10^{-1} МПа)	
	I	II	III		при сжатии	при растяжении
1	100	—	—	7	352	26
2	50	40	10	7	480	33
3	45	45	10	7	455	33
4	70	15	15	7	455	33
5	75	25	—	7,25	346	27
6	90	—	10	7,25	460	32
7	60	30	10	7,25	466	32
8	30	60	10	7,25	443	33
9	—	90	10	7,25	430	32
10	50	50	—	7,5	336	28
11	—	95	5	7,5	374	30
12	—	85	15	7,5	407	32
13	50	30	20	7,5	427	33
14	—	80	20	7,5	388	32
15	—	100	—	8	288	26
16	33,4	33,3	33,3	8	352	30
17	45	15	40	8,5	307	28
18	15	45	40	8,5	304	29
19	20	20	60	10,5	225	23
20	25	—	75	12	168	22
21	—	25	75	12	155	21
22	—	—	100	15	97	17

Примечание. Испытание проведено на одной пробе цемента.

Результаты испытаний хорошо согласуются с аналогичными опытами, в частности с результатами работ Фере. Действительно, содержание воды в растворах при одной стандартной пластичности-жесткости увеличивается с уменьшением размера зерен с 7% для песка с зернами только фракции I до 15%, для песка только с зернами фракции III; при большем содержании воды могут быть получены большие прочности, чем при меньшем ее содержании (см. составы 13 и 1, 16 и 1; табл. III.2); при разных комбинациях фракций песка содержание воды в растворах одной и той же стандартной пластичности-жесткости может быть одинаковым (см. составы 1—4, 5—9, 10—14, 15 и 26, 17 и 18, 20 и 21).

Указанные результаты зависят от зернового состава всего песка, формы зерен отдельных фракций, создающих наименьшую пустотность и более равномерное заполнение пустот цементным камнем — каркасной части растворных образцов. Резкое отличие как в сторону наибольшей, так и наименьшей прочности связано с применением крайних зерновых составов или близких к ним (смеси фракций I+III, а также фракций I+II+III с преобладанием крупных фракций или составов, в которых больше мелких фракций из зернового спектра, например, составов 19, 20, 21, состава из одних мелких фракций 22). Приведенные здесь сведения учитываются в технических рекомендациях многих стран при назначении материалов для производства бетонной смеси на песках, составляемых из отдельно заготовленных фракций. При стандартном испытании цемента для определения марки не имеет значения требование получения наиболее высоких прочностей, а при его маркировке выявляют только условную прочность цемента. Однако переход от условных стандартных марок цемента к прочности бетона на таком цементе базируется (см. § 41) на ряде формул, в которых численные значения параметров связаны с методами испытания цемента, что всегда надо учитывать.

Таблица III.3

Стандартные пески	Среднее значение предела прочности при сжатии, кг/см ² (10 ⁻¹ МПа)	Прирост прочности, %
СССР	521	Эталон
ГДР	650	25
ЧССР	561	8

Примечание. Испытание произведено через 28 сут. на цементе Брянского завода.

В табл. III.3 приведены результаты испытаний одного из цементов, осуществленных автором учебника на трех разных стандартных песках. Из этих испытаний видно, насколько важно учитывать различие в прочности цементов одной и той же марки при определении ее на разных песках. Эти испытания проведены на трамбованных образцах (ГОСТ 310—41) *.

* Перед переходом на испытания цемента в пластичных растворах проводились испытания по указанному ГОСТу.

Из большой серии таких исследований, проведенных в Гипроцементе, можно привести результаты испытания трех песков: международного (принятого во многих странах), двухфракционного (80% нормального вольского и 20% фракции 0,02—0,09 мм) и нормального. Испытания проведены при В/Ц=0,5 на изопластичных смесях (табл. III.4).

Таблица III.4

Песок	Относительная прочность, %			
	при изгибе		при сжатии	
	Продолжительность твердения, сут.			
	7	28	7	28
Международный . . .	100	100	100	100
Двухфракционный . .	108	101	90	88
Нормальный	100	97	81	84

Исследования Гипроцемента, проведенные на портландцементных, пуццолановых портландцементных, шлакопортландцементных, показали, что и в пластичных растворах зерновой и петрографический составы песка влияют на прочность образцов. С изменением зернового состава кварцевого (вольского) песка, приводящего к уменьшению в нем объема пустот, прочность образцов для разных цементов увеличивается от 111 до 117% (для цементов, у которых отмечено минимальное увеличение прочности) и от 112 до 129% (для цементов, отличающихся наибольшим изменением прочности). При изменении не только зернового состава, но и его петрографического состава прочность ряда цементов изменяется в еще большей степени (до 143%), несмотря на значительное увеличение В/Ц (с 0,46 до 0,56).

Анализ результатов обоих испытаний показывает, что роль состава цемента (зернового, химико-минералогического) в изменении прочности образцов также вносит свои существенные коррективы. Различие в качестве цемента может вызвать различие в зерновых составах песка, что всегда надо учитывать при проектировании бетона. Теоретическая сторона этого вопроса еще не вышла из стадии разработок и требует проведения новых соответствующим образом организованных экспериментов.

При использовании строительных песков с исключительно широким разнообразием качества получаются бетоны с таким же разнообразием технических свойств. По ГОСТ 8736—62 к качеству песка предъявляются требования, которым не удовлетворяет значительное количество месторождений песков. Считается, что мелкие пески превышают 90% всех запасов в СССР. Качество речных песков, как правило, отличается от стандарта своими зерновыми составами (пески таких рек, как Волга, Дон, Кама и др., мелкозернистые).

В табл. III.5 приведены сведения о зерновых составах некоторых речных песков, взятых на отдельных участках реки.

Песок	Полные остатки на ситах, %, при размере отверстий сит, мм:						
	5	2,5	1,2	0,6	0,3	0,15	<0,15
Средние показатели по ГОСТу	7,0	25,0	50,0	66,0	82,0	95,0	5,0
Участки на р. Волге	6,4	13,1	21,3	33,3	54,2	96,3	3,7
Участки на р. Днепр (дюнный из поймы реки у г. Дарница)	—	—	1,0	3,9	14,2	88,6	11,4
Участки на р. Днепр (Новая Каховка, у с. Ключевое)	—	—	—	2,0	27,0	61,0	39,0

Как в СССР, так и за рубежом есть необходимость в приготовлении искусственных песков путем дробления некоторых горных пород. Мелкие пески, не отвечающие требованиям ГОСТ 8736—62, разрешается применять после обогащения фракциями природного крупного песка или крупным искусственным песком, который всегда получается при приготовлении щебня. Количество и качество таких высевок зависит не только от качества дробимой горной породы, но и от типа и регулирования дробилок, что всегда надо учитывать.

Рассмотрим причины, вызывающие необходимость указанного выше регулирования зернового состава песка. Начнем этот анализ с упоминания о работах в этом направлении русских инженеров, в частности, осуществленных инж. И. Сомовичем в 1890 г. Производя опыты на трех разных песках (искусственном гранитном, местном известняковом и нормальном петербургском) и на стеклянном песке-бисере при одной и той же пластичности-жесткости смесей, он установил, что наибольшую прочность показали образцы на местном песке. Следовательно, на прочность образцов оказывает влияние количество цемента, а не особенность песка (его минералогия, форма зерен, состояние поверхности зерен), т. е. ведущим фактором является зерновой состав, обуславливающий пустотность песка или количество цемента для заполнения пустот в скелете.

Надо отметить, что в этих выводах есть условность, связанная со сроками испытания образцов, низкой активностью цемента, относительно низкой маркой бетона и невысокой пластичностью смеси, из которых были приготовлены образцы. Несомненно, что кроме зернового состава на прочность бетона (раствора) влияет и ряд других факторов, которые при существующих условиях эксперимента с необходимой достоверностью удастся выявить, что далее рассмотрено.

В табл. III.6 приведены составы четырех песков, в табл. III.7 — составы щебня, на которых в отделениях строительных материалов ЦНИИСа под руководством автора были проведены исследования бетонов, а в табл. III.8 приведены сведения о цементах, использованных в этих опытах.

В соответствии с требованиями ГОСТ 8736—62 указанные природные пески по модулю крупности и полному остатку на сите с сеткой № 063 относятся по зерновому составу: № 1 и 3 — к мелким, № 2 и 4 — к средним. Испытания бетонных образцов размером 10×10×10 и 20×20×20 см проводились в три срока: 3, 7 и 28 сут. на одном щебне с наибольшей крупностью зерен 20 и 40 мм. Пластичность смеси на разных песках, но при одном В/Ц составляла 4 и 8 с (удобоукладываемость), 2 и 5 см (осадка конуса). Образцы 20×20×20 см формовали на виброплощадке при амплитуде вер-

Таблица III.6

Песок карьера	Полные остатки, %, при размере отверстий сит, мм							Объемная масса, г/см³	Плотность, г/см³	Пустотность, %	Модуль крупности	Содержание ила и глины, %
	5	2,5	1,2	0,6	0,3	0,15	<0,15					
Купавнинского	2,86	3,7	5,0	31,29	39,72	95,82	4,10	1,55	3,64	41,3	1,76	0,34
Люберецкого	—	—	—	0,12	12,48	99,34	0,66	1,44	2,66	45,8	1,12	0,35
Таборского	—	10,7	16,3	42,30	74,00	95,80	4,00	1,52	2,58	40,0	2,39	0,40
Тучковского	17,56	17,8	22,37	40,77	54,94	94,47	5,24	1,63	2,63	38,1	2,30	3,28

Таблица III.7

Показатели	Наибольшая крупность щебня, мм		Показатели	Наибольшая крупность щебня, мм	
	20	40		20	40
Зерновой состав, % по фракциям, мм:			Плотность, г/см³	2,67	2,67
5—10	25	15	Объемная масса, г/см³	1,48	1,5
10—20	75	50	Объем пустот, %	44,5	43,8
20—40	—	35	Содержание ила и глины (отмучивание), %	0,3	0,3

Таблица III.8

Наименование	Сроки схватывания, ч-мин		Нормальная густота, %	Предел прочности при сжатии*, кг/см² (10⁻¹ МПа), при длительности твердения, сут.			
	начало	конец		1	3	7	28
Портландцемент Себряковского за вода	5-50	7-10	24,5	131	263	420	581
Портландцемент Броенского завода	3-27	5-32	28,5	—	262	563	654

* Прочность образцов определялась в жестких смесях по ГОСТ 310—41.

тикально направленных колебаний 0,30—0,35 мм, что позволяло одновременно уплотнять 12 образцов, закрепляемых электромагнитами.

Перемешивание производилось в бетоносмесителе принудительного действия. Песок и щебень перед использованием высушивали. До введения крупного заполнителя и воды песок и цемент дополнительно перемешивали. Смесь для образцов размером $10 \times 10 \times 10$ см приготавливали вручную и уплотняли на лабораторном вибростоле с 3000 круговыми колебаниями в минуту при амплитуде 0,35 мм. Воду в смесь вводили отдельными порциями.

Различие в крупности щебня, в технологии перемешивания и уплотнения смесей сказалось на абсолютных значениях прочности: она значительно выше у образцов размером $20 \times 20 \times 20$ см. В этой работе было показано, что прочность бетона из смесей одинаковой пластичности-жесткости и содержанием цемента и воды связана с качеством песка и количеством цемента (табл. III.9 и III.10).

Таблица III.9

Песок карьера	Состав бетона, кг/м³				Осадка конуса, см	Средний предел прочности при сжатии, кг/см² (10^{-1} МПа), при длительности твердения, сут.		
	цемент*	песок	щебень	вода		3	7	28
Купавнинского	250	652	1270	190	3,0	40/51	90/71	131/143
	400	567	1270	190	3,0	138/111	202/155	373/322
Люберецкого	250	649	1270	195	3,0	28/50	73/63	122/121
	400	523	1270	195	3,0	122/102	187/155	361/313
Тучковского	250	631	1270	195	3,5	48/55	90/76	165/143
	400	508	1270	195	3,5	141/123	200/172	376/332

* Портландцемент Бронецкого завода; кубики $20 \times 20 \times 20$ см.

Таблица III.10

Песок карьера	Состав бетона, кг/м³				Осадка конуса, см	Удобук- лалывае- мость, с	Средний предел прочности при сжатии, кг/см² (10^{-1} МПа), при длительности твердения, сут.		
	цемент*	песок	щебень	вода			3	7	28
Купавнинского	250	652	1270	190	0,5	4	84	135	268
	400	567	1270	190	0,5	8	158	285	—
Люберецкого	250	649	1270	195	0,5	4,5	74	107	182
	400	523	1270	195	0,5	8	139	246	—
Тучковского	250	631	1270	195	0,5	4	111	177	297
	400	508	1270	195	0,5	7	168	321	469

* Портландцемент Себряковского завода; кубики $10 \times 10 \times 10$ см. Показатели двух повторных серий опытов.

Действительно, по мере уменьшения модуля крупности песка за счет увеличения количества мелких зерен (см. табл. III.6) прочность бетонных образцов размером $10 \times 10 \times 10$ см систематически снижается при количестве цемента, равном 250 кг/м^3 , и не изме-

няется у образцов с содержанием цемента 400 кг/м³ (см. табл. III.9 и III.10). Однако у образцов размером 20×20×20 см для обоих составов бетона с расходами цемента 250 и 400 кг/м³ по мере уменьшения модуля крупности песков отмечается снижение прочности на все сроки твердения. Бетонные образцы с уменьшенным количеством воды (смеси состава 280:140 кг/м³) не различаются по прочности. Для объективной оценки влияния зернового состава песка на прочность бетонных образцов, отличающихся составом, размерами и технологией приготовления, были поставлены контрольные опыты на двух песках — Дмитровском и Люберецком, зерновые составы которых несколько изменили за счет отсева пылевидных составляющих и ввода их в мелкий (не стандартный) Люберецкий песок. В табл. III.11 приведены результаты испытания этих образцов, изготовленных из смесей с пластичностью-жесткостью 40—65 с. Бетонную смесь уплотняли без груза.

Т а б л и ц а III.11

Песок	r	В/Ц	Прочность бетона через 28 сут., кг/см ² (10 ⁻¹ МПа)
Дмитровский без пылевидных частиц	0,38	0,58	411
	0,30	0,49	497
	0,26	0,42	588
Люберецкий с пылевидными частицами	0,30	0,58	341
	0,28	0,49	440
	0,30	0,42	511

П р и м е ч а н и е. Портландцемент Броценского цементного завода.

Для бетона любого состава выявлено различие в показателях прочности. На мелкозернистом песке, с содержанием пылевидных частиц до 5%, прочность бетона на 12—15% ниже прочности бетона

Т а б л и ц а III.12

Песок	Расход цемента, кг/м ³	В/Ц	Осадка конуса, см	Прочность бетона при сжатии, кг/см ² (10 ⁻¹ МПа), через 28 сут.	
				при указанной осадке конуса	из жестких смесей
Днепроvский	310	0,6	16	240	348
Дюнный чистый	310	0,6	10	195	342
75% дюнного чистого и 25% искусственного (высевки от дробления гранита)	310	0,6	11	260	379
Дюнный, содержащий органические примеси	310	0,6	6	145	270

на среднезернистом песке без пылевидных частиц. Весьма большое значение имеет не только зерновой состав, но и наличие или отсутствие в песке пылевидных и глинистых частиц. Таким образом, влияние качества песка на свойства бетона не в полной мере отражается ГОСТом и приемами подбора состава.

Из табл. III.12 видно влияние на прочность бетона зернового состава песков при уменьшении в нем содержания воды. К сожалению, эти лабораторные исследования не отражают действительно масштаба использования таких бетонных смесей и области их применения (номенклатуру конструкций, изделий, элементов). Необходимо учитывать, что относительно велико применение смесей с указанной пластичностью-жесткостью. Особое внимание следует обращать на пески, загрязненные органическими примесями, которые значительно снижают качество бетона.

Один и тот же мелкозернистый песок (например, Люберецкий) в сравнении со среднезернистым в одном случае показывает разницу в прочности образцов бетона, достигающую до 40%, в другом — до 12—15%, в третьем — дает одинаковые результаты. При этом особое внимание следует обратить на прочность образцов на 3, 7 и 28 сут. Это указывает, что у бетонов, изготовленных на одном цементе, при одном В/Ц, по одной технологии, разница в прочности появляется не в результате структурных характеристик цементного камня, которые в обоих случаях с течением времени для бетонов на этих двух песках систематически изменяются, а в результате текстурных характеристик скелетной части, остающейся после уплотнения смеси в одном и том же состоянии по характеристике раздвижки зерен. Сказанное хорошо иллюстрируется кривыми изменения объема и объемной массы песка при изменении его влажности. Действительно, количество воды, остающейся для смачивания песка, всегда меняется и зависит от: 1) количества воды затворения; 2) водоудерживающей характеристики цемента (в том числе добавок к цементу) и его количества; 3) водоудерживающей характеристики и количества * щебня и, наконец, 4) качества самого песка.

В описанном случае при изготовлении образцов на различных песках получены неодинаковые результаты, которые связаны не только с зерновым составом, но и с нижеперечисленными показателями:

1) пластичности-жесткости бетонной смеси одних и тех же составов, связанных с различием в водоудерживающих характеристиках Себряковского и Броцкого цементов;

2) механической прочности использованных цементов и, следовательно, бетонных образцов по соответствующим срокам испытания (3, 7 и 28 сут.). Прочность бетона надо сравнивать по конкретным показателям прочности растворов в разные сроки, а не по их марке;

3) разной технологии приготовления бетона.

* Для точных расчетов надо учитывать и поверхность смачивания щебня, которая всегда различна.

По указанным причинам при сравнении прочности стандартных бетонных (растворных) образцов необходимо учитывать все три условия. Только учитывая эти условия, можно приступать к оценке влияния зернового состава песка на прочность бетона. Исключив влияние приведенных условий, необходимо выяснить причины разницы прочности бетона для составов с меньшим и большим содержанием цемента при одном и том же количестве воды в бетоне и в жестких бетонных смесях. Действительно, из анализа результатов испытания образцов бетона (см. табл. III.9 и III.10) видно, что

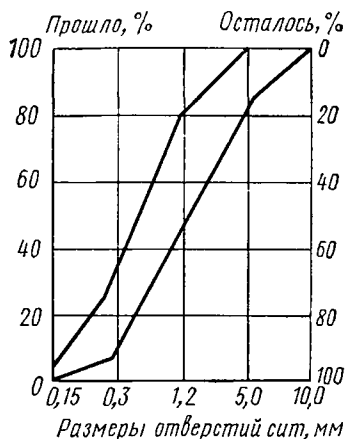


Рис. III.3. Стандартные показатели пределов зернового состава песков

разница в прочности образцов не имеет устойчивого характера для всех серий испытания. Опытные данные позволяют сделать следующие выводы:

1. Технология перемешивания компонентов бетонной смеси и ее формирования с применением вибрации существенно влияет на показатели прочности образцов*. Например, приготовление малопластичной смеси в бетоносмесителе принудительного действия с вертикально направленными колебаниями без пригрузки в закрепленных формах показало наибольшую разницу в прочности образцов, изготовленных на среднезернистом полиминеральном песке Тучковского карьера и мелком чистом кварцевом песке Люберецкого карьера.

2. Мелкие загрязненные пески всегда ухудшают качество бетона по сравнению с среднезернистыми, а тем более крупнозернистыми песками с таким же наличием в них глинистых и пылевидных частиц.

3. Использование виброплощадок с двумя частотами колебаний и пригрузом значительно повышает технические свойства бетонов на песках разного зернового состава.

4. Чистые пески разного зернового состава (мелкие и среднезернистые) при надлежащей технологии могут обеспечить получение бетонов с близкими показателями прочности.

5. Приготовление в лабораторных условиях бетонов на песках, различных по зерновому составу, по стандартной методике (как из пластичных, так и из жестких смесей) во многих случаях не позволяет определить их влияние на прочность образцов. Однако качество песков отражается на прочности при изготовлении образцов в условиях производственной технологии, что показывает несовершенство ряда методов испытания бетона.

* Указанные условия влияют и на другие технические свойства бетона.

Одним из эффективных приемов корректирования зернового состава песка является фракционирование и использование в бетонных работах песка с подобранным количеством фракций. На рис. III.3 приведены стандартные показатели пределов зерновых составов песка. Во многих случаях приготавливают искусственные пески нужных фракций, вводя которые корректируют зерновой состав песка. Этим приемом удается изменять и его пустотность, что, в свою очередь, отражается на выборе показателя r при проектировании состава бетона.

Автору учебника приходилось неоднократно корректировать зерновые составы песка путем смешивания разных песков, добавления к природным мелким пескам искусственных песков. В этом случае на заводах предусматривается установка дополнительных бункеров и дозатора. Смешивание производится непосредственно в бетоносмесителе в процессе приготовления смеси (бетонной или растворной).

§ 21. Минералогические составы песка

В ГОСТ 8736—67 наряду с уже рассмотренным зерновым составом особое внимание обращено на генезис песка, который сообщается при запросах потребителю в виде петрографической и минералогической характеристик с обязательным указанием количества минералов: слюды, а также минералов, содержащих серу и различные руды. Причиной особого внимания к этому вопросу является исключительно большое различие в строительно-технических свойствах песков, отражающееся на качестве смесей и бетонов (растворов).

Как известно, песок — продукт разрушения монолитных горных пород*. Естественнo, что условия разрушения и исходные качества горных пород обуславливают различие в качестве песков. Зерна песка по минералогическому составу и виду могут быть: морские, озерные, речные, флювиогляциальные, ледниковые, эоловые, вулкано-генные и остаточные (существуют и иные классификации, в которых имеются названия дюнные, аллювиальные, элювиальные, моренные). Морские пески чистые, однако их зерновой состав даже на одном месте нестабилен из-за влияния потоков в прибрежной зоне, систематически изменяющихся от погодных условий.

Как правило, пески смешаны с более крупными отложениями разрушенных горных пород — галечником и гравием. Морские пески чище речных и озерных; они могут залегать параллельно береговой линии в виде отдельных вытянутых линз. Для речных и

* Здесь приведены сведения о процессах, вызывающих разрушение горных пород: эрозия — процесс разрушения горных пород от различных воздействий движущихся или неподвижных агентов; коррозия — механическое и химическое разрушение горных (также технических) пород под влиянием внешних факторов среды; выветривание — разрушение, связанное с условно неподвижными агентами.

морских (прибрежных) песков характерна достаточно хорошая сглаженность поверхности более крупных зерен. Зерна размером не крупнее 0,75 мм в силу того, что они систематически могут находиться во взвешенном состоянии, имеют угловатость — ребристость.

Однако в ряде случаев эта закономерность может нарушаться. Действительно, условия воздействия внешней среды весьма разнообразны. Например, в одном случае возможно воздействие только одной воды (отлив и прилив), в другом — высыхание влажных песков под влиянием движения воздуха, последующий перенос сухого песка и систематическое сухое трение частиц, окатывание их поверхности. Такой процесс типичен для пустынь, где образуются пески с хорошо окатанной поверхностью и размером мельче 0,75 мм — золовые*.

Флювиогляциальные, или водно-ледниковые, пески — продукт отложения разрушенных горных пород. Поверхность зерен таких песков окатана под воздействием длительных коррозионных процессов, перетирания при движении массы обломочного материала. На наиболее крупных обломках иногда можно увидеть следы от ледниковых царапин. Пески, добываемые в обширных районах Московской и Ленинградской областей по своему генезису флювиогляциальные.

Сравнительные испытания образцов бетона на таких песках, а также кварцевых песках — стандартных для испытания цемента, показали, что форма зерен имеет большое значение для повышения прочности бетонов (растворов). Благодаря разнообразию формы и поверхности зерен в бетоне (растворе) создается лучшее сцепление-сцепление цементного камня с песком. Сказанное также относится к пескам чисто ледникового генезиса. Испытание одного из цементов в растворах на вольском кварцевом окатанном стандартном песке речного типа и на полиминеральном песке Таборского месторождения флювиогляциального генезиса (табл. III.13) показывает, какое значение для прочности бетонов (растворов) имеет форма зерен и качество их поверхности.

Таблица III.13

Песок карьера	Состав раствора	В/Ц	Пластичность смеси, мм	Предел прочности, кг/см² (10 ⁻¹ МПа)					
				при сжатии		при изгибе*		при разрыве*	
				Продолжительность твердения, сут.					
				3	7	3	7	3	7
Вольского Таборского	1:3	0,560	129	199	274	38,4	42,5	16,4	19,6
	1:3	0,575	129	213	313	59,8	61,3	23,6	30,3

* Особый эффект применения флювиогляциального песка наблюдается при испытании образцов на изгиб и разрыв.

* Дюнные, барханные, золовые пески образуются под воздействием ветра.

Золотые пески имеют зерна округленной формы, так как в процессе образования они подвергались длительному воздействию ветра (в том числе воды на определенной стадии разрушения исходных горных пород). Аналог золотых песков — барханный песок Кара-Кумов состоит только из зерен мельче 0,6 мм: 0,7% фракции размером 0,3 мм, 84,6% — фракции 0,15 мм и 15,4% — меньше 0,15 мм. Использование такого мелкозернистого песка показало, что расход цемента увеличивается больше чем на 40% по сравнению с среднезернистыми стандартными песками, так как резко повышается содержание воды в бетоне*.

Вулканические пески содержат вулканический пепел и лапилли**. В зернах пепла можно заметить типичные золотые признаки (округленность зерен) — форма зерен угловатая, так как они образованы при взрыве пород.

По форме зерен к вулканическим пескам близки элювиальные пески, зерна которых не окатаны, с острыми краями, угловатые. Характерно, что в них находятся тонкие пластинки разделившихся кусочков слюды; кварц, не имеющий спайности, представлен обломками неправильной формы; а минералы, обладающие спайностью (например, ортоклаз $K_2O \cdot Al_2O_3 \cdot 6SiO_2$), — мелкими зернами, которые ограничены плоскостями спайности. Минералогический состав этих песков состоит преимущественно из пород, которые в этом месте постепенно разрушались, образовав месторождения. Качество элювиальных песков ниже, чем аллювиальных.

Остаточные пески откладываются преимущественно в жарком, сухом или холодном климатических районах, встречаются в умеренном, но влажном климате.

Из вышесказанного можно сделать вывод. Минералогический состав песков исключительно разнообразен, что связано с их генезисом: исходными горными породами, условиями разрушения, в том числе переноса — транспортирования частиц и их отложения.

Песок рек средней полосы СССР (вольский кварцевый) в основном состоит из кварцевых округлых зерен, угловатых зерен кремния, которые в отличие от зерен других минералов, например роговой обманки, полевого шпата (ортоклаза и группы минералов плагиоклаза), слюды, не подвергаются коррозии. Для песков рек Урала характерно наличие большого количества крупных частиц кремнеземных пород (например, зерен роговиков), кварца, обломков песчаников и пылеватых частиц; в песках р. Кубани (в пойменной и надпойменной террасах) встречаются зерна кварца и обломки амфиболитов, полевых шпатов и ряда других горных пород и минералов; в песках по р. Днепр минералогический состав меняется; так, в нижней части реки в зернах размером 0,15—0,3 мм преобладает до 95% кварца, до 4% полевого шпата, отсутствуют глинистые частицы и слюда, до 0,3% рудных минералов и амфиболов; в верхней части реки в этих же фракциях обнаружено до 80% кварца, около

* При использовании ПАВ требуется меньше цемента.

** Лапилли (lapillus — камешек) — камешки величиной с грецкий орех. Такие неправильной формы обломки лавы — результат извержения вулкана.

14% полевых шпатов, около 1% глинистых частиц, 0,03% слюды, 2% рудных минералов, амфиболов, обломков пород. Сказанное фиксирует наше внимание на изменении минералогического состава песка не только по длине рек, но и по его фракциям в одном и том же месторождении.

Характерным признаком такой дифференциации состава зерен является стойкость минералов и горных пород против эрозии. Анализ состава песков Кавказского района (по р. Ингури), где для песчаных отложений рек характерно высокое содержание зерен из сланца, показал, что: 1) для обломков горных пород характерно систематическое увеличение содержания сланца при уменьшении размера зерен (от 8,2% зерен 2,5—1,2 мм до 40% зерен 0,3—0,15 мм) и во фракциях мельче 0,6 мм отсутствие обломков таких горных пород, как излившихся эффузивных, кварцитов, песчаников; 2) для отдельных минералов характерно систематическое увеличение содержания кварца по мере уменьшения размера зерен, например с 23% кварца в зернах размером 2,5—1,2 мм до 59% в зернах размером 0,3—0,15 мм.

После породообразующих минералов группы полевых шпатов (ортоклаза и плагиоклазов) кварц наиболее распространенный минерал в литосфере. Он химически стоек к большинству реагентов. Отсутствие спайности и высокая твердость (по шкале Мооса твердость кварца равна 7) обеспечивают его стойкость против эрозии*. Кварц — существенная составная часть многих горных пород различного генезиса (магматических, осадочных, метаморфических), он встречается как акцессорный** и вторичный минерал, например, в метасоматических*** образованиях и других местах [3, 15, 33]. В его составе примерно 100% SiO_2 . Кварц в виде песка встречается в таких осадочных (вторичных) породах, как песчаник. Содержание кварца в граните доходит до 40% (при содержании полевого шпата, в частности ортоклаза, 40—60%). При разрушении в граните полевого шпата наряду с другими минералами, например ортоклазом, протекает реакция, которая приводит к образованию обломочных пород, содержащих зерна кварца (практически близкие к размерам исходных зерен) и другие минералы измененных размеров:

$$\text{K}_2\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 6\text{SiO}_2 + n\text{H}_2\text{O} + \text{CO}_2 = \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O} + \text{K}_2\text{CO}_3 + 4\text{SiO}_2 \cdot m\text{H}_2\text{O}.$$

В такой породе, как габбро, нет зерен кварца. Следовательно, ее эрозия за геологические периоды при образовании обломочных рыхлых пород не покажет в них кварцевой составляющей. Минералогический состав песка также влияет на технические свойства бетона, в частности, обусловленные не только прочностью отдельных зерен песка, но и условиями контакта их поверхности с цементным тестом и цементным камнем.

* Кварц растворим только в кислоте HF.

** Акцессорный — присоединенный к другому.

*** Метасоматизм — явление изменения общего химического состава тела вследствие замещения одних минералов горной породы другими. Такой процесс может закончиться даже образованием мономинеральных пород.

§ 22. Пределы содержания гравия (щебня) в бетоне

Гравий — обломки горных пород различной формы и степени окатанности. Содержание гравия (щебня) в бетоне зависит от ряда условий, среди которых одним из решающих является его пустотность и, следовательно соотношение количества гравия (щебня) и песка. Верхним пределом содержания гравия будет 1 м^3 крупного каменного материала в 1 м^3 бетона. Бетон с таким содержанием гравия (щебня) можно получить при отдельных методах бетонирования, т. е. соединении растворной части с крупным каменным материалом в опалубке. В тех случаях, когда для бетонных работ приходится завозить крупный каменный материал, а непосредственно на месте имеется качественный песок, при подборе состава бетона стремятся увеличить содержание песка за счет снижения количества гравия (щебня).

Щебень значительно дороже песка, поэтому стараются подобрать состав бетона с высоким коэффициентом r , что всегда связано с некоторым увеличением расхода цемента. При наиболее высоком значении r это будет нижний предел содержания гравия (щебня) в бетоне. В табл. IV.1 приведены пределы содержания гравия (щебня) для различных составов бетона, обоснование числовых значений которых дано в § 41. Еще в работе проф. И. Г. Малюгин (1890—1895) «Состав и способ приготовления цементного раствора (бетона) для получения наибольшей крепости» особое внимание уделялось соотношению компонентов бетона и технологии бетонных работ. При этом учитывалось не только получение искусственного технического камня с максимально возможной «крепостью и плотностью», но и производительность и экономичность принятого состава смеси. Сказанное относится к крупному каменному заполнителю, в полной мере отвечающему требованиям ГОСТ 8268—62. Отметим, что еще встречаются случаи использования природной смеси рыхлых каменных материалов, вызывающие значительную неоднородность бетона и перерасход цемента.

§ 23. Гравийно-песчаная смесь и гравий

Недостатки в использовании природных смесей вызваны их неоднородностью — разным содержанием гравия и песка, зернового состава и пустотности. В гравийно-песчаной смеси очень часто имеется галька и булыга.

Отмечается значительное колебание зернового и минералогического составов гравия. Так, в одном из карьеров на различных его участках зерновой состав гравия после отсева песка колебался для разных фракций в следующем интервале числовых значений: для фракции более 80 мм — от 5 до 13,7%; для 40—80 мм от 15,3 до 17%; для 25—40 мм — от 17 до 17,3%; для 5—25 мм — от 52,3

до 62,5%. Модуль крупности указанных проб гравия составляет 7,1—8,28 при средних значениях: объемной массы 1630 г/л, плотности 2,63, объема пустот 37,6%. При рассмотрении мелкого заполнителя отмечалось колебание в содержании песка, гравия, гальки и булыги в месторождениях различного генезиса. Однако даже для одного и того же песка и гравия изменение зерновых составов вызывает исключительно большое различие в объемной массе (от 1730 до 2500 г/см³) и объеме пустот в их смеси (от 16 до 26%).

В ГОСТ 8268—62 сказано, что гравий получается рассевом природных песчано-гравийных смесей. По ГОСТу гравием считаются зерна размером 5—70 мм; при этом по ряду условий, связанных с производством гидротехнических работ, допускается и более крупный гравий, что видно из ГОСТ 4797—64. Действительно, гидротехнические сооружения имеют большие размеры, при которых необходимо применять гравий (щебень) крупностью, значительно превышающей 70 мм,— фракции 80—120 мм, а в ряде случаев еще больших размеров. При этом для обеспечения стабильности зернового состава рекомендуется фракционировать гравий (щебень) следующим образом:

Максимальная крупность, мм	Фракции, мм
20	5—10 и 10—20
40	5—10, 10—20 и 20—40
80	5—10, 10—20, 20—40 и 40—80
120	5—10, 10—20, 20—40, 40—80 и 80—120

Эти рекомендации не отличаются от требований ГОСТ 8268—62, в котором ограничивается лишь максимальный размер гравия — 70 мм; дано указание о порядке визуального установления числа и размеров фракций с учетом условий производства работ, транспортирования и хранения. Наличие сепарации крупного заполнителя по фракциям — признак, который требует пересмотра решения о выборе числа и вида фракций, а также пересмотра способов транспортирования и хранения крупного заполнителя. В этом же ГОСТе формулируются очень важные условия для назначения зернового состава экспериментальным путем по показателям наибольшей плотности заполнителей и объемной массе. В табл. IV.1 приведены показатели гравия ряда подмосковных карьеров.

Выше было отмечено, что иногда применяется заполнитель крупностью 120 мм и выше. В этом случае особое значение имеет ранее сказанное о сепарации фракций крупного заполнителя и приемах его введения в бетонную смесь, так как перемешивание такого крупного материала в бетоносмесителях может вызвать их поломку.

Для снижения стоимости бетонных работ особое значение имеет использование каменных материалов в точном соответствии с зонами работы конструкции (сооружения). Этот прием значительно расширяет возможность использования крупного каменного мате-

Таблица IV.1

Карьер гравия	Характеристика гравия			
	Объемная масса, кг/л	Плотность, кг/л	Объем пустот, %	Модуль крупности
Татаровский	1,53	2,55	40,0	7,9
Горицкий	1,54	2,60	40,0	7,6
Ивантеевский	1,56	2,61	39,0	7,4
Таборский	1,59	2,63	40,0	7,6
Строгинский	1,61	2,63	39,0	7,2
Гурбан	1,64	2,64	37,7	7,4
Сандовский	1,65	2,65	37,7	7,3

Примечание. Петрографический состав гравия в указанных месторождениях разнообразен и по набору пород аналогичен составу, приведенному в тексте.

риала с разнообразными техническими свойствами (в том числе с низкой морозостойкостью, относительно невысокой прочностью, высокими истираемостью и водопоглощением и т. д.).

В ряде случаев бетонную смесь целесообразно приготавливать на заполнителе стандартных размеров и в объем бетонированного объекта отдельно вводить крупный каменный материал, названный «изюмом». Такой способ бетонирования эффективен, так как уменьшается объем дробления каменных материалов, а также снижается расход цемента. Крупного камня в среднем может быть 25—30% от объема бетонной кладки. Технические требования к крупному камню аналогичны требованиям к крупному заполнителю.

При выборе камня руководствуются техническими требованиями, вытекающими из условий проектирования конструкций (сооружений) и бетона для них. Там, где бетон не будет подвергаться агрессивным физическим и химическим воздействиям, выбор камня обоснован только требованиями к прочности. Естественно, при выборе камня должны учитываться все требования ГОСТа, касающиеся чистоты кусков камня, содержания примесей, выветренной поверхности кусков.

Особое внимание нужно уделять использованию крупного каменного материала при производстве зимних бетонных работ. Недопустимо укладывать в бетонную смесь камень, на поверхности которого находится слой льда, из-за чего между поверхностью камня и цементным камнем контакт резко ухудшается.

§ 24. Щебень

Щебень — рыхлая горная или техническая порода в виде кусков неправильной формы. Щебень образуется в результате выветривания горных пород (естественным путем), а также при разрушении технических пород вследствие химических процессов, например в шлаковых отвалах тех металлургических производств, где шлак не гранулируется. Однако в большинстве случаев щебень по-

лучают путем дробления как горных, так и технических пород. Технические требования к щебню нормируются соответствующим ГОСТ 8267—64, в который включены все технические требования к щебню, гравию, щебню из гравия и к песку из горных пород, используемым как крупный и мелкий заполнители в любых бетонных и железобетонных конструкциях (сооружениях), независимо от назначения и технологии изготовления. Надо учитывать, что для приготовления щебня не следует стремиться к использованию пород с такими прочностями, которые не диктуются свойствами бетона. Как мягкие горные породы с низкой прочностью, так и породы с высокой прочностью для подавляющего большинства случаев не представляют практического интереса. Это положение недостаточно полно отражено в соответствующих ГОСТах (см. § 34). От формы зерен щебня зависит его сцепление с цементным камнем, что учтено в формуле расчета прочности (см. § 41) и отражено в ряде специальных технических условий для конструкций (сооружений), где этот показатель имеет решающее значение.

Качество щебня во многом зависит от условий его приготовления, что отражено в технических требованиях (чистота поверхности, отсутствие примесей, форма, пустотность в уплотненном состоянии, максимальная крупность, количество щебня и его размеры). Опыт показывает, что при прочих равных условиях тип дробилок оказывает решающее влияние на некоторые из перечисленных показателей, а именно: на форму щебня, максимальный размер, пустотность щебеночной смеси, на выход щебня, его фракционность. Например, от изменения зазора между подвижной и неподвижной челюстями в одной из конструкций дробилок значительно меняется зерновой состав щебня (табл. IV.2).

Т а б л и ц а IV.2

Состав щебня	Частные остатки, %, при размере отверстий сит, мм						
	80	40	20	10	5	2,5	1,2
1	7,7	51,9	25,6	10,3	3,8	0,25	0,27
2	—	16,4	57,1	17,1	8,0	0,3	0,1

П р и м е ч а н и е. Более мелких частиц, чем 1,2 мм при дроблении горной породы может содержаться до 15%. Они названы высевками.

Следовательно, необходимо регулярно анализировать качество дробления и корректировать работу дробилок. На их производительность и качество щебня влияет величина загружаемых кусков породы; такие куски называют габаритным материалом. Негабаритные куски предварительно нужно размельчить, что производится разными приемами (с помощью накладных зарядов, закладки зарядов в пробуренные в камне отверстия).

При назначении технологических схем дробления природных или технических пород следует учитывать требования к составу

бетона, касающиеся фракционирования щебня или дробления пород без последующего фракционирования. Для приготовления мелкозернистого щебня и искусственного песка применяют многостадийное дробление.

Для получения щебня проектного зернового состава строят количественные схемы дробления [44, 18], что в основном связано с шириной выходной щели дробилок. Естественно, что износ рифления плит, производящих раздавливание кусков, связан не только с прочностью (твердостью) камня, но и с качеством металла. Износ приводит к увеличению выходного отверстия и к изменению зернового состава щебня.

Опыт показывает, что эффект дробления получается при использовании дробилок, работающих по принципу удара (без использования сил раздавливания, раскалывания с раздавливанием). В этом случае отсутствуют зерна неправильной формы (иглообразные удлинённые или плоские, лещадные). Выбору дробилок должен предшествовать анализ петрографического состава горных и технических пород, процесс формирования [17, 33, 55, 56]. Раскалывание наиболее эффективно для дробления хрупких пород с высоким модулем упругости (например, габбро, кварциты); раздавливание — обжатие кусков камня для дробления вязких пород (например, песчаники, известняки). Широкое применение щековых дробилок — следствие их надежности при эксплуатации и простоты обслуживания. Кроме дробилок стационарного действия широко применяют передвижные дробильно-сортировочные установки ПДСУ.

Камнедробильные заводы состоят из цехов дробления и отсева щебня на виброгрохотах. Технологические процессы дробления и отсева связаны между собой непрерывным транспортом и должны иметь сложные устройства и соответствующие питатели.

Пустотность щебня колеблется в большом интервале, примерно от 37 до 52%. При этом надо иметь в виду, что щебень одного зернового состава может значительно отличаться по величине пустотности. Вид дробления оказывает решающее влияние на форму и размер щебня, на его выход (на количество высевок, получаемых при дроблении).

§ 25. Генезис гравийно-песчаных материалов

Гравийно-песчаными называются месторождения рыхлых материалов, в которых преобладают гравийные зерна. В табл. IV.3 приведены сведения по 10 месторождениям гравийно-песчаных смесей, которые являются типичными для многих месторождений, что объясняется общей для них флювиогляциальной природой (при близком расположении последних).

Надо помнить, что качество рыхлых пород, поступивших на завод, очень неоднородно, поэтому необходимо производить предварительную обработку их — обогащение. Сказанное имеет значе-

Таблица IV.3

№ п.п.	Карьер	Модуль крупности	Объемная масса, т/см ³	Плотность, т/см ³ *	Объем пустот, %	Загрязненность, %	Содержание известняка, %	Примечание
1	Сухаринская коса	8,0—8,16	1,51—1,64	2,63—2,66	38—40	0—0,7	13—32	Пригоден для всех зон
2	Никольская коса (левый берег р. Волги)	6,56—8,10	1,60—1,72	2,56—2,63	34,6—38,7	0,8—8,2	10—40	После тщательной промывки пригоден для зон, где нет совместного действия воды и мороза
3	Курган Топорок	7,34—7,86	1,56—1,62	2,55—2,63	38,8—39,5	0,8—2,4	27—57	Необходим отбор змеювика и желтая, промывка гравия, после чего пригоден для зон, где нет совместного действия воды и мороза
4	Борисовский	7,75—7,99	1,56—1,78	2,54—2,62	35—40	0,3—1,0	7—53	
5	Игнатовская гора	6,10—8,70	До 1,60	До 2,60	До 40	1,7—6,5	0—20	Значительные загрязнения, требующие промывки гравия и отбора булыги, которой содержится до 20 %. Чистый гравий пригоден для всех зон

6	Речича	До 6,81	» 1,52	» 2,16	» 46,7	0,5—1,6	23—49	То же, что для п. 5, а также отбор змеевика и желтака. Чистый гравий с отбором слабых зерен пригоден для всех зон.
7	Поталово	7,27—8,49	1,42—1,63	2,50—2,63	38—43	0,4—3,5	15—37	После тщательной промывки пригоден для зон, где нет совместного действия воды и мороза
8	Нагатино	До 7,20	До 1,54	До 2,60	До 40,1	0—40	20—39	То же, что для п. 6 и 7 После отделения булыг и зерен змеевика и тщательной промывки пригоден для зон, где нет совместного действия воды и мороза
9	Минеево	» 7,75	» 1,60	» 2,61	» 38,0	0,4—5,6	20—63	
10	Влахернский	» 7,23	» 1,70	» 2,63	» 35,4	0—5,0	13—65	После отбора фракций песка, булыг, желтака и змеевика и промывки пригоден для зон, где нет совместного действия воды и мороза

ние не только для составления технических условий на гравийный материал, но и для проекта разработки месторождений и обогащения гравия.

Ранее гравий, щебень и песок относили к инертным материалам, считая, что для производства работ имеет значение только физическая сторона вопроса без учета петрографического состава. Однако необходимо учитывать генезис этих материалов. Для гравия и песка это в основном речные или флювиогляциальные образования. Действие воды в таких отложениях обеспечивает небольшое количество глинистых примесей, отсутствие сортировки по зерновому составу (наличие различных фракций гравия, песка, булыг, гальки, валунов), зерен с прочностью, достаточной для приготовления бетонов с марками прочности, широко используемыми в строительстве.

В речных месторождениях гравия (например, на р. Каме) отмечено ежегодное перемещение залежей и отсутствие в массе гравия зерен крупных фракций, что затрудняет количественный и качественный прогноз таких мест добычи крупного заполнителя (средний выход гравия ниже 50% и различен по слоям, например в одном из карьеров он колеблется от 12 до 43%).

Для оценки качества гравийного материала надо правильно отобрать представительную пробу, которая позволит оценить качество гравия во всем объеме месторождения. Пробы отбирают из скважин и шурфов, заранее разбитых на местности по контуру месторождения, а также из других мест (например, кроме контурных скважин отбирают пробы из скважин, расположенных по оси месторождения). Расстояние между скважинами устанавливает геологическая служба по признакам, связанным с генезисом рыхлых отложений. Примерные расстояния между скважинами составляют 100—200 м.

Учитывая назначение гравия, определяют виды его испытания и, следовательно, величину пробы. Кроме определения качества гравия при изыскании месторождений подобные испытания должны осуществляться при добыче и отгрузке гравия потребителю, перед изготовлением бетонной смеси. Такие испытания в соответствии с целью их проведения принято именовать геолого-разведочными и технологическими. По существу самого испытания качество материалов получается одинаковое.

Как песок, так и гравий принято оценивать не только по зерновому составу, максимальной крупности зерна, пустотности, прочности (по дробимости в цилиндре) или по износу в барабане, наличию слабых, размокаемых или неморозостойких зерен, но и по наименованию наиболее представительных пород, из которых состоят его зерна; например, гравий смешанного петрографического состава с зернами изверженных и карбонатных пород или с преобладанием зерен карбонатных пород и т. д. Производя разборку пробы гравийного материала и используя соляную кислоту, удается определить процентное содержание карбонатных зерен, при анализе истираемости пробы в барабане удается определить прочность

зерен. Сочетая результаты обоих определений и визуальный осмотр зерен пробы, можно судить о целесообразности испытаний гравия на морозостойкость.

§ 26. Петрографический состав гравия (щебня)

Гравий и щебень из отдельных горных пород за исключением щебня, получаемого дроблением гальки и булыги, имеют различные минералогические составы. В качестве характерного примера большого разнообразия петрографического состава гравия может служить гравий Московской области. Различие в петрографическом составе гравия имеет прямое отношение к области его применения, что видно из табл. IV.4.

Т а б л и ц а IV.4

№ п.п.	Петрографический состав	Содержание в гравии, %	Качество гравия
1	Гранит	9,5—14,5	Прочные зерна, обеспечивают высокое качество бетона
2	Диабаз	1,3—1,4	То же
3	Кварцевый сланец *	0,4	Неморозостойкие и непрочные зерна
4	Кварцит	6,5—17,4	Прочные зерна, снижают водонепроницаемость бетона
5	Амфиболит	0,4—1,7	Прочные зерна
6	Кремень	9,9—16,5	Прочные зерна, снижают водонепроницаемость бетона
7	Песчаник	3,5—4,7	Зерна разной прочности, снижают водонепроницаемость бетона
8	Желтый известняк *	7,2—17,3	Неморозостойкие и непрочные зерна
9	Глинистый сланец *	6,6	То же
10	Бурый железняк *	0,2—0,4	»
11	Окрашенный известняк *	7,4—14,5	»
12	Плотный известняк *	12,2—17,1	Прочные зерна, обеспечивают высокое качество бетону
13	Пористый известняк *	8,6—21,8	Неморозостойкие и непрочные зерна
14	Слюдистый сланец *	0,7—2,0	То же

* Породы, резко снижающие ряд технических свойств бетона, например морозостойкость.

Как видно из табл. IV.4, различные по генезису зерна гравия по-разному влияют на технические свойства смеси и бетона. Так, желтый известняк и другие аналогичные ему известняки резко повышают водопотребность бетонной смеси из-за увеличения пористости каменного материала. Многочисленные опыты показывают, что некоторые каменные материалы, указанные в

табл. IV.4, резко снижают качество бетонной смеси, влияя на повышение содержания в ней воды, а также технические свойства бетона.

Из рис. IV.1, IV.2 и IV.3 видно, как изменяется осадка конуса бетонной смеси в зависимости от изменения ряда составляющих бетонной смеси. Так, при содержании в гравии только твердых пород осадка конуса составляет 4,5—11 см (по мере увеличения

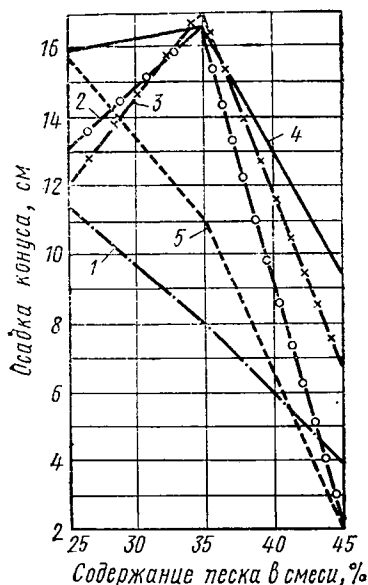


Рис. IV.1. Зависимость осадки конуса от зернового состава гравия:

1 — зерновой состав I; 2 — зерновой состав II; 3 — зерновой состав III; 4 — зерновой состав по измененной кривой Фуллера; 5 — прерывистый зерновой состав

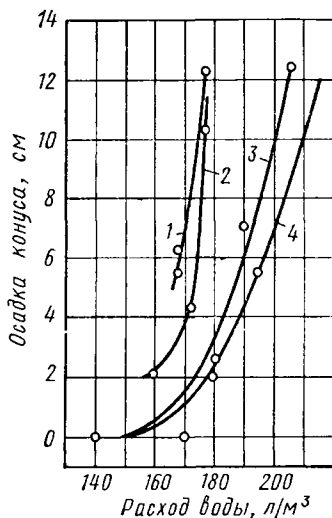


Рис. IV.2. Зависимость осадки конуса от содержания воды для разных видов цемента:

1 — глиноземистый цемент с расходом 250 кг на 1 м³ бетона (50% габбро+50% диабаз); 2 — портландцемент — 250 кг/м³; 3 — пуццолановый портландцемент — 280 кг/м³ (70%+30%); 4 — трехкомпонентный цемент — 300 кг/м³ (150%+75%+75%)

крупности — уменьшения поверхности смачивания зерен — требуется меньше воды на ее смачивание и, следовательно, повышается содержание воды в цементном тесте — оно становится пластичнее). По мере увеличения содержания зерен карбонатных пород осадка конуса уменьшается, доходя до 0,5—1 см для 100% зерен карбонатных пород в смеси, независимо от размера зерен.

Из рис. IV.4 видна зависимость расхода цементной суспензии от крупности зерен гравия. Увеличение водопоглощения щебня влияет на изменение осадки конуса бетонной смеси, приготовленной на крупном заполнителе из карбонатных пород месторождений Самарской луки на р. Волге. При одном составе бетонной смеси на щебне карбонатных пород с водопоглощением в пре-

делах 1% осадка конуса выше 16 см, а с водопоглощением около 8% осадка конуса близка к 0,5 см. Следовательно, выясняя петрографический состав камня, необходимо определять и другие показатели, в первую очередь водопоглощение.

Для ускоренного определения морозостойкости карбонатных пород с различной пористостью водонасыщение определяют при форвакууме [51]. При этом удается оценить морозостойкость за несколько циклов испытания. При длительном испытании бетона на морозостойкость фиксируют начало разрушения образцов по зернам гравия из пород, отмеченных в табл. IV.4, и характер контакта с поверхностью зерен различных пород. Так,

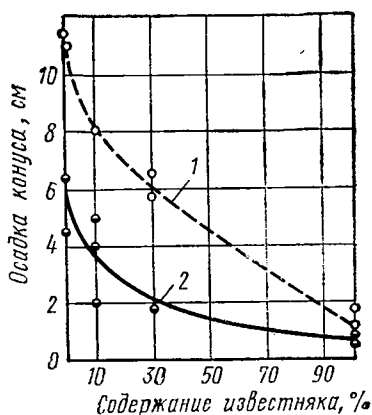


Рис. IV.3. Зависимость осадки конуса от содержания влагоемких зерен гравия:

1 — с наибольшей крупностью 35 мм;
2 — то же 20 мм

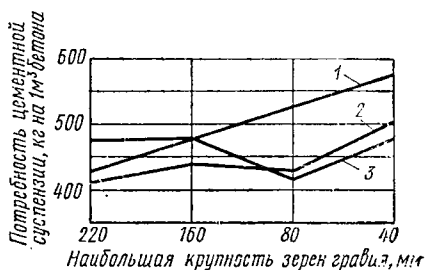


Рис. IV.4. Зависимость расхода цементной суспензии от крупности зерен гравия:

1 — 20% крупной фракции; 2 — 50% крупной фракции; 3 — прерывистый зерновой состав

если после разрушения образца гравий из гранита, кварца, кварцита, диабазы и других плотных и прочных пород не имеет внешних признаков потери сплошности, а гравий из кремния и слюдистого сланца частично разрушен, то примерно 80—85% гравия карбонатных пород (№ 8, 10, 11, 12 и 13) * резко изменилось и находится на разной стадии разрушения (от наличия трещин и до полного размокания). В указанном образце имеется около 55% гравия карбонатных пород по отношению к другим породам в гравийно-песчаных месторождениях флювиогляциального и древнеаллювиального образования.

При испытании морозостойкости бетона отмечают, что основная масса раствора легко отделялась от зерен гравия изверженных пород и имела хорошее сцепление с карбонатными зернами. Это обстоятельство служит дополнительным подтверждением высокой пористости большинства зерен карбонатных пород. Действительно, при приготовлении бетонной смеси применялись сухие каменные

* В карбонатных породах содержится 12,2—17,1% зерен (№ 12) плотного известняка, составляющих часть неразрушенных карбонатных зерен.

материалы, что привело к миграции части воды из раствора в массу таких влагоемких зерен, к уменьшению содержания воды и намоканию гравия * в растворной части бетона в этих местах.

Отслаивание от раствора зерен плотных пород является следствием наличия воды между частью их поверхности и раствором. Эта вода отслаивается от твердеющего цементного теста в процессе гидролиза и гидратации (см. § 37, 50, 66). При ускоренных методах твердения бетона с резким подъемом температуры среды во время испытаний образцов (изделий) обнаруживается этот дефект — наличие отслоенной воды. Приведенный пример разрушения бетона из-за наличия в нем зерен неплотных карбонатных пород с высоким водопоглощением не является основанием для того, чтобы отказаться от использования бетонов высоких марок и карбонатных пород в конструкциях (сооружениях), подверженных попеременному многократному воздействию воды, замораживанию и оттаиванию.

В ряде случаев бытует неверное представление о нецелесообразности широкого использования щебня из крупного карбонатного каменного материала в виду его якобы худших технических свойств. Можно привести примеры низкого качества бетона, приготовленного на гранитном щебне невысокого качества. Следовательно, определяя возможность использования гравия или приготовления щебня, решение вопроса связывают не с названием материала, а с оценкой его технических свойств и условиями его работы

Таблица IV.5

Карьеры гравия	Содержание пород, %				
	плотных твердых кварцитов	кремния и песчаников	карбонат- ных	слабых	разрушен- ных
Влахернский	28,2	21,2	45,5	3,2	1,9
Минеевский	65,6	12,6	17,3	2,2	2,3
Ногатинский	60,0	30,0	10,0	—	—
Орудьевский	60,7	11,2	24,5	1,6	2,0
Таборский	33,1	10,5	50,3	4,5	1,6

по зонам конструкций (сооружений). В табл. IV.5 приведены петрографические составы гравия ряда карьеров Московской области для иллюстрации их пестроты, что показывает на необходимость анализа перед назначением каменных материалов.

По результатам петрографической разборки, например, гравий Ногатинского карьера можно использовать даже в зонах, подверженных многократному замораживанию и оттаиванию. Опыты по определению морозостойкости каменных материалов подтверждают возможность прямой связи их петрографического состава с моро-

* Следует учитывать также и высокую степень адгезии камня из портланд-цемента к поверхности карбонатных пород.

Таблица IV.6

№ п.п.	Породы	Верхний предел прочности при сжатии, кг/см ² (10 ⁻¹ МПа)	Объемная масса, г/см ³	Кажущаяся минимальная или открытая пористость, % по объему
1	Базальты	4500	2,70—3,30	—
2	Кварциты	4200	2,63—2,65	0,37
3	Порфиры кварцевые	4090	2,52—2,65	1,47
4	Габбро	3500	3,13	0,22
5	Граниты	3400	2,61—2,64	0,45
6	Диабазы	3330	3,00	0,18
7	Доломиты	3000	2,28—2,70	6,00
8	Известняки	2500	1,97—2,79	0,36
9	Песчаники	2700	2,42	2,90
10	Диориты	2360	2,81	1,46
11	Туфы и туфобрекчии	1620	2,35—2,62	4,72
12	Мраморы	3300	2,7—2,83	0,59

зостойкостью и другими техническими свойствами (см. § 31, 32 — 34). Независимо от петрографического состава использование каменного материала без дополнительного дробления в ряде случаев ограничивается условиями работы конструкций из бетона (железобетона) в силу относительно меньшей прочности такого бетона при действии изгибающих нагрузок. Решающее значение для разных технических свойств бетона имеет состояние поверхности щебня. В табл. IV.6 указана прочность ряда горных пород.

В зависимости от адгезионных связей цементного камня с поверхностью зерен щебня будут изменяться прочность, водонепроницаемость и другие свойства бетона. Если некоторые свойства бетона (например, водонепроницаемость в перекрытиях помещений) прямым образом не влияют на работу бетона, то их не учитывают. Однако несомненно, что снижение водонепроницаемости бетона на щебне с пониженной адгезией связано с другими свойствами бетона (например, с прочностью), что потребует подбора состава бетона с повышенным расходом цемента.

В ряде случаев отсутствие выбора каменных материалов, способствующих минимальному расходу цемента, диктует технико-экономическую необходимость использования таких материалов, которые обеспечивают требования проекта. В табл. IV.7 приведены сведения о ряде крупных карьеров со значительными запасами каменных материалов, обеспечивающих длительную стабильную работу предприятий. Отметим, что некоторые из эксплуатируемых месторождений широко представлены гранитами, гранито-гнейсами, гранитоидами, диабазами, диоритами, габбро, базальтами, менее распространенными — андезитами, порфиритами и некоторыми другими породами. Карбонатные породы, пригодные для приготовления щебня, также распределены неравномерно на территории страны. Выбор карбонатных пород для дробления затрудняется в силу значительной неравномерности их качества по отдельным слоям месторождений. Естественно, что в случае разработки

Таблица IV.7

№ п.п.	Гравий месторождения	Зерновой состав, мм	Объемная масса, г/см ³	Водопоглощение, %	Содержание пыли и глины, %	Содержание пластинчатых зерен, %	Дробимость		Износ в половом барабане, %	Морозостойкость, циклы
							%	марка		
1	Мензелинского	5—10 10—20 20—40	1680	1,8 1,0 0,6	—	До 5	7,5 11,6 9,4	8 12 12	22,9 22,5 —	50 200 —
2	То же, дробленый	5—10 10—20	1537	1,3 0,8	—	» 15	4,9 3,6	8 8	— —	— —
3	Тарловского	5—10 10—20	1600	2,2 1,6	0,52	» 5	2,6 7,2	8 8	22,0 20,8	200 50
4	То же, дробленый	5—10 10—20	1489	1,6 1,3	До 0,5	» 15	2,9 4,5	8 8	— —	— —
5	Нижнечусовского	5—10 10—20 20—40	1816	1,6 1,2 0,7	2,1	—	4,3 6,3 10,2	— — —	25,2 27,2 —	25 150 150
6	То же, дробленый	5—10 10—20	1587	2,1 1,2	4,5	До 14	10,9 7,1	12 8	28,4 29,3	25 150
		5—10 10—20	1526	2,2 1,1	—	» 15	7,0 5,8	8 8	— —	— —
7	Бельского	5—10 10—20 20—40	1715	4,7 4,6 3,6	0,2	» 5	3,6 5,1 11,0	8 8 12	20,5 21,9 —	15 100 100

месторождений с неоднородным каменным материалом требуется селективная (выборочная) система добычи, несмотря на известные сложности ее применения.

Как известно, скопления гравийно-песчаных масс, имеющих практический интерес для открытия карьеров, кроме рассмотренных отложений ледникового происхождения (моренного и флювиогляциального) связаны с разрывом обломков горных пород водными потоками в горах, разрывом горных пород морскими прибойми. Сепарация рыхлых материалов проходит по течению водных горных потоков постепенно. В уступах и у подножья террас в гравийно-песчаной массе преобладают крупные частицы (булыга, галька), а в долинах рек — песчаная фракция.

На территориях, удаленных от указанных районов (в том числе от сферы действия ледников), нет гравийно-песчаных отложений с галькой и булыгой (в СССР к таким районам относятся Западная Сибирь, южная часть европейской России). Естественно, что и петрографический состав гравия различных районов неодинаков и представлен многообразием горных пород: карбонатными разного

состава и качества (известняками и доломитами), кварцем, песчаниками, диабазами, гранитами и гранитоидами, сланцами, гнейсами и др. Часть указанных пород представлена в табл. IV.8, где приведены данные лаборатории каменных материалов СоюзДорНИИ.

Гравий указанных месторождений используется в строительстве. В частности, на строительство КамАЗа широко применяется гравий Сидоровского месторождения. В нем содержатся зерна преимущественно кремня, песчаников и в меньшем количестве карбонатных пород и порфиритов. Зерна гравия имеют гладкую окатанную поверхность, и в его составе преобладают фракции 5—20 мм при незначительном количестве фракций 20—40 мм; водопоглощение гравия—1,2%. На этом гравии приготавливают бетоны до М 300.

Анализируя табл. IV.6 и IV.8, можно отметить, что:

1) в бассейн р. Камы попадают гравийно-песчаные отложения весьма широкого петрографического состава, меняющегося на разных участках;

2) в одном месторождении зерна рыхлого материала для пород № 1, 3, 5, 6 (табл. IV.8) представлены примерно одним и тем же петрографическим составом;

3) дробление гальки № 1 и 2, 3 и 4, 5 и 6 приводит к уменьшению объемной массы—увеличению пустотности получаемого щебня (см. табл. IV.7);

Таблица IV.8

№ п.п.	Месторождение	Содержание пород и минералов, %								
		кварца	кварцита	метаморфических песчаников	метаморфических кремнистых пород	окремненных пород	гидротермально-окварцованных пород	карбонатных пород	изверженных пород	прочих пород
1	Нижнечусовское *	16,3	1,8	58,8	12,1	4,1	4,8	1,4	0,7	—
2	Нижнечусовское	15,7	0,3	53,0	13,2	7,4	9,0	0,8	0,5	0,1
3	Тарловское **	7,5	—	18,2	40,0	11,7	22,6	—	—	—
4	Мензелинское	6,0	—	40,9	17,6	9,2	17,2	3,3	5,8	—
5	Тарловское	5,3	—	24,9	40,2	9,3	16,9	0,3	3,1	—
6	Бельское	2,1	—	7,8	13,2	60,4	12,0	4,3	0,5	—

* Месторождение щебня, полученного из крупных зерен песчано-гравийных отложений.

** Месторождение песка.

4) в ряде указанных месторождений гравия по р. Каме содержатся реакционноспособные зерна (см. § 33);

5) петрографический состав гравия влияет на водопоглощение, морозостойкость, прочность (износ в барабане и дробимость) его отдельных зерен;

6) гравийные массы чистые, что связано с их генезисом;

7) гравий содержит подавляющее количество фракций мельче

40 мм и до 15% зерен пластинчатой формы после дробления крупных зерен гравия.

Анализ гравия различных районов страны, приведенный в работах [9, 22, 56], подтверждает сказанное об исключительно большом разнообразии его показателей.

Различие в стандартных показателях качества гравия ледникового образования и гравия по долинам рек показывает, насколько они различны, что надо всегда помнить при разведке месторождений, их добыче и использовании.

§ 27. Форма и поверхность зерен гравия (щебня)

Степень заполнения объема или пустотность рыхлых, а также уплотненных смесей песка, гравия и щебня зависят от формы их зерен, что легко показать на шарах с последовательно изменяющимся диаметром. В этом случае можно достичь укладки щебня или гравия до объема с 20% пустот. Надо отметить искусственность уплотнения рыхлых материалов до указанного объема по той причине, что достичь такую раскладку можно только при составлении смеси из шаров строго определенных диаметров и расположении каждого шара в строго определенном месте заполняемого объема. При ином соотношении диаметров и числа шаров пустотность резко возрастает из-за раздвижки больших шаров и может достигать 60—65%, чего не бывает, если смеси подбирать из зерен гравия и щебня, всегда различных по размеру и форме. Низкие показатели пустотности крупного заполнителя можно получить, смешивая гравий и щебень. В ряде стран существует классификация зерен крупного заполнителя по форме зерен (табл. IV.9).

Генезис гравия сказывается не только на форме, но и на виде его поверхности. У окатанных зерен достаточно гладкая, а в ряде случаев почти шлифованная поверхность, у зерен щебня поверхность различной шероховатости, что связано с генезисом горной породы (например, зерна могут быть гладкие или шероховатые, глянцевые или матовые, плотные или пористые и иных сочетаний). Генезис горной породы предопределяет качество зерен по твердости, плотности (пористости), крупности зерен для зернистых пород. В табл. IV.10 приведены некоторые сведения по текстуре поверхности зерен заполнителей. Эти данные достаточно общие и дают чисто качественную оценку поверхности зерен без учета их влагопоглощения и количественных характеристик по адгезии цементного камня с крупным заполнителем, в том числе связанных не только с прочностью, но и с показателями водонепроницаемости, ползучести, морозостойкости бетонов. Приведенные таблицы показывают несовершенство их построения в силу неправильной оценки качества бетона, которое нельзя оценивать изолированно от технических свойств бетона, только по отдельным свойствам.

Для выявления роли формы щебня в Центральной бетонной лаборатории строительства Куйбышевского гидроузла (1939—1940) были поставлены опыты на щебне из песчаника (с опаловым це-

ментом в нем). Песчаник отличался хрупкостью и имел поверхность со стекловатой текстурой. Такая структура породы повлияла на образование около 40% зерен лещадной формы.

Средние значения показателей свойств песчаника следующие: предел прочности при сжатии образцов в воздушно-сухом состоянии 2000 кГ/см² (10⁻¹ МПа), объемная масса 2,28 г/см³, плотность

Таблица IV.9

Форма зерен	Внешний вид зерен	Примечание
Игловатая и пластинчатая (лещадная)	Длина значительно больше других размеров, толщина значительно меньше ширины, а ширина меньше длины	Как правило, такие зерна — результат дробления горных пород.
Пластинчатая (лещадная)	То же	Встречаются такие зерна и в гравии
Угловатая	Четкое очертание зерна по ребрам	Зерна горной (слоистой) породы
Окатанная и неправильная	Горные породы различного генезиса, что обеспечивает неодинаковые размеры и форму зерен	Щебень разных горных пород (в том числе из отвалного шлака) Окатанная форма типична для речного, морского и других видов гравия, подвергавшегося механическому истиранию

Таблица IV.10

Текстура поверхности зерен крупного заполнителя	Визуальная характеристика поверхности	Наименование исходной породы
Пористая и ячеистая	Хорошо различимые поры и раковины	Туф, шлаковая пемза, керамзит, кирпич (из глины), вулканический пепел, некоторые сорта клинкера
Стекловатая (лещеная)	Неровная поверхность с раковинами	Стекловидный шлак (литье), некоторые виды песчаника, доломитов, мрамора, кварцита, кремния
Кристаллическая	Легко различимые кристаллические минеральные компоненты	Габбро, граниты, гнейсы и др.
Гладкая	Кристаллические образования мелкие, не видимые без увеличения	Кремнистые известняки и доломиты, некоторые сорта мрамора, зерна гравия и др.
Шероховатая	Плохо различимые кристаллические включения в мелко- и среднезернистых горных породах	Известняк, доломитизированный известняк, базальт, порфиры
Зернистая	Относительно однородные округленные зерна	Песчаник, оолитовый известняк

2,40 г/см³, пористость 5,3%, водопоглощение 1,56%, модуль упругости образцов в воздушно-сухом состоянии — 50 000 кг/см² (10⁻¹ МПа).

Для изготовления бетона был использован полиминеральный песок флювиогляциального генезиса с $M_k=2,83$ и 36,3% пустот, среднеалюминатный портландцемент М500. Влияние формы щебня определялось по нескольким характеристикам: объемной массе сухой смеси зерен при двух условиях укладки (в рыхлом состоянии и при уплотнении штыкованием); объему пустот при этих же условиях; количеству зерен разной формы в единице объема; пластичности смесей одинакового состава; времени распределения бетонной смеси в форме при ее уплотнении; прочности бетона и его объемной массе. За эталон был принят бетон на щебне без отбора от него каких-либо фракций состава: 300 кг цемента, 183 л воды, 643 кг песка, 1081 кг щебня; за эталонную пластичность принята осадка конуса 4—6 см. С эталонной смесью крупного заполнителя сравнивали две смеси, которые формовались путем ручного отбора от щебня (аналога эталонному составу) только зерен, близких к кубической форме, и лещадной формы (отношение длины к толщине было 3:1). Каждая такая смесь состояла из четырех фракций:

Фракция, мм	%
5—10	20
10—20	20
20—40	30
40—60	30

Эти опыты (табл. IV.11) показали, что без уплотнения и с уплотнением из щебня кубической формы получены смеси с большей объемной массой, следовательно, с меньшим объемом пустот; при этом объем пустот составляет 32,7% для уплотненной смеси с зернами, близкими к кубической форме, и 37,6% для зерен лещадной формы *. В одних и тех же объемах примерно на 50% больше щебня лещадной формы, что показывает на большую удельную поверхность такого щебня и на лучший контакт с цементным камнем, эффект от которого снижается из-за отслоения воды.

Форма щебня оказывает значительное влияние на пластичность-жесткость бетонной смеси, фиксируемую не только по осадке конуса (примерно 11,5 см против 4—6 см у эталонной смеси и ниже 1 см у смеси на щебне лещадной формы), но и по расслоению смеси на всех технологических переделах (при подаче смеси из бетоносмесителя в бункер, транспортировании, распределении в местах уплотнения и формования). Сказанное фиксируется и на эталоне смеси, уплотненной вибрированием, требующем большего времени. Предел прочности и объемная масса бетонов на щебне, близком к кубической форме, несколько выше, чем на щебне лещадной формы, и еще больше у бетонов из смесей одной и той же пластично-

* Значительная разница в щебне обеих форм зерен в рыхлом состоянии при уплотнении смесей сглаживается.

Таблица IV.11

Форма щебня	Вид бетонной смеси	Осадка конуса, см	Объемная масса щеб- ня, кг/л		Пустот- ность, %		Объемная масса бетона, т/м³	Предел прочности при сжатии, кг/см² (10 ⁻¹ МПа)
			рыхлого	уплотнен- ного	рыхлой смеси	уплотнен- ной смеси		
Лещадная	Каменистая смесь с щебнем, отделяющимся от раствора	0,4	1,17	1,49	50,1	37,6	2,22	263
Кубическая	При выгрузке расслаи- вается	11,6	1,36	1,64	39,1	32,7	2,28	291

Примечание. Расслаивание смеси на щебне кубической формы связано с избытком воды. В 1 л смеси кубической формы щебня (ранее указанного фракционного состава) в рыхлом состоянии размещается 1558, в уплотненном — 1650 шт., лещадной формы соответственно — 2112 и 2342 шт.

сти-жесткости (из изопластичных смесей). Аналогично можно рассмотреть и различие других свойств бетона.

Любая другая однотипность зерен не является оптимальным решением для выбора их формы; различие в текстуре поверхности зерен крупного заполнителя существенно влияет на технические свойства бетона (см. § 31, 32, 33). Отметим, что поверхность зерен крупного заполнителя должна быть чистой. В случае загрязнения гравия (щебня) глинистыми, илистыми или другими примесями крупный заполнитель надо промывать.

§ 28. Зерновой состав гравия (щебня)

Если текстура поверхностного слоя крупного заполнителя мало влияет на пластичность-жесткость и стабильность смеси на всех технологических переделах (см. § 48), то форма зерен и зерновой состав оказывают решающее влияние на этот показатель, в том числе на его стабильность. При прочих равных условиях насыпная объемная масса определяет пустотность крупного каменного заполнителя, т. е. отражает влияние зернового состава и формы зерен на более или менее плотное заполнение объема. Следовательно, этот показатель в конечном счете определяет количество раствора, которое требуется для приготовления плотного бетона.

Сказанное ранее о форме зерен позволяет сделать вывод о необходимости применять крупный заполнитель различных размеров, что, в частности, достигается при делении гравия (щебня) на фракции (см. § 29).

Многочисленные исследования о влиянии зернового состава на свойства бетона были проведены в Центральной лаборатории строительства Куйбышевского гидроузла еще в 1938—1940 гг. Учитывая различные точки зрения по данному вопросу, было решено провести опыты на семи зерновых составах гравия флювио-

глицеального генезиса и на двух зерновых составах щебня из афонитового известняка. Проверялись смеси на гравии по кривой Боломея, по измененной кривой Фуллера, на грани прерывистого зернового состава и смеси, содержащие 25, 50 и 75% крупных фракций.

Кроме смеси, подобранной по кривой Боломея, проверялись остальные смеси на ряд характеристик при наибольших крупностях зерна в 40, 80 и 160 мм и шести значениях коэффициента r — 20, 25, 30, 35, 40 и 45% от суммы объемов песка и крупного заполнителя (см. § 41).

Таблица IV.12

Наибольшая крупность щебня, мм	Фракции щебня, мм	Содержание фракций, %, при составе смеси щебня						
		по Боломею	по измененной кривой Фуллера	прерывистом зерновом	с разной максимальной крупностью зерна			
					Номер состава			
					1	1	2	3
40	40—50	—	—	76	—	—	—	—
	20—40	45	45	—	25	—	50	75
	10—20	32	36	—	35	—	25	15
	5—10	23	19	24	40	—	25	10
80	40—80	40	53	65	25	—	50	75
	20—40	27	21	—	18	—	12	6
	10—20	20	17	35	30	—	20	10
	5—10	13	9	—	27	—	18	9
160	120—160	—	—	40	—	—	—	—
	80—160	—	52	—	25	25	50	75
	40—80	—	25	—	25	50	25	15
	30—40	—	—	30	—	—	—	—
	20—40	—	10	—	12	6	6	2
	10—20	—	8	—	20	10	10	4
	5—10	—	5	30	18	9	9	4

Качество смесей оценивалось такими же способами, как и при оценке влияния формы зерен. В табл. IV.12 приведены проверяемые зерновые составы смесей крупного гравия. При работах объем мерных сосудов изменялся в соответствии с указаниями, существующими в методиках стандартов.

Указанное разнообразие зерновых составов смесей было связано с необходимостью практической проверки широко известных рекомендаций по Боломею, измененному составу Фуллера и прерывистому зерновому составу и т. д. При этом требовалось получить смесь с наименьшей и наибольшей пустотностью. Выбор максимальных размеров зерен в смеси был связан с разработкой рекомендаций для бетонных работ в строительстве — гидротехническом, дорожном, аэродромном, промышленном, мостовом, жилищном.

Для опытов применяли среднеалюминатный портландцемент того же состава, что и при определении влияния щебня различной формы на свойства смеси и бетона и тот же цемент с добавкой к нему 20% трепела и тот же песок.

Таблица IV.13

Коэффициент γ	Состав бетонной смеси, кг/м ³			
	цемент	вода	песок	гравий
0,20	300	175	382	1505
0,25	300	175	478	1410
0,30	300	175	575	1316
0,35	300	175	666	1226
0,40	300	175	764	1129
0,45	300	175	860	1034

На 1 м³ бетона на портландцементе при сравнении двух вяжущих требовалось: цемента — 300 кг, воды — 165 л, песка — 564 кг, гравия — 1318 кг, пластичность-жесткость смеси — 3,5 см. На 1 м³ бетона на пуццоланизированном цементе расходуется: цемента 240+60 (трепела) кг, воды 185 л, песка — 551 кг, гравия — 1262 кг

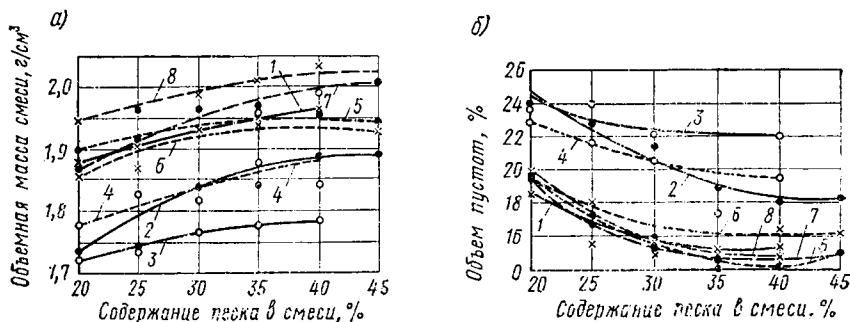


Рис. IV.5. Зависимость объемной массы песчано-гравийных смесей от коэффициента γ :

а — изменение объемной массы сухой смеси песка и гравия от содержания в ней песка; б — пустотность смеси в рыхлом состоянии при различном содержании песка; 1 — смесь прерывистого зернового состава (40—50 мм); 2 — смесь по измененной кривой Фуллера (40—50 мм); 3 — смесь подобрана по кривой Боломея (40—50 мм); 4 — смесь подобрана по кривой Боломея (80 мм); 5 — смесь по измененной кривой Фуллера (80 мм); 6 — смесь прерывистого зернового состава (80 мм); 7 — смесь по измененной кривой Фуллера (120—160 мм); 8 — смесь прерывистого зернового состава (120—160 мм)

при той же пластичности-жесткости. При изменении показателя γ для опытов был выбран смешанный портландцемент того же минералогического состава, что и в указанных опытах, но с добавкой молотого песка. В табл. IV.13 приведены эти составы, приготовленные при том же В/Ц, но с измененным количеством песка и гравия.

На рис. IV.5 приведены показатели изменения объемной массы песчано-гравийных смесей для трех зерновых составов с указанным в табл. IV.13 содержанием песка (различным коэффициентом r). Анализ графиков позволяет сделать выводы о влиянии зерновых составов на указанные показатели, а именно: смеси с прерывистым зерновым составом уплотняются незначительно, так как и в рыхлом состоянии укладываются плотно; каждая из проверенных смесей по разному уплотняется при вибрировании. Так, гравийная смесь (табл. IV.14), подобранная по Боломею, уплотняется слабо, а подобранная по измененной кривой Фуллера по плотности приближается к уплотненной смеси с прерывистым зерновым составом *, что имеет большое значение для технологии бетонных работ.

Таблица IV.14

Состав гравийной смеси	Осадка конуса, см, при наибольшей крупности зерен гравия, мм	
	40	80
По Боломею	0,1—2,2	0,5—3,4
По измененной кривой Фуллера	0,5—2,7	0,8—6,0
Прерывистый зерновой состав . . .	1,3—3,6	1,3—4,3
При разной максимальной крупности зерна:		
с 25%	0,8—0,9	1,5—6,5
» 50%	1,0	1,7—4,2
» 75%	0,3—2,5	2,5—12,0

Примечание Меньшая осадка конуса относится к смеси с 40% песка, большая — 25%.

Увеличение наибольшей крупности способствует лучшей раскладке меньших зерен, что повышает плотность, как и вибрирование; при этом различие в плотности зерновых составов остается, что связано с исходным фракционным составом. В этих опытах с сухими смесями (без цементного теста) увеличение до 40% содержания песка в крупном гравийном заполнителе независимо от его зернового состава приводит к повышению плотности (заполнению пустот в промежутках между зернами гравия или щебня).

Указанное на рис. IV.5 различие в плотности зерновых составов настолько значительно, что заставляет внимательно анализировать пути подбора плотных составов гравия и щебня и не применять природные песчано-гравийные смеси или допускать дробление горных и технических пород без учета ранее сказанного в § 24.

Однако увеличение удельной поверхности заполнителей (что связано с повышением количества песка в песчано-гравийной смеси) для получения смесей с одной и той же пластичностью-жесткостью вызывает соответствующий рост расхода воды, а при сохранении одной и той же прочности и увеличение расхода цемента.

* Здесь под плотностью понимается оценка состояния смеси по объемной массе и проценту пустот.

При испытании составов бетона, приведенных в табл. IV.13, видно, что при одном и том же значении r изменяется пластичность-жесткость бетонных смесей на гравии различного зернового состава (табл. IV.14). Это связано с наибольшей крупностью зерен и количеством песка. В табл. IV.14 даны значения осадки конуса, а на рис. IV.6 и IV.7 — прочности бетона при сжатии. Как следует из таблицы, с ростом содержания песка нивелируется различие в пластичности-жесткости смесей, оцениваемой по осадке конуса. Существует оптимальное количество песка, при котором смесь обладает лучшей связностью и наибольшей осадкой конуса; при определенных минимальных значениях коэффициента r бетонные смеси начинают расслаиваться. У смесей с наибольшей крупностью зерна в 40 мм отмечена наибольшая осадка конуса при 30% песка; с уменьшением количества песка выявляется роль зернового состава гравия.

Для гравия с любой (большей) крупностью зерен большая пластичность отмечается при меньшем чем 30% содержании песка; это показывают и прямые определения плотности таких смесей, подтверждая положение о лучшей упаковке составляющих их зерен. Естественно, что с увеличением максимального размера зерен гравия происходит рост пластичности-жесткости бетонной смеси по осадке конуса против аналогичных составов, но с меньшим максимальным размером зерен.

Не расслаивающимися на всех технологических переделах являются смеси с большим содержанием песка, и, следовательно, как бы нивелируется различие в зерновых составах. Однако из отмеченного факта нельзя делать вывод о том, что на качество бетона из смеси с высоким содержанием песка также не будет влиять зерновой состав крупного заполнителя. Действительно, наибольшая прочность бетона с содержанием 45% песка колеблется для различных составов в пределах от 220 до 275 кГ/см^2 (10^{-1} МПа).

График показывает, что прочность бетона нельзя оценивать вне зернового состава крупного каменного заполнителя одной и той же характеристики, формы зерен и количества песка при прочих равных условиях опыта (при одном В/Ц, качестве и количестве цемента, условиях приготовления бетонной смеси, ее формирования и твердения). Сказанное подтверждается (рис. IV.8) опытами с разными зерновыми составами гравия и щебня (из афонитового известняка). Так же как и в опыте с гравием, для нерасслаиваемости смеси — лучшей ее связности — решающее значение имеет количество песка в сумме заполнителей, которое неодинаково для разных зерновых составов.

Для щебня, подобранного по типу измененной кривой Фуллера, оптимальное для бетонной смеси содержание песка равно 40—45%, для щебня с прерывистым зерновым составом (например, при 50%-ном содержании зерен наибольшей крупности) отмечается большая пластичность по сравнению с составами щебня непрерывного зернового состава. И в этом случае снижение содержания песка ниже определенной величины приводит к потере связности кону-

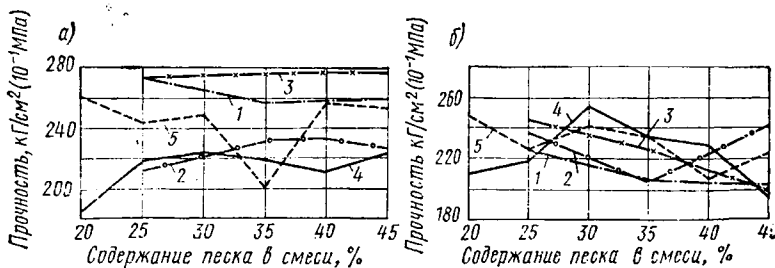


Рис. IV.6. Прочность бетона при сжатии на 30 сут. на песчано-гравийной (песчано-щебеночной) смеси разного состава:

а — наибольшая крупность зерен гравия 40 мм; б — наибольшая крупность зерен гравия 80 мм; 1 — зерновой состав I; 2 — зерновой состав II; 3 — зерновой состав III; 4 — непрерывный зерновой состав по Фуллеру; 5 — прерывистый зерновой состав

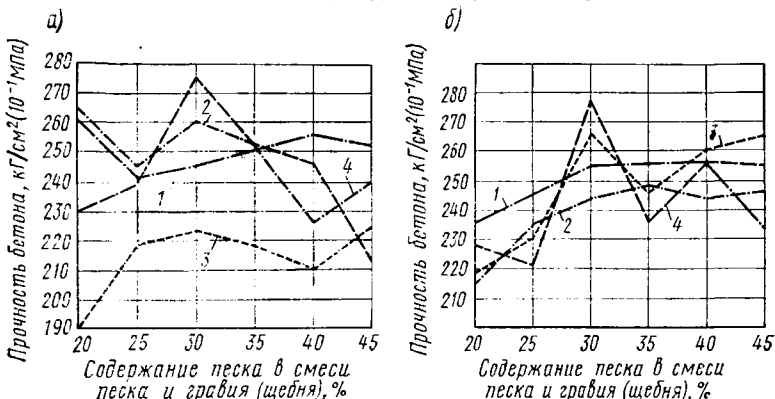


Рис. IV.7. Прочность бетона при сжатии при разной наибольшей крупности и содержании песка:

а — гравий; б — щебень; 1 — наибольшая крупность зерен 50 мм при прерывистом зерновом составе; 2 — наибольшая крупность 80 мм при прерывистом зерновом составе; 3 — наибольшая крупность 40 мм при непрерывном зерновом составе; 4 — наибольшая крупность 80 мм при непрерывном зерновом составе

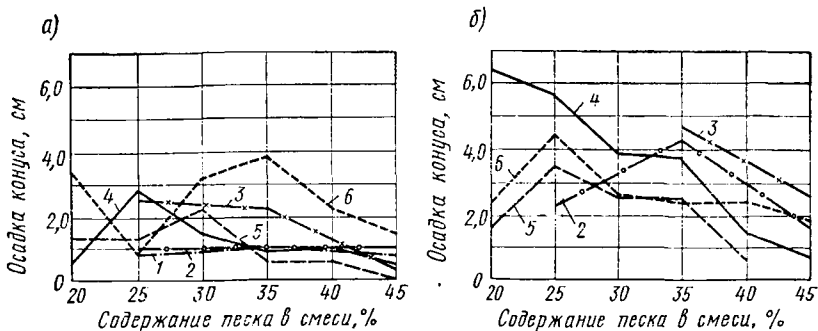


Рис. IV.8. Осадка конуса бетонной смеси для заполнителей разных составов:

а — наибольшая крупность зерен гравия 40 мм; б — наибольшая крупность зерен гравия 80 мм; 1 — зерновой состав I; 2 — зерновой состав II; 3 — зерновой состав III; 4 — непрерывный зерновой состав по Фуллеру; 5 — смесь по кривой Болломея; 6 — смесь прерывистого зернового состава

са бетонной смеси (он разваливается после снятия формы). При этом составы с большим содержанием песка имеют и несколько меньшую осадку конуса.

Несовершенство метода нахождения пластичности-жесткости бетонных смесей, в частности, заключается и в том, что при определении осадки конуса не фиксируется внимание на связности смеси (когда конус деформируется пластично, без потери связности частиц) или ее отсутствии (когда конус деформируется — разваливается).

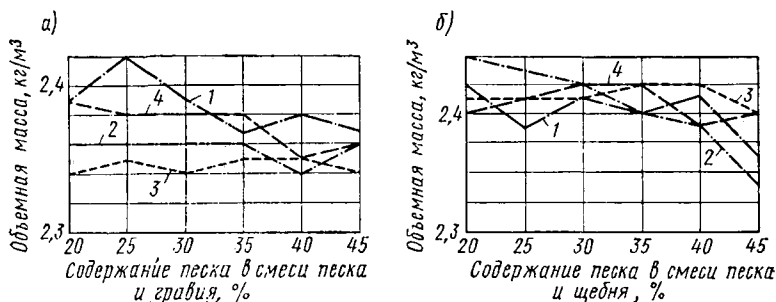


Рис. IV.9. Зависимость объемной массы бетона на крупных заполнителях от наибольшей крупности зерен и содержания песка в смеси:

а — гравий; б — щебень; 1 — наибольшая крупность зерен 50 мм при прерывистом зерновом составе; 2 — наибольшая крупность зерен 80 мм при прерывистом зерновом составе; 3 — наибольшая крупность зерен 40 мм при непрерывном зерновом составе; 4 — наибольшая крупность зерен 80 мм при непрерывном зерновом составе

Оценка пластичности бетонной смеси по осадке конуса дана в табл. IV.15, где приведена осадка конуса для разных зерновых составов гравия и щебня с максимальными крупностями — 40, 80 и 160 мм *. В таблице нет оценки внешнего вида конуса.

На указанных в табл. IV.15 материалах были приготовлены не только кубики с ребром в 20 см для определения прочности, но и призмы, которые затем были распилены для анализа их текстуры. По макрошлифам, распределенным по типам зерновых составов, можно различать исходный зерновой состав и примерное содержание песка в заполнителях. Особенно рельефно на макрошлифах виден верхний (40—45%), а также нижний пределы содержания песка (20—25%). Для бетонов, в которых преобладает крупный гравий (щебень) (160—120—80 мм), заметна большая неоднородность состава по поверхности макрошлифа.

Показанные на рис. IV.6 и IV.7 колебания в прочности бетона, в первую очередь, связаны с его текстурой в части распределения раствора и крупного заполнителя в любых конструкциях, что и вызывает необходимость фракционирования ** (см. § 29). Следует

* При определении осадки конуса для смесей с зернами 160 мм отбирались зерна крупнее 40 мм.

** При этом не следует считать, что неоднородность прочности и других свойств бетона не зависит от однородности цементного камня.

Таблица IV.15

Состав смеси	Наибольшая крупность зерен, мм		Зерновой состав		Осадка конуса, см, при значении τ			
			фракции, мм	содержание, %	0,20	0,25	0,30	0,40
По кривой с прерывистым зерновым составом	Гравий	40	40—50 5—10	76 24	0,6	2,7	1,6	0,4
		80	40—80 10—20	65 35	6,4	5,6	3,8	1,2
		160	120—160 30—40 5—10	40 30 30	— —	16,0	—	9,4
	Щебень	40	40—50 5—10	76 24	0,5	0,1	0,4	1,3
		80	40—80 10—20	65 35	3,3	6,0	13,0	1,3
		160	120—160 30—40 5—10	40 30 30	—	16,8	—	5,0
По измененной кривой Фуллера	Гравий	40	20—40 10—20 5—10	45 36 19	0,3	1,8	3,1	1,6
		80	40—80 20—40 10—20 5—10	53 21 17 9	2,2	4,3	2,7	1,8
		160	80—160 40—80 20—40 10—20 5—10	52 25 10 8 5	—	15,7	—	1,7
	Щебень	40	20—40 10—20 5—10	45 36 19	12,5	10,0	6,4	2,4
		80	40—80 20—40 10—20 5—10	53 21 17 9	19,5	16,5	4,4	2,5
		160	80—160 40—80 20—40 10—20 5—10	52 25 10 8 5	—	15,5	—	2,9

Таблица IV.16

Вид смеси. Состав смеси, подобранный	Наибольшая крупность зерен, мм	Зерновой состав смеси	Объемная масса бетона, т/м³, при значении γ							
			фрак- ции	содер- жание, %	20	25	30	35	40	45
По измененной кри- вой Фюллера	Шебня 40	20—40	45	2,39	2,39	2,40	2,40	2,40	2,38	
		10—20	36							
		5—10	19							
По кривой с преры- вистым зерновым со- ставом	80	40—80	53	2,39	2,40	2,40	2,37	2,38		
		20—40	21							
		10—20	17							
Без разделения на смеси (для обоих ви- дов)	Гравия 40	40—50	76	2,40	2,37	2,39	2,38	2,39	2,35	
		5—10	24							
		80	40—80	65	2,42	2,41	2,40	2,38	2,37	2,33
	80	10—20	35							
		40	—	45	2,39	2,31—2,42	2,32—2,39	2,32—2,37	2,32—2,38	2,32—2,37
		36								
	80	19	2,36—2,39	2,34—2,41	2,36—2,39	2,35—2,38	2,31—2,37	2,33—2,36		
		65								
		35								

отметить близость объемных масс бетонов на крупном заполнителе разной максимальной крупности. Различие в величинах объемных весов также связано с зерновым составом крупного заполнителя и постепенно уменьшается для бетонов на некоторых из них, что связано с плотностью упаковки компонентов бетона. Это видно на показателе массы объемных бетонов с одним цементом и при одинаковом В/Ц на двух зерновых составах (табл. IV.16). Объемные массы бетонов на щебне имеют меньший разброс показателей по сравнению с аналогичными составами на гравии. Из табл. IV.16 видно, насколько значительно различие в объемных массах бетонов на щебне и гравии при увеличении содержания песка. Это можно объяснить менее равномерным распределением дисперсного минерального заполнителя — песка, увеличивающегося в объеме при увлажнении, в крупном заполнителе, из которого удалены промежуточные фракции, например, между зернами в 160 и 5 мм отсутствуют фракции 120—80, 80—60, 20—10 мм (рис. IV.9).

Введение цементного теста в сухие каменные материалы в значительной степени изменяет показатели плотности, полученные при опытах на сухих материалах. Регулируя количество и качество цементного теста, удастся регулировать и плотность бетона.

Анализ роли зернового состава крупного заполнителя, как и опыт бетонных работ, позволяет сделать следующие выводы:

1) зерновой состав имеет существенное значение для качества бетонной смеси на всех технологических переделах. Если при перемешивании и транспортировании можно получить нерасслаиваемые бетонные смеси только благодаря повышенному содержанию песка, то для их формирования можно применить любое количество песка. Следовательно, рассмотрение зерновых составов крупного заполнителя нельзя ограничивать чисто лабораторными определениями пластичности-жесткости бетонной смеси;

2) содержание воды в бетонной смеси связано с зерновым составом крупного заполнителя, в том числе с максимальной крупностью зерен;

3) зерновой состав заполнителя отражается на коэффициенте однородности, механической прочности и на других его свойствах. Поэтому в тех сооружениях, масса которых учитывается в расчетах, следует добиваться высоких и стабильных значений также путем регулирования зернового состава;

4) от зернового состава заполнителя зависит степень упаковки смеси при вибрировании и, следовательно, расход цемента.

Следует всегда применять гравий (щебень) с максимально допустимым по крупности пределом зерен, с учетом сечений и армирования конструкций. Указанное условие определяет возможность получения бетонной смеси заданной пластичности-жесткости при минимальном содержании воды; увеличивая максимальный размер зерен гравия (щебня), можно сгладить различие в механической прочности зерновых составов, что имеет большое практическое значение для технологии фракционирования крупного каменного заполнителя (тоже при дроблении технических пород на щебень).

Сказанное позволяет использовать каменные материалы с меньшим количеством песка без расслоения бетонных смесей при транспортировании и, следовательно, применять бетон с относительно меньшим содержанием воды; пластичность выше у бетонных смесей, содержащих более крупный гравий (щебень), в котором меньше последующих фракций, чем у смесей с меньшей максимальной крупностью зерна (см. табл. IV.15).

С изменением содержания песка в бетонах меняется «жирность» * раствора, прочность бетонов на крупном заполнителе одного зернового состава, но разного вида (гравий, щебне различных петрографических характеристик и формы зерен).

По внешнему виду конусов сформированной бетонной смеси и по осадке конуса можно определять оптимальное содержание песка в бетоне. При низких значениях r теряется связность между растворной частью и зернами крупного заполнителя, а при высоких — резко уменьшается осадка конуса, хотя условная нерасслаиваемость компонентов в смеси визуально наиболее высока; величина r не должна назначаться без учета зернового состава крупного каменного материала; ее уточняют экспериментом, так как она связана с рядом условий, одним из которых является зерновой состав крупного заполнителя. Необходимо отметить, что при повышенном содержании песка нивелируется различие по пластичности-жирности смеси в зерновых составах крупного каменного заполнителя. Это указывает (так как изменяется «жирность» растворной части) на отрицательную роль повышенного количества песка в бетонах сравниваемых составов (при одном и том же содержании цемента и В/Ц).

По перечисленным причинам применяется фракционированный крупный заполнитель, а в ряде стран — фракционированный песок.

§ 29. Фракционирование гравия (щебня)

Сказанное о влиянии зернового состава заполнителей на качество смесей и бетона вызывает необходимость фракционирования крупного заполнителя, что отражено в технических и общих требованиях ГОСТа на заполнители для любых видов бетона. Крупный заполнитель (природный гравий, щебень из гравия, булыг, монолитных и обломочных разностей горных и технических пород) разделяется на такие фракции, которые позволяют составлять требуемую смесь для изготовления любой конструкции (сооружения), используя все преимущества научно обоснованного подбора зернового состава.

В табл. IV.17 приведены данные изменения характеристик бетонной смеси, объемная масса и прочности бетона двух составов из четырнадцати различных комбинаций зернового состава круп-

* Термин «жирность» определяет относительно меньшее содержание песка в сравниваемых смесях с равным содержанием цемента.

ного заполнителя с использованием фракционированного гравия. Из показаний таблицы можно сделать следующие выводы:

1. Предел прочности и другие свойства в разных местах конструкции могут быть неодинаковыми, если бетонная смесь на любом из технологических переделов расслоится*: во время приготовления, транспортирования, укладки в опалубку или формования при вибрировании (рис. IV.10).

2. При неизменном содержании воды и цемента зерновой состав крупного заполнителя в большом диапазоне изменяет пластичность-жесткость бетонной смеси, следовательно, для подбора состава смеси на местах производства работ экспериментальным путем должны быть подобраны соответствующие зависимости для определения ее пластичности-жесткости.

3. Для получения бетона с высокой однородностью свойств необходимо проектировать такой состав смеси, которая не могла бы расслаиваться.

4. Одним из средств, обеспечивающих стабильность проектного состава бетона, является введение в бетонную смесь комплекса органических ПАВ (см. § 46) и электролитов (см. § 47). Это позволяет получить пластичные смеси при минимальном содержании воды.

5. Недоуплотнение бетонной смеси приводит к резкому снижению технических свойств бетона, в том числе его прочности, что вызывается, в частности, учетом качества крупного заполнителя и его зернового состава (это резко снижает прочность и объемную массу у бетонов на портландцементе и пуццоланизированном портландцементе в составах № 14, см. табл. IV.17).

6. Для связности и пластичности-жесткости бетонной смеси коэффициент γ не имеет решающего значения при формовании смесей, обеспеченных от расслоения цементного теста. При недостатке песчаных фракций к месту уплотнения будет доставляться расслоенная смесь, что недопустимо, так как при этом резко снижается однородность бетона.

Из табл. IV.17 видно, что ввиду наличия в бетоне на пуццоланизированном портландцементе (большая вязкость цементного теста) (большого количества воды по сравнению с бетоном на портландцементе не уменьшилась пластичность. На заполнителе с максимальным размером зерна в 160 мм получены предельные значения пластичности бетонных смесей, которые по классификации относятся к литым составам.

Столь резкое различие в пластичности-жесткости смесей связано не только с уменьшением поверхности смачивания зерен (следовательно, уменьшением количества воды в цементном тесте), но и с возможностью погружения частиц большей массы в раствор с такой вязкостью, которая препятствует передвижению в нем менее

* Сказанное относится к любому компоненту бетонной (растворной) смеси: песку, цементному тесту и неравномерному распределению воды в бетоне (растворе).

Таблица IV.17

Содержание фракций размером, мм					Осадка конуса, см		Объемная масса бетона, т/м³		Предел прочности при сжатии, кг/см² (10⁻¹ МПа)		Визуальная характеристика конуса бетонной смеси	
80—160	40—80	20—40	10—20	5—10	состав № 1*	состав № 2*	состав № 1	состав № 2	состав № 1	состав № 2	состав № 1	состав № 2
1 100	—	—	—	—	24,2	27,3	2,20	2,05	313	200	Плавная осадка	Плавная осадка
2 50	15	15	10	10	17,8	18,3	2,32	2,25	345	250	То же	То же
3 40	30	30	—	—	5,5	5,6	2,31	2,22	334	229	»	»
4 20	20	20	20	20	3,3	4,2	2,34	2,28	312	200	»	»
5 20	15	15	25	25	5,5	4,2	2,33	2,25	292	220	»	»
6 —	100	—	—	—	4,7	10,6	2,38	2,31	285	280	»	»
7 —	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	Осыпание верхней части, неподвижность нижней	Осыпание верхней части, неподвижность нижней
8 —	65	—	35	—	3,9	11,8	2,39	2,32	327	220	То же	То же
9 —	50	15	15	20	2,0	14,5	—	2,33	—	251	Образование цилиндра	Образование цилиндра
10 —	25	25	25	25	0,6	5,0	2,36	2,31	308	271	Плавная осадка	Плавная осадка
11 —	20	15	15	50	Нет осадки	2,3	2,23	2,29	295	301	Отмечены каверны на поверхности	Отмечены каверны на поверхности
12 —	—	100	—	—	1,8	8,3	2,37	2,30	363	235	То же	То же
13 —	—	31	33	33	Нет осадки	3,2	2,36	2,31	363	254	Замечаний нет	Замечаний нет
14 —	—	—	100	—	То же	1,7	2,37	2,30	353	266	Много мелких каверн	Много мелких каверн
15 —	—	—	—	100	Нет осадки	Нет осадки	2,22	2,17	161	177	Замечаний нет	Замечаний нет
16 —	—	—	—	—	»	»	—	—	—	—	Много мелких каверн	Много мелких каверн

* На портландцементе.

** На пуццоланизированном портландцементе.

Примечания: 1. Состав бетонной смеси № 1 (на 1 м³): цемента 300 кг, воды 165 л, песка 564 кг, гравия 1318 кг.

2. Состав бетонной смеси № 2 (на 1 м³): цемента 240 кг, щебня 60 кг, воды 185 л, песка 551 кг, гравия 1262 кг.

3. В этих опытах не учтен выход смеси, т. е. некоторое различие в содержании цемента (см. табл. IV.18).

4. Нет осадки — означает, что конус без вибрирования не оседает.

крупных зерен. В табл. IV.17 сделана соответствующая этому положению разбивка составов бетонных смесей по степени уменьшения максимальной крупности зерен.

Роль фракционирования крупного заполнителя (выбора оптимального зернового состава) целесообразно проверить экспериментами по приготовлению бетонных смесей заданной пластичности-жесткости, расходу цемента и хотя бы по показателю прочности. Это возможно осуществить следующим методическим приемом. Назначают объем опытного замеса и приготавливают его в два приема. Сначала готовят сухую смесь заполнителей проектного состава и

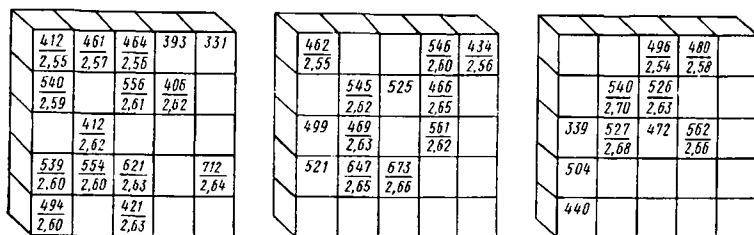


Рис. IV.10. Неоднородность бетона в одном распиленном кубе размером 1×1×1 м:

Верхние цифры обозначают предел прочности на сжатие, в кг/см², нижние — объемную массу в т/м³

засыпают в мерный сосуд для точного дозирования. Для каждого замеса * приготавливают цементное тесто (цементная концентрированная суспензия), в котором известны содержание цемента и воды, назначаемые в соответствии с подобранным составом бетона. Для опытов, результаты которых изложены ниже, проанализирован состав бетона эталона, содержащий в 1 м³ цемента 300 кг, воды 175 кг, песка 567 кг, гравия 1300 кг. Пластичность-жесткость проверяемых составов смеси должна составлять 3—5 см (табл. IV.18).

Как видно из приведенных фракционных составов, независимо от максимальной крупности зерен гравия в каждой верхней группе составов 1, 3, 5, 7 содержится 50% фракций зернами наименьшего размера, а в нижней группе составы 2, 4, 6, 8 с 50% фракций зерен наибольшего размера. Зерновой состав этих смесей отличается от приведенных в § 29, что расширяет число исследованных составов и обосновывает выводы, касающиеся качества одного из компонентов бетона. Из этого эксперимента можно сделать ряд обобщений, подтверждающих важность фракционирования заполнителей:

* Было затворено восемь составов на среднеалюминатном портландцементе.

1. Существует зависимость между зерновым составом заполнителей, расходом цемента и пластичностью-жесткостью бетонной (растворной) смеси; чем крупнее зерна и больше содержится их, тем с меньшим количеством суспензии цементного теста можно получить бетонную смесь заданной пластичности-жесткости.

2. Для некоторых соотношений зерен при прочих равных условиях (в том числе для смесей с относительно высоким содержанием зерен наибольшей крупности) расход цемента будет разным; например, для прерывистых составов он ниже, чем для непрерывных. Каждый из перечисленных факторов (наибольшая крупность зерен, их количество в смеси, прерывистость или непрерывистость состава) по-разному влияет на расход цемента в бетоне при неизменном количестве песка и крупного заполнителя; из них наибольшее влияние оказывает количество крупных фракций, что иллюстрируется данными табл. IV.18 (на непрерывном и прерывистом зерновом составе).

3. В этих опытах влияние крупности зернового состава сказалось лишь до крупности зерен в 160 мм.

Следует учитывать, что эти выводы в части количественного значения носят различный характер. Так, наименьшие расходы цемента по сравнению с эталоном получены для всех составов, в которых имеется до 50% зерен наибольших размеров. Указанное различие в содержании цемента доходит до 22% и по данным табл. IV.18 для состава № 8*, который сравнивается с составом № 10, обеспечивает возможность получения бетона с наиболее высокой объемной массой, но меньшей прочностью из-за меньшего количества суспензии **. Это же можно увидеть и при сравнении других составов, например № 2 и 5.

Фракционирование природных минеральных заполнителей всегда необходимо при разделении их на мелкий и крупный заполнитель. В этом случае мы добиваемся проектного соотношения песка и гравия в бетонной смеси и в значительной мере приближаемся к запроектированному составу. Однако дальнейшее фракционирование заполнителей приносит технический эффект только в случае введения необходимых фракций, отсутствующих в месторождении. Иначе фракционирование не даст эффекта, даже если гравий промывать. Следовательно, выяснение вопроса об организации фракционирования и целесообразных путей его осуществления всегда надо начинать с анализа зернового состава гравия (песка), возможности получения недостающих фракций, с оценки целесообразности и реальности их получения путем дробления камня (булыг). Приведенные результаты опытов не дают точных показателей по той причине, что форма зерен гравия (щебня) исключительно разнообразна. Математические выводы можно применять в этих опытах с должной их сходимостью только для зерен, имеющих форму шаров.

* Использованы сведения о бетонах на пуццолановых цементах.

** При внесении поправки на содержание цемента у бетонов будет одна и та же прочность.

Таблица IV.18

№ п. п.	Наибольшая крупность гравия, мм	Зерновой состав гравия		Осадка конуса смеси, см	Суспензия (цемент*+во- да), кг/м³ смеси
		фракции, мм	содержание, %		

Непрерывные зерновые составы с разным содержанием
при максимальной крупности

1	40	20—40 10—20 5—10	20 30 50	3,0	570 (360+210)
2	40	20—40 10—20 5—10	50 30 20	4,7	499 (315+184)
3	80	40—80 20—40 10—20 5—10	20 15 15 50	4,8	522,5 (330+192,5)
4	80	40—80 20—40 10—20 5—10	50 15 15 20	3,5	428 (270+158)
5	160	80—160 40—80 20—40 10—20 5—10	20 15 15 25 25	6,5	475 (300+175)
6	160	80—160 40—80 20—40 10—20 5—10	50 15 15 10 10	7,4	436 (275+161)
7	220	160—220 80—160 40—80 20—40 10—20 5—10	10 10 15 15 25 25	5,0	475 (300+175)
8	220	160—220 80—160 40—80 20—40 10—20 5—10	25 25 15 15 10 10	5,5	410 (260+150)

№ п. п.	Наибольшая крупность гравия, мм	Зерновой состав гравия		Осадка конуса смеси, см	Суспензия (цемент*+вода) кг/м³ смеси
		фракции, мм	содержание, %		
Непрерывный зерновой состав					
9	40	20—40 10—20 5—10	50 30 20	4,7	499 (315+184)
10	80	40—80 20—40 10—20 5—10	50 15 15 20	3,4	428 (270+158)
11	160	80—160 40—80 20—40 10—20 5—10	50 15 15 10 10	7,5	435 (275+160)
12	220	160—220 80—160 40—80 20—40 10—20 5—10	25 25 15 15 10 10	5,4	410 (260+150)
Прерывистый зерновой состав					
13	40	20—40 10—20 5—10	75 — 25	4,7	475 (300+175)
14	80	40—80 20—40 10—20 5—10	65 — 35 —	5,4	411 (259+152)
15	160	120—160 60—80 20—40 10—20 5—10	40 — 30 — 30	3,2*	475 (300+175)
16	220	160—220 80—160 40—80 20—40 10—20 5—10	70 — — 20 — 10	4,5	425 (268+157)

* Портландцемент со средним содержанием минерала C_3A .

§ 30. Влияние крупного заполнителя на водонепроницаемость и сцепление бетона с цементным камнем

Водонепроницаемость бетона зависит от его текстурной плотности*. Отметим, что по водонепроницаемости бетона нельзя оценивать его морозостойкость. Для доказательства справедливости этого положения можно обратиться к лабораторным испытаниям образцов одного состава, изготовленных на портландцементе и пуццолановом портландцементе. Если образцы бетона на портландцементе, твердевшие вместе с образцами на пуццолановом портландцементе, начинают фильтровать воду при меньшем давлении, чем на пуццолановых портландцементных, то морозостойкость значительно выше у образцов с меньшей водонепроницаемостью, т. е. у образцов на портландцементе (рис. IV.11).

При этом существенное значение имеет особенность цемента при загустевании-схватывании удерживать и отделять свободную воду, которая появляется в итоге протекания указанного физико-химического процесса. Как известно, цементы, в которые введена гидравлическая добавка, способная связывать такую воду на поверхности зерен, обеспечивают большую водонепроницаемость бетона (раствора).

При этом количество гидравлической добавки имеет существенное значение, что видно из рис. IV.11. Изменение содержания гидравлической добавки — диатомита (с 40 до 50%) повысило количество воды, профильтровавшейся по дефектам в текстуре раствора за первые 50 ч испытания с 475 до 6500 мл. При этом с начала испытания на водонепроницаемость в каждом растворе протекают процессы самоуплотнения, которые можно назвать набуханием гелевых структур, что обеспечивает резкое снижение его водонепроницаемости. Однако при этом процессе, который проанализирован на протяжении 900 ч, сохраняется та же тенденция к повышению водонепроницаемости растворов с необоснованно высоким содержанием диатомита (т. е. таким количеством гидравлической добавки, которая частично не связывается с известью, выделяющейся при твердении минерала C_3S).

Применение в однократно уплотняемой бетонной смеси** цементов, при твердении которых не отделяется вода от цементного теста, обеспечивает, при прочих равных условиях, наиболее плотный контакт последнего с поверхностью зерен заполнителя. Это обстоятельство создает большую водонепроницаемость текстуры бетона. Однако такого контакта в аналогичных условиях не будет с цементными, в которых происходит отделение воды (см. § 54), что надо иметь в виду при проектировании бетона.

Чтобы показать, как изменяется водонепроницаемость бетонов на крупном заполнителе, рассмотрим результаты испытания кон-

* Под этим определением понимается плотность цементного камня, заполнителей, контактной зоны между цементным камнем и поверхностью заполнителей.

** В данном случае фиксируется внимание не только на составе цемента, но и на ряде других условий, влияющих на свойства бетона.

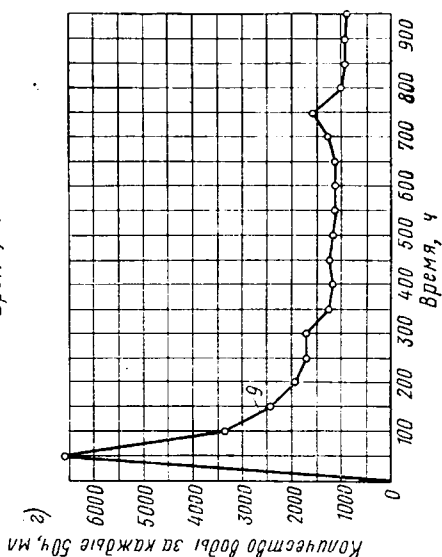
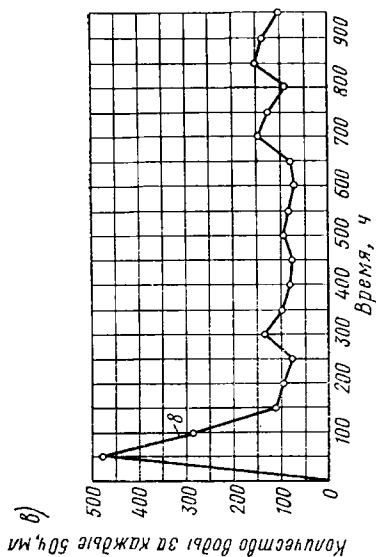
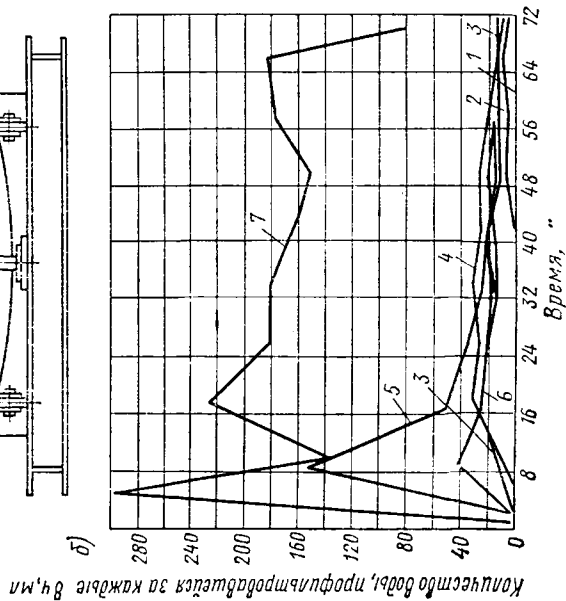
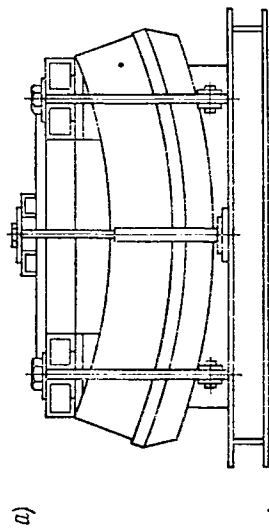


Рис. IV.11. Водонепроницаемость бетона и его самоуплотнение: а — стеновые испытания обделки тоннеля на водонепроницаемость; б — сравнительные испытания образцов на водонепроницаемость с различным содержанием цемента; в — самоуплотнение растворов состава 1:3 с 40% диатомита; г — то же, 50% диатомита; 1 — бетон на пуццолановом цементе; 2 — бетон на песчано-пуццолановом цементе; 3 — бетон на шлакопортландцементе; 4 — бетон на порландцементе; 5—7 — бетон с небольшим содержанием цемента, 8 — раствор на цементе с 60% порландцементе и 40% сентилеевского диатомита; 9 — раствор с 50% порландцементе и 50% сентилеевского диатомита.

тактного слоя из цементного камня и щебня из песчаника, афонитового известняка и доломита. Опыты по водонепроницаемости были поставлены на малоалюминатном портландцементе (250 кг на 1 м³ бетона) при достаточно высоком водоцементном отношении 0,70—

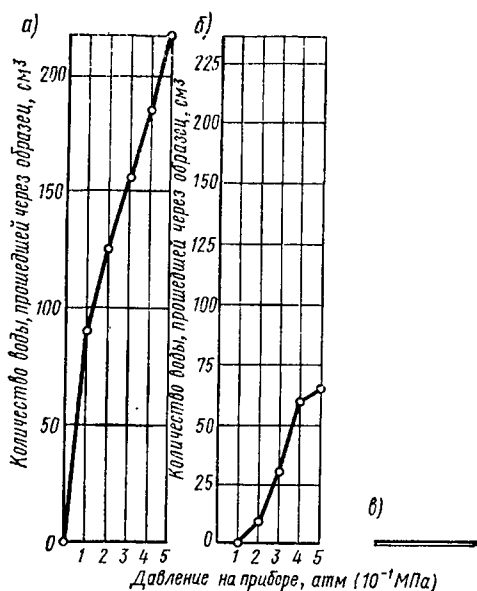


Рис. IV.12. Водонепроницаемость лабораторных образцов на разных заполнителях (количество воды в см³, прошедшей через образец $d=15$ см, $h=15$ см за 30 мин):

- а — бетон на песчанике — 217 см³; $K=2,02 \cdot 10^{-6}$ м/с;
- б — бетон на известняке — 65 см³; $K=0,61 \cdot 10^{-6}$ см/с;
- в — бетон на доломите — 1 см³; $K=0,01 \cdot 10^{-6}$ см/с

породы каменного материала на качество сцепления цементного камня и поверхности заполнителей, на прочность бетона (в итоге на качество такого сцепления) существенно влияет форма зерен мелкого и крупного заполнителя.

Если влияние крупного заполнителя на прочность бетона учитывают, изменяя коэффициент m , например, в формуле $\bar{R}_6 = m R_{ц} \left(\frac{Ц}{В} - 0,5 \right)$, то изменение качества песка не учитывается, что сказывается в несовпадении расчетных и экспериментальных показателей прочности при подборе состава бетона (см. § 41). По вопросам исследования причин изменения величины и качества сцепления цементного камня с заполнителем имеется ряд работ, например [25]. При изменении качества цемента приведенные цифры водонепроницаемости изменяются, что связано с ранее изложенными сведениями по вяжущим материалам и их водоотделению при твердении.

0,74 (что вызывалось необходимостью получать смеси на разных заполнителях с одной пластичностью-жесткостью). Такие бетоны имели различную водонепроницаемость. Так, бетон на крупном заполнителе — щебне из песчаника, испытанный по определенной методике, за 150 мин испытания при 5 ат (10⁻¹ МПа) профильтровал 217 см³ воды, на щебне из афонитового известняка — 65 см³, а на щебне из доломита — 1 см³ (рис. IV.12). При изменении технологии уплотнения водонепроницаемость бетона изменяется: при многократном повторном вибрировании она будет значительно меньшей, что связано с повышением качества контактного слоя, из которого отделяется часть воды.

Отметим, что кроме

§ 31. Влияние прочности крупного заполнителя на прочность бетона

Между показателем прочности бетона и прочностью крупного каменного заполнителя существует эмпирическая зависимость: для бетонов ниже М300 $R_{\text{камня}} \geq 1,5 R_b^*$, для бетонов М300 и выше $R_{\text{камня}} \geq 2R_b$.

Однако при решении практических задач, связанных с выбором месторождений каменных материалов, в ряде случаев указанная зависимость трактуется неправильно. Действительно, анализ табл. IV.19 показывает, что для бетона прочностью 150, 200, 300 и 400 кг/см² (10⁻¹ МПа) можно использовать разнообразные каменные материалы, свойства которых различны.

Таблица IV.19

Марка бетона	Предел прочности камня при сжатии (по расчету), кг/см ² (10 ⁻¹ МПа)	Горная порода	Предел прочности камня при сжатии, кг/см ² (10 ⁻¹ МПа)	Кажущаяся или открытая пористость камня, % по объему
150	$150 \times 1,5 = 225$	Известняк разного генезиса Доломитизированный известняк, мраморизованный известняк	120—2600	30—2,5
200	$200 \times 1,5 = 300$		200—2600 1250	30—2,5 1,24
300	$300 \times 2 = 600$	Песчаник с халцедоновым и кварцевым цементом Кварцито-песчаник	1970—3600	11,0—0,30
			3280	0,40
400	$400 \times 2 = 800$	Гранит биотитовый Диабаз карельский Гранито-гнейс	1990—2050	0,55
			3300	0,18
			3080	0,22

В табл. IV.20 приведен перечень характеристик камня, позволяющих с надлежащей обоснованностью решить область его использования.

Как видно из краткого перечня, каждая из пород может быть использована для приготовления бетона указанных марок (кроме известняка с пределом прочности при сжатии 280 кг/см² (10⁻¹ МПа), который в соответствии с ранее указанной зависимостью можно применить только в бетонах М150 и М200. Однако из-за различного сцепления с цементным камнем перечисленных каменных материалов, несмотря на значительно более высокие показатели их прочности, не этот показатель определяет прочность бетона. Она определяется прочностью цементного камня, которая в свою очередь определяется водоцементным отношением. В табл. IV.21 показана прочность бетона на щебне из разных горных пород

* Эта зависимость поможет ориентироваться при выборе каменных материалов по показателю прочности.

Характеристика камня для определения области его применения в бетоне	Приемы определения характеристики камня
Химический и петрографический составы	Химический и микроскопический анализы
Предел прочности при сжатии в разных состояниях камня	На специально приготовленных образцах при стандартном испытании на раздавливание или кусков камня в полочном барабане
Прочность на удар и истирание	На специально приготовленных образцах различными приемами испытания
Долговечность камня	Испытание на многократное попеременное замораживание и оттаивание и насыщение водой
Реакционная способность	Различными нестандартными методами, дополняющими сведения из химического и микроскопического анализа
Плотность и объемная масса, однородность камня	Стандартными методами

Таблица IV.21

Горная порода	Плотность, г/см ³	Марка цемента	В/Ц бетонной смеси	Пластичность- жесткость смеси, см	Объемная масса бетона**, г/см ³	Водопоглощение бетона, %	Предел прочности бетона при сжатии, кг/см ² (10 ⁻¹ МПа)	
							воздушно-сухого	водонасыщенного
Песчаник	2,28—2,46	400*	0,70	2,0	2,22	1,1	382	364
Габбро	2,87—3,05	400	0,56	2,6	2,58	0,8	375	332

* Марка цемента по ОСТ-5036.

** В водонасыщенном состоянии.

Примечание. Образцы бетона на высококачественном портландцементе испытаны после 225 сут. твердения, из которых первые 90 сут. твердеют в нормальных условиях, далее — на открытом воздухе.

при одном и том же содержании цемента М400, песка, щебня и некотором различии в содержании воды (с учетом В/Ц)*.

Разносторонние исследования показывают, что разрушение бетона возникает по наиболее слабому его участку, которым является цементный камень. Визуальный осмотр образцов бетона после раздавливания убеждает в этом. При испытании образцов бетона высокой прочности можно увидеть разрушение отдельных зерен крупного заполнителя, которые имели лещадную или игольчатую форму, в силу развития в них напряженного состояния, или разрушения зерен гравия (щебня) неоднородного состава. Действительно, во многих случаях нецелесообразно дифференцировать такие заполнители по прочности зерен.

* Этот показатель при прочих равных условиях зависит от заданной пластичности-жесткости, которая связана с качеством заполнителей и по этой причине может изменяться в широких пределах.

Если приготавливается бетон высоких марок, такое разделение каменного материала обязательно [10, 16, 17, 40, 63, 71]; в этом случае особое внимание надо обращать на получение зерен оптимальной формы, близкой к равностороннему многограннику. Из табл. IV.22 видно, что состав горных пород (известняков, известковых доломитов, доломитов, песчаников) сказывается на количестве воды, которую надо вводить в бетонную смесь, чтобы получить заданную пластичность-жесткость (например, при одинаковом количестве воды осадка конуса смеси на известняковом щебне получается равной 0,5 см, на более плотном щебне — 3,5 см, на песчанике — 12,7 см). Следовательно, особенности крупного заполнителя (пористость, вид поверхности, форма зерен, зерновой состав, в том числе наибольшая крупность), отвечающего по прочности эмпирическому правилу $R_{\text{камень}} = 1,5 R_b$, в конечном счете определяют прочность бетона, когда он применяется в конструкциях, рассчитываемых только на прочность *. Однако применение каменных материа-

Таблица IV.22

Номер состава бетона	Горная порода	Гредел прочности при сжатии горной породы, кг/см^2 (10^{-1} МПа)		Водопоглощение горной породы, %	В/Ц бетонной смеси	Пластичность-жесткость бетонной смеси, см	Предел прочности бетона при сжатии через 28 сут., кг/см^2 (10^{-1} МПа)
		воздушной сушки	вдоныс-щенной				
1	Известняк	250—730	220—550	4,0—8,9	0,49—0,54	2,2	320—440
		150—350	280	6,7—9,5	0,46—0,51	0,5	350—450
		910—2300	780—2300	0,2—3,9	0,49	1,3	405
	Известковый доломит	—	1040	2,0	0,49	2,4	519
		580—2200	2080	0,8—1,3	0,49	2,1	450
		590	680	0,8—3,0	0,49	2,2	470
	Доломит	750—1190	640	2,3—11,0	0,49	2,5	470—530
	Песчаник	1900—3600	1800—3600	0,6—1,6	0,47	6,8	430
	Известняк	250—730	220—550	4,0—8,9	0,71—0,80	0,5—4,5	200—250
		150—350	280	6,7—9,5	0,73—0,76	0,2—2,0	140—210
2		910—2300	180—2300	0,2—3,9	0,73	15,0	140
	Известковый доломит	—	1040	2,0	0,73	1,5	220
		580—2200	2080	0,8—1,3	0,71	3,5	185
		591	680	0,8—3,0	0,73	7,0	180
	Доломит	750—1190	640	2,3—11,0	0,73—0,80	0,8—7,0	170—240
	Песчаник	1900—3600	1800—3600	0,6—1,6	0,71	12,7	165

Примечания: 1. Состав № 1 приготовлен на портландцементе активностью 500 кг/см^2 (10^{-1} МПа), состав № 2 на смешанном цементе, в котором 70% портландцемента (состав № 1) и 30% песка, молотого до тонкости помола портландцемента. Составы, помеченные знаком «*» приготовлены на цементе того же состава, но с меньшей активностью, примерно равной 400 кг/см^2 (10^{-1} МПа).

2. В таблице даны предельные значения отдельных показателей. Различие в В/Ц вызвано неодинаковым водопоглощением щебня, так как бетонные смеси подбирались из условия получения их пластичности-жесткости, близкой к 0,5—4 см. Образцы бетона приготовлены на доломитовом щебне с водопоглощением, близким к нижнему показателю — 2,3%.

* Имеется в виду случай, когда к комплексной марке бетона предъявляется требование — прочность.

Таблица IV.23

№ п/п	Цемент	В/Ц бетона	Крупный заполнитель (горная порода)	Распределение образцов (% к общему количеству) по баллам											
				10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	0	
1	Портландцемент	0,54—0,71	Щебень (габбро)	75,0	17,5	7,5	—	—	—	—	—	—	—	—	
		0,48—0,72	Щебень (песчаник)	34,0	54,0	10,0	2,0	—	—	—	—	—	—	—	
		0,52—0,72	Гравий (смешанный)	22,0	70,0	4,5	—	1,0	0,5	1,5	—	—	—	0,5	
2	Пуццолановый портландцемент	0,54—0,75	Щебень (габбро)	—	23,0	35,0	33,0	5,0	5,0	4,0	—	—	—	—	
		0,54—0,70	Щебень (песчаник)	11,0	25,0	43,0	16,0	3,0	—	1,0	—	—	—	1,0	
		0,54—0,70	Гравий (смешанный)	2,0	4,0	10,0	3,0	6,0	13,0	15,0	12,0	21,0	6,0	3,0	
3	Песчано-пуццолановый портландцемент	0,47—0,72	Щебень (габбро)	—	1,0	9,0	3,0	6,0	1,0	—	—	12,0	18,0	3,0	47,0
		0,58—0,70	Щебень (песчаник)	—	11,0	29,0	11,0	4,0	8,0	16,0	8,0	8,0	4,0	4,0	1,0
		0,50—0,70	Гравий (смешанный)	—	—	10,0	1,0	2,0	2,0	2,0	14,0	3,0	7,0	59,0	—
4	Глиноземистый	0,60—0,71	Щебень (габбро)	25,0	35,0	37,0	1,6	—	1,5	—	—	—	—	—	—
		0,58—0,74	Щебень (песчаник)	9,0	25,0	18,0	13,0	7,0	8,0	12,0	5,0	3,0	—	—	—
		0,52—0,72	Гравий (смешанный)	8,0	25,0	15,0	37,0	4,0	4,0	4,0	—	3,0	—	—	—
5	Песчано-глиноземистый	0,58—0,62	Гравий (смешанный)	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	100,0

Примечания: 1. Испытание протекало 300 сут., за которые образцы прошли 210 циклов замораживания и оттаивания или 600 раз смены условий нахождения образцов в воде и на воздухе. 2. Цементы № 2 и 3 приготовлены на основе цемента № 1.

лов со значительным водопоглощением и разным водонасыщением зерен щебня усложняет производство бетонных работ, так как миграция воды в каменные материалы резко изменяет пластичность-жесткость смесей. Каменные материалы, в которые уходит часть воды из цементного теста, предварительно насыщают водой.

§ 32. Влияние морозостойкости крупного заполнителя на морозостойкость бетона

Морозостойкость гравия, щебня, гальки, булыги, которые используют в качестве крупного заполнителя в бетоне, имеет решающее значение при их выборе для зон конструкций (сооружений), работающих в условиях многократного попеременного воздействия воды и отрицательных температур. Опыт показывает, что в одних случаях цементный камень защищает от разрушения неморозостойкий гравий (щебень), а в других разрушение бетона непосредственно связано с разрушением неморозостойких зерен крупного заполнителя, т. е. защитная роль цементного камня носит временный характер.

В каждом из указанных случаев необходимо учитывать плотность цементного камня и длительность насыщения бетона водой, которая различна для бетонов разного состава и условий твердения. Насыщение гравия (щебня) водой происходит через цементный камень. По указанным причинам при одинаковом количестве неморозостойких зерен в одном случае сначала начинают разрушаться такие зерна и морозостойкая растворная часть бетона, в другом — в начале разрушается неморозостойкий раствор, а затем неморозостойкие зерна крупного заполнителя. Следовательно, в зависимости от плотности раствора в бетонах на неморозостойком гравии (щебне) наблюдается разное разрушение.

При совместном действии воды и мороза монолитность бетона нарушается тем в большей степени и тем позднее, чем больше неморозостойких зерен и плотнее цементный раствор. Опыты показывают, что защитное действие любого слоя, наложенного на поверхность бетона, только тогда эффективно, когда сам слой непроницаем для воды (не пропускает ее). По этой причине нанесение торкретного слоя цементного раствора лишь отдалает сроки насыщения зерен гравия (щебня) водой, следовательно, отдалает разрушение бетона, но не предотвращает его.

Опыты по защите бетона битумной пленкой показали, что при понижении температуры воздуха эти пленки становятся хрупкими, начинают отслаиваться и терять сплошность, что приводит к постепенному насыщению бетона водой и разрушению. Такой же отрицательный результат получен при покраске или пропитке образцов бетона этинолевым лаком. В табл. IV.23 приведены результаты испытаний на морозостойкость бетонных образцов размером ребра в 20 см, осуществленных в естественных условиях в приливно-отливной зоне Кольского залива.

Анализируя табл. IV.23, можно сделать следующие выводы:

1. Неморозостойкость крупного заполнителя, как и небольшая адгезия * цементного камня с поверхностью его зерен (в нашем случае с поверхностью щебня из песчаника), хорошо прослеживается при испытании бетонных образцов на портландцементе и глиноземистом цементе с относительно более высокой морозостойкостью (№ 1 и 4); в этом случае разрушение бетона связано с указанными обстоятельствами.

2. При приготовлении бетона на неморозостойких заполнителях и растворе с морозостойкостью, пониженной против исходного

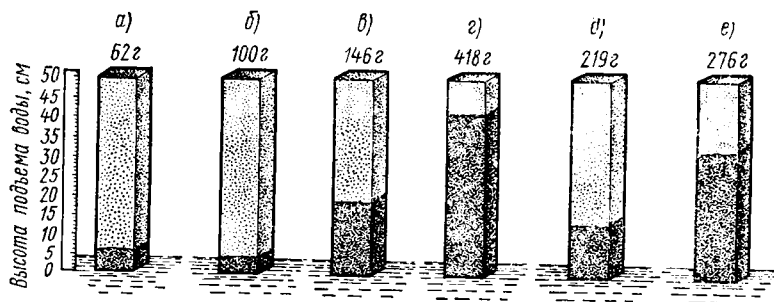


Рис. IV.13. Капиллярный подсос воды в образцах бетона на различных цементах (цифры на призмах указывают на количество поглощенной воды): а — на глиноземистом цементе; б — на песчаноглиноземистом цементе; в — на портландцементе; г — на пуццолановом цементе; д — на трехкомпонентном цементе; е — на гипсошлаковом цементе

портландцемента (цементы № 2 и 3), процесс разрушения бетона протекает не только по зернам гравия, но и по отдельным местам растворной части (что подтверждается при сопоставлении результатов испытания образцов на цементах № 4 и 5, изготовленных путем введения 50% мелкомолотого песка от массы цемента); бетон на смешанном цементе № 5 разрушается из-за быстрого насыщения неморозостойкого гравия водой, что обусловлено особенностями такого цемента, и его разрушения в пределах указанного цикла замораживания, а также разрушения растворной части бетона, имеющей недостаточную морозостойкость.

3. При анализе таблицы надо иметь в виду, что в силу строения капилляров в цементном камне неморозостойкие зерна гравия насыщаются с разной скоростью, что и отражается на скорости их последующего разрушения в бетоне при замораживании воды (рис. IV.13); анализ образцов после меньшего числа циклов (30 циклов испытания) показывает, что наиболее стоек бетон на песчано-пуццолановом цементе и с высоким содержанием известняковых неморозостойких зерен; это объясняется более медленным их насыщением водой; так, в силу наличия более крупных капилляров в

* Адгезия — свойство одного материала прилипать к поверхности другого.

растворе часть воды при очередных циклах замораживания систематически испаряется (рис. IV.14).

Для определения капиллярного подсоса и испарения в цементном камне разной структуры (в данном случае с различными капиллярами) было изготовлено четыре состава цементного камня $V/C=0,35$ из мелкоалюминатного клинкера без гипса, с гипсом,

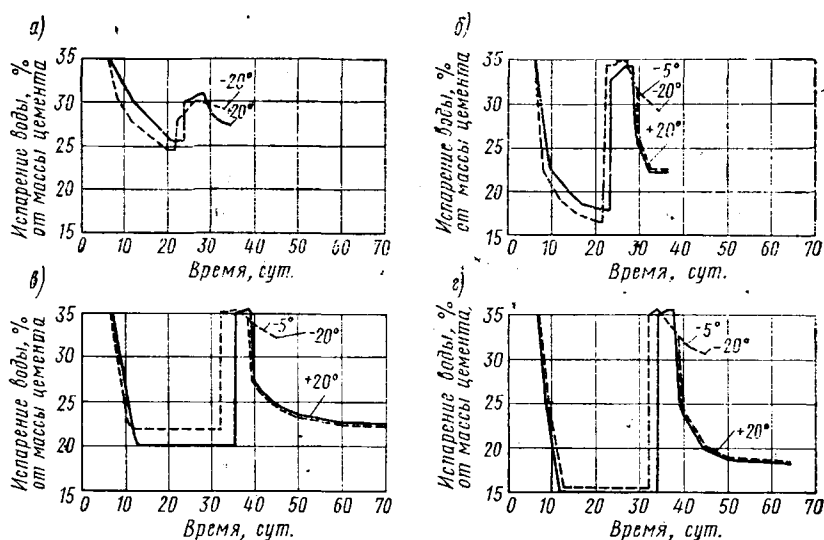


Рис. IV.14. Кривая испарения воды из цементного камня разной структуры и последующего капиллярного подсоса:

а — образцы из малоалюминатного безгипсового вяжущего без минеральных добавок; б — образцы из заводского портландцемента с добавкой 30% минерального порошка, гипс отсутствует; в — образцы из заводского портландцемента с добавкой 20% минерального порошка; г — образцы из заводского портландцемента с добавкой 30% минерального порошка

без гипса со стандартным содержанием минеральных добавок и соответственно каждый из них с 30% микронаполнителем; образцы цементного камня до испытания твердели 7 сут. в нормально влажных условиях; образцы 7-суточного твердения при температуре -20°C подвергали высушиванию до постоянной массы, последующему капиллярному насыщению и повторному высушиванию при различных температурах $+20$, -5 , -20°C . На графиках рис. IV.14 по оси ординат последовательно отложены числовые значения испаряющейся капиллярно подсосанной и повторно испаряющейся воды.

Опыт показал, что как при отрицательных, так и положительных температурах для образцов с крупными капиллярами одинаков эффект от испарения воды и отличается от образцов, в которых образована коагуляционная структура гидроалюмината (в этом случае быстрее испаряется вода при положительных температурах). Введение в цемент микронаполнителя увеличивает расстояние между флоккулами зерен цемента любого состава, в том числе и

без гипса, когда образуются коагуляционные структуры из трех-кальциевого алюмината. При любых температурах вода испаряется значительно быстрее в цементах с микронаполнителем при отсутствии в нем коагуляционных структур; капиллярный подсос протекает быстрее и полнее в образцах с микронаполнителем; при повторных циклах вследствие систематического углубления процесса гидролиза и гидратации цемента количество удаляемой из

образца воды уменьшается, т. е. цементный камень постепенно уплотняется.

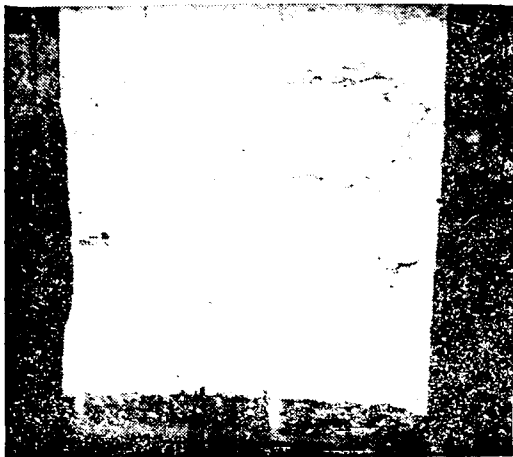


Рис. IV.15. Разрушение бетона при наличии неморозостойких зерен заполнителя

Указанный пример приведен для иллюстрации значения капилляров для насыщения водой влагоемких пород гравия (щебня); он не связывается нами со сроками насыщения пород при длительных многократных циклах испытания бетона. Для цементов с разными минеральными добавками (цементы № 2, 5) насыщение зерен гравия с высокой влагоемкостью произошло быстрее, чем в бетонах без минеральных микронаполни-

телей, следовательно, по этой причине произошло разрушение бетона в виде отслоения от образца растворной части (рис. IV.15).

Различие в скорости насыщения бетона водой связано с условиями длительного попеременного замораживания и оттаивания, вследствие того что из-за систематического накапливания воды в неморозостойких зернах гравия (щебня) происходит разрушение бетона любого состава и на любом цементе, в данном случае по причине наличия неморозостойких разностей крупного каменного материала. Здесь надо различать условия службы материала в различных конструкциях, которые в нашем опыте не моделируются.

В рассматриваемом примере образец насыщается водой после каждого цикла замораживания и оттаивания. В натуральных условиях, например в дорожных и аэродромных покрытиях, после обводнения дождевой водой из бетона перед замораживанием происходит испарение воды. В плитах откосов каналов, в гидротехнических или мостовых конструкциях, находящихся в переменном горизонте воды, а также на глубине промерзания для неморозостойкого гравия (щебня) лабораторные опыты близки к указанным случаям службы бетона, что надо учитывать при решении вопроса о допустимости использования крупного заполнителя. В бетонах для

инженерных конструкций, рассчитываемых на длительный период службы, применяется плотный раствор, поэтому оба случая различия в водонасыщении неморозостойких зерен крупного заполнителя не имеют практического значения.

Действительно, в любом из случаев, как видно на рис. IV,15, в плотном растворе бетона из-за частичного испарения воды постепенно накапливается влага в неморозостойких зернах крупного заполнителя, следовательно, разрушение бетона из-за разрушения таких зерен связано лишь со скоростью водонасыщения или с числом циклов замораживания и насыщения водой после оттаивания. Итак, этот процесс для одних и тех же бетонов определяется климатическими условиями, в которых находится конструкция (сооружение).

Рассмотрим некоторые случаи разрушения растворной части при наличии в бетонах неморозостойких влагоемких включений [67, 70, 72, 74]. Были поставлены опыты по замораживанию и оттаиванию растворных образцов-кубиков: из затвердевшего гидратированного трехкальциевого алюмината, гидросульфоалюмината, гидратированного алюмоферрита и спрессованного на основе с. с. б. молотого известняка. Для растворной части использован цемент с низким содержанием минерала С₃A. Раствор готовился двух составов — 1 : 2 и 1 : 4, одной подвижности в 137—140 мм и с В/Ц соответственно 0,30 и 0,57. Внутри раствора заделывались кубики размером 1×1×1, кубики из раствора имели размер ребра 7,07 см. Эталоном служили аналогичные составы раствора, но без заделанных внутри кубиков.

Эти опыты приближенно моделируют поведение влагоемких пород (зерен гравия и щебня) в плотном растворе бетонов. В этих опытах с полной очевидностью вновь подтвердилось влияние коагуляционных структур гидратированного трехкальциевого алюмината на скорость водонасыщения влагоемких и неморозостойких включений в растворе. В серии опытов с такими включениями растворные образцы изготавливались без гипса и с 3 и 5% гипса. Образцы на высокоалюминатном цементе с 5% гипса после 140 циклов не имели видимых трещин.

Для оценки состояния заделанных влагоемких кубиков после 50 и 130 циклов испытания образцы раскалывали и проверяли влажность маленьких кубиков из гидратированного трехкальциевого алюмината. Влажность этих образцов оказалась в среднем равной 5% от их массы, т. е. влагонасыщение в пределах указанных циклов испытания не изменилось, и они не потеряли прочности.

Образцы на безгипсовом цементе уже через несколько циклов испытания начали покрываться трещинами и спустя 15—25 циклов теряли форму, распадаясь на куски. Каждый кусочек такого растворного образца был прочен и достаточный период времени не разрушался при дальнейшем испытании на совместное действие воды и мороза. Причиной разрушения кубика из раствора является водонасыщение (доходящее до 13%) заделанного в раствор кубика, который превратился при водонасыщении в бесформенный влаж-

ный, мягкий и пластичный материал. При рассмотрении разрушенных растворных кубиков внутри оказалась разжиженная масса белого цвета из гидратированного трехкальциевого алюмината, близкая по состоянию к разрушенным образцам мягкого известняка.

Разрушение кубиков на стандартных цементах происходит за больший период времени. При заделке кубиков из гидросульфата алюмината также происходит разрушение. Однако в этом случае, как и при заделке кубиков из синтетического алюмоферрита, ско-

Таблица IV.24

№ п. п	Состав раствора	В/Ц	Заделанные кубики		Число циклов замораживания и оттаивания и состояние растворных образцов
			размер, см	количество	
I	1:2	0,30	1×1×1	1*	Больше 200 циклов; изменений нет То же » »
	1:2			4	
	1:2			8	
	1:2			27	
	1:2		Эталон	0	199 циклов; откол двух углов от растворных кубиков с 5 маленькими кубиками Больше 200 циклов; изменений нет
II	1:4	0,57	1×1×1	1*	То же » » »
	1:4			4	
	1:4			8	
	1:4			27	
	1:4		Эталон	0	Разрушение к 187 циклам Больше 200 циклов; изменений нет
III	1:2	0,30	2×2×2	1*	То же 60 циклов; образовалась большая трещина, раскололся образец Снят с испытания после 56 циклов
	1:2		3×3×3	1*	
	1:2		5×5×5	1*	
IV	1:4	0,57	2×2×2	1*	Сильное разрушение к 120 циклам Сильное разрушение к 60 циклам
	1:4		5×5×5	1*	

* Кубики находились в центре растворных кубиков.

рость разрушения зависит от глубины заделки такого кубика от поверхности растворного образца. Трещины на растворных образцах появились через 40—175 циклов. Эталонные растворные образцы, не содержащие влагоемких, деформирующихся при изменении влажности материалов, в зависимости от состава раствора не разрушались в течение различного по длительности периода испыта-

ний. В табл. IV.24 и на рис. IV.16 приведены результаты таких же испытаний образцов, но с «начинкой» разным количеством маленьких кубиков из спрессованного известняка. Включение более крупных кубиков из неморозостойких материалов вызывает более раннее разрушение.

Сказанное подтверждает условия, влияющие на разрушение неморозостойких зерен крупного заполнителя в бетоне; это вид це-

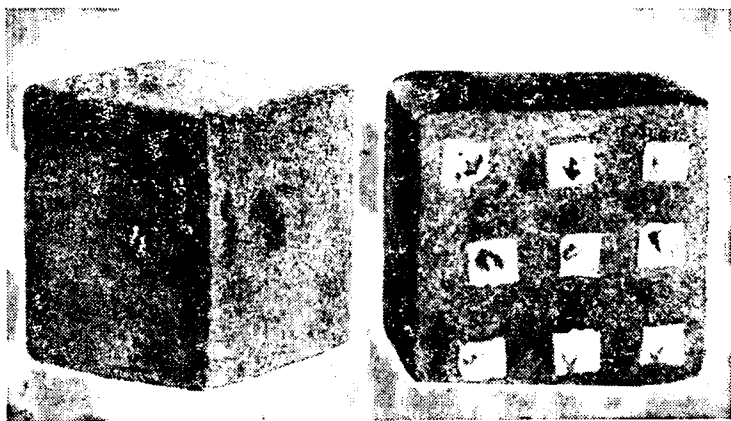


Рис. IV.16. Разрушение образца с прессованными кубиками в нем из карбонатного порошка

мента и состав раствора, в том числе его водоцементное отношение, размеры и число неморозостойких включений, условия формирования растворной смеси и цементного камня*.

Действительно, в растворные кубики одного состава (опыты серий I и III, II и IV) независимо от плотности и, следовательно, от его «жирности» и В/Ц включение образцов с ребрами 3 и 5 см (вместо 1 см) резко ускоряет их разрушение, также как и увеличение числа таких неморозостойких включений, но меньшего размера. И в этом случае до определенного числа циклов испытания большая морозостойкость растворных образцов связана с менее плотным составом (1 : 4), когда обеспечивается большее испарение влаги, поступающей в образец при оттаивании в воде после очередных циклов замораживания. Насыщение водой наружных слоев растворного кубика до критического предела происходит ранее, чем глубоких, поэтому разрушение начинается с потери их формы, откола внешних граней.

* Данный вывод также был подтвержден в этих испытаниях, когда замораживанию и оттаиванию подвергались одни и те же образцы, например, с различными сроками твердения.

Остановимся на кажущемся противоречии в опытах по испытанию растворных образцов с включенными в них кубиками из гидросульфоалюмината. Сказанное о резком повышении морозостойкости бетонов (растворов), содержащих рациональное количество гипса, введенного при помоле клинкера для регулирования сроков схватывания цемента, и, следовательно, для разрушения образующихся при его твердении коагуляционных структур из гидратирующегося трехкальциевого алюмината следует связывать с фактом разрушения гидросульфоалюмината. Характер разрушения кубиков гидросульфоалюмината позволяет судить о его морозостойкости. Безусловно, гидросульфоалюминат не обладает высокой морозостойкостью по сравнению с морозостойкостью гидратированных силикатных систем (см. § 64). Однако различны условия образования гидросульфоалюмината из смеси гипса и трехкальциевого алюмината при затворении водой и гидросульфоалюмината при гидролизе и гидратации цемента из сплава минералов полиминерального цемента при введении в смесь гипса. Любая структура (горных пород и технических систем) не может анализироваться без учета условий ее образования (что иллюстрируется, например, анализом строительно-технических свойств шлаков).

Гипс, разрушая коагуляционные структуры гидратирующегося трехкальциевого алюмината, улучшает, упрочняет и уплотняет образующиеся гидратированные силикатные системы (из минералов C_3S , C_2S и др.). Распределение в них гидросульфоалюмината имеет дисперсный характер, так как исходный продукт — минерал C_3A , являющийся составной частью промежуточного вещества, находится в ультрамикроскопических образованиях в структуре цементного клинкера и распределен в нем достаточно равномерно. Следовательно, что отмечается и при анализе шлифов гидратированных соединений, эти кубики намного меньше кубиков с ребром в 1 см. Поэтому напряжения при его разрушении, если бы они произошли, были бы также во много раз меньше. Кроме этого, гидросульфоалюминаты в цементном камне всегда будут (в большей или меньшей степени) закрыты — блокированы от доступа к ним воды кристаллическими непроницаемыми оболочками из стойких соединений — новообразований из силикатных материалов и систем капилляров, амортизированных воздухом (см. § 11 и 47). Чем больше в цементном камне таких соединений и меньше гидросульфоалюмината, тем выше степень их закрытия от воды.

Более полное измельчение цемента для реализации возможности введения гипса в цемент в эквимолекулярном отношении к количеству минерала C_3A (примерно в соотношении 2:1) при высоком содержании минерала C_3S и при введении оптимальных количеств гидрофилизирующих и гидрофобизирующих добавок (см. § 46), которые также можно называть добавками пептизирующими, пластифицирующими, воздухововлекающими и способствующими длительности эффекта заполнения воздухом (газом) систематически образующихся контракционных объемов в твердеющем цементном тесте (добавок, диспергирующих воздух — газ в цементном

камне — цементном тесте), имеет большой научный и практический интерес. Добавки в бетоне позволяют резко снижать расход воды в его составе, переводя отделившуюся при твердении цементного теста воду из цементного объема в текстуру бетона (раствора), а следовательно, и увеличивать плотность технического камня. Сказанное объясняет причину повышения морозостойкости раствора в бетонах при наличии в нем неморозостойкого материала.

Следовательно, разрушение кубиков гидросульфаталюмината в растворных образцах связано с отсутствием защитных средств для его стойкой работы. Раствор в этом случае является проводником для воды, подсосываемой в кубиках по капиллярам цементного камня. Это же происходит и в бетоне при наличии зерен заполнителя, имеющих с цементным камнем только адгезионную связь.

§ 33. Влияние реакционной способности крупного заполнителя на технические свойства бетона

Вопрос о влиянии реакционной способности крупного заполнителя на технические свойства бетона возник в результате массового разрушения бетонных и железобетонных конструкций. Причины разрушения не были типичными для регистрируемых случаев выхода конструкций из условий их надежной работы. Обычно такие разрушения возникают из-за коррозии бетона при действии на кремнезем заполнителя окислов K_2O и Na_2O , находящихся в цементе. Присутствие этих окислов в цементе всегда считалось нежелательным, так как они влияют на ускорение сроков схватывания. При относительно небольшом выпуске цементов удавалось применять сырье, не содержащее указанных окислов.

Бурное развитие цементной промышленности способствовало широкому использованию сырья, переработка которого приводила к выпуску цементов с разным количеством таких окислов. В 40-х годах после длительного изучения удалось сформулировать причину коррозии. Ее связали с наличием реакции между окислами цемента (K_2O и Na_2O) и реакционноспособным крупным заполнителем — реакционноспособным кремнеземом. Пока нет убедительных сведений о механизме процесса, условиях его протекания, времени завершения или всех условий, приводящих бетон к деструкции. Исследовательские работы в этой области продолжаются во многих странах.

Рассмотрим некоторые широко известные случаи разрушения бетона от указанной коррозии, в частности, дорожного покрытия, морских бетонных набросок из массивов-гигантов, деталей жилого строительства, мостов. Можно назвать следующие случаи агрессии: 1) плотин Паркер, Аунхи, Кулидж, Баулдер (США); 2) дорожных покрытий, бортового камня (Канада); 3) различных фундаментов промышленных сооружений; 4) фундаментов под опоры контактной сети, мостов и др. (рис. IV.17, а, б).

Причины возникновения указанных необратимых процессов, связанных с разрушением сооружений (конструкций), еще не име-

ют точных теоретических объяснений. Однако определено, что разрушение — результат расширения новообразований в цементном камне, формирующихся при взаимодействии щелочей (на базе



Рис. IV.17. Вид щелочной коррозии бетонных конструкций

окислов $K_2O + Na_2O$, входящих в состав цемента) и аморфной кремнекислоты горных каменных пород — крупного заполнителя. Горные породы, содержащие аморфный кремнезём и используемые в виде крупного заполнителя, в стандартах до сих пор не дифферен-

цированы на породы, которые не вызывают и могут вызвать разрушение бетона.

Первые из них названы реакционно способными. Реакционную способность пород можно определить различными методами; весьма объективен для этой цели метод деформации (расширение балочек из бетона). При этом методе необходимо учитывать исходные сведения о химическом составе цемента, петрографическом анализе горной породы и величине растворимого из них кремнезема.

Реакционно способными разновидностями кремнезема являются кварц, опал, халцедон *, тридимит, кристобалит. Кварц, тридимит и кристобалит содержат около 100% SiO_2 . В табл. IV.25 приведен химический состав указанных пород, а в монографии [15] можно найти подробные сведения о породообразующих минералах.

Таблица IV.25

Горная порода	Химический состав, %					
	SiO_2	H_2O	щелочи	$\text{CaO}+\text{MgO}$	Al_2O_3	Fe_2O_3
Опал $\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$. .	92,0	7,75	—	—	—	0,25
Сердолик	94,0	1,0	0,05	—	3,5	—
Агат	98,8	0,2	—	0,62	—	—
Кремень и др.	95,2	4,0	0,10	0,78	—	—

Халцедон — название группы указанных выше и ряда других минералов: роговика — непрозрачного, матового или черного халцедона, встречающегося в породах в расслоенной или массивной форме; кремния, темного халцедона, часто встречающегося в виде конкреций в горных породах и преимущественно в мелу; яшмы — красного, непрозрачного халцедона, содержащего примеси железа. Роговик, кремень, агат, яшма и некоторые другие плотные микрокристаллические разновидности кремнезема состоят, главным образом, из тонкого кварцевого каркаса с большим количеством микропор. Интересно отметить, что агат легко отличим от других минералов группы халцедона по характерному для него чередованию различных окрашенных полос или концентрических зон.

Опал — водная скрытокристаллическая коллоидная форма кремнекислоты — имеет большую гамму цветов: молочно-белого, желтого, красного, зеленого, голубого, черного, а некоторые разновидности бесцветны и обнаруживают перламутровый блеск. Эти минералы можно расположить по уменьшению их реакционной способности (активности к соединениям со щелочными окислами) в следующем порядке: опал, группа халцедоновых минералов, кристобалит, тридимит (табл. IV.26). Указанные минеральные обра-

* Халцедон — тонкокристаллический кремнезём — плотная разновидность микрокристаллического кварца, состоящая из мельчайших кристаллов кварца с субмикроскопическими порами, т. е. с еще более мелкими порами. Разновидности халцедона — сердолик, агат, кремень и др.

Таблица IV.26

Горная порода	Химический состав, %					
	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	FeO	MnO
Кварц *	99,0—99,79	≤0,048	0,02—0,042	≤0,07	≤0,36	≤0,02
Тридимит ** . .	95,1	0,26—0,28	2,4—2,7	0,36—0,25	—	0,003—0,005
Кристаллит **	98,4	—	0,35	—	0,68	—

Продолжение

Горная порода	Химический состав, %					
	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	H ₂ O ⁺	H ₂ O ⁻
Кварц *	≤0,09	≤0,01	—	—	≤0,39	≤0,13
Тридимит ** . .	0,3—0,03	0,4—0,2	0,80—0,67	0,37—0,75	—	—
Кристаллит **	—	0,85	—	—	—	—

* Существенная составная часть многих горных пород.

** Встречается в эффузивных породах.

зования связаны с осадочными, магматическими, эффузивными и вулканопластическими горными породами.

Исследования [42] показали, что активность указанных образований нельзя отрывать от анализа комплекса характеристик, т. е. не только химического, но и минералогического состава, структуры и текстуры горных пород. Например, реакционная способность горных пород в коррозионном процессе постепенно возрастает от основных к кислым породам и от полнокристаллических структур горных пород к породам с увеличенным содержанием стекла.

Эффузивные породы основного состава любой структуры могут применяться как крупный заполнитель в бетоне при использовании цементов, содержащих повышенное против норм количество щелочных окислов. Ряд горных пород (палеотипных — измененных, эффузивных) в процессе девитрификации * основной массы и параморфных превращений реакционноспособных модификаций кремнезема в кварц независимо от кислотности являются практически неакционноспособными [59].

При разведочных работах по определению мест добычи каменных материалов для бетона нельзя не учитывать их реакционную способность. Можно считать, что интрузивные и метаморфические породы, имеющие полнокристаллическую структуру, не содержат реакционноспособных минералов.

Наблюдениями установлено, что щелочная коррозия протекает с различной интенсивностью (от нескольких месяцев до десятков

* Девитрификация — расстекловывание, постепенное зарождение мельчайших кристалликов — кристаллитов; параморфное превращение — превращение связанное с приобретением веществом чуждой ему формы; кайнотипные горные породы — наиболее новые по формированию в геологической эре.

лет), точные условия которой для наступления критического состояния бетона пока не установлены. Ряд исследователей считают, что для протекания процесса между щелочными оксидами, находящимися в цементе, и реакционными минералами горных пород необходима влажная среда. Однако наблюдения показывают, что имеются разрушения бетона по указанной причине и в иных условиях эксплуатации конструкций (в воздушно-влажных условиях с различной величиной относительной влажности воздуха).

Отмечается, что в бетонах, на поверхности которых появились трещины, вокруг зерен с реакционными минералами при применении цементов со щелочами образуются слои новообразований. Реакция между щелочью и зерном таких заполнителей изменяет их на значительную глубину. Зерна песка с реакционноспособными минералами при наличии в цементе окислов выше условного норматива в 0,6% * также приводят к появлению на поверхности бетона трещин, что означает его коррозию по всей толще.

Так, при щелочной коррозии массивного бетона одной из плотин в США уже через два года после окончания строительства были зарегистрированы в разных ее частях трещины различного размера вследствие реакции между реакционноспособными заполнителем и щелочами в цементе **. При этом на глубине 0,75—1,5 м от поверхности бетона имелось расширение материала, а на меньшей — зафиксирована усадка. Начиная с 1,5 м и далее обнаружено расширение в 0,35%, что вызвало разрушение внешних слоев, обжатых по отношению к внутренним слоям.

Химический анализ зерен породы и их внешней деформированной оболочки показал значительные изменения: увеличилось содержание SiO_2 , Na_2O и уменьшилось содержание Al_2O_3 , CaO и MgO . (В США зарегистрированы случаи разрушения бетона при сочетании щелочей в цементе с заполнителями из кремнистых известняков, халцедоновых и опаловых сланцев, туфовых известняков, риолитовых и андезитовых вулканических пород, что согласуется с общими указаниями исследований [42, 59], о которых сказано выше.) Как отмечалось, реакция между двумя исходными компонентами (кремнеземом горных пород и щелочами цемента) при создании определенных условий в бетоне начинается с поверхностных слоев зерен заполнителя и идет вглубь. Продукты реакции имеют различное состояние (с истинного раствора до твердого тела), что зависит от ряда факторов, в том числе от количества щелочей, соотношения воды и цемента в бетоне.

В последних научных разработках критерий нижнего предела реакционно способного кремнезема в горных породах при их химическом анализе значительно вырос (с 50 до 200 ммоль/л), что показывает на необходимость дальнейших углубленных разработок причин и условий возникновения этого вида коррозии.

* Данный норматив условен, так как важно учитывать вид цемента.

** В заполнителе обнаружен халцедон и опал; в цементе присутствовало (в расчете на Na_2O) до 1,42% окислов.

Наличие в гравийном материале минеральных и органических примесей нормируется ГОСТ 8268—62: гравий не должен содержать засоряющих примесей и при обработке его раствором едкого натрия должен давать стандартный цвет (т. е. не быть темнее эталонного раствора).

Действительно, искусственный технический камень — бетон — может хорошо работать только при ряде условий, в том числе при условии, что поверхность склеиваемых минеральным клеем — цементным камнем зерен песка и гравия (щебня) не будет загрязнена глинистыми, илистыми, пылевидными частицами, не будет покрыта органическими примесями. Такие загрязняющие прослойки мешают непосредственному адгезионному контакту цементного камня и заполнителя. Следует иметь в виду, что объем этих заполнителей является основой — скелетом бетона. Цемент в нем должен лишь с небольшим избытком заполнять пустоты.

§ 34. ГОСТы и СНиПы на крупный заполнитель

На крупный заполнитель из горных пород имеется ряд нормативных документов, в которых приведены технические требования на крупный заполнитель для различных конструкций. Кроме этого, имеются документы, нормирующие качество искусственных заполнителей: керамзитового гравия, щебня из пористого металлургического шлака — шлаковой пемзы и щебня из доменного шлака для бетона. Керамзитовый гравий (щебень) из шлаковой пемзы применяются для приготовления легких бетонов.

Рассмотрим главные положения, лежащие в основе нормативных документов на крупный заполнитель для тяжелого бетона.

В ГОСТах гравий (щебень) регламентируется по размеру зерен. Зерновой состав гравия (щебня) должен быть в пределах от 5 до 70 мм (для отдельных случаев выше). В последнее время в требованиях делается особый акцент на фракционирование гравия (щебня). Однако указание на обязательность раздельного дозирования четырех фракций крупного заполнителя (щебня, гравия, щебня из гравия) — 5—10, 10—20, 20—40 и 40—70 мм дается только в ГОСТ 10268—62. В других ГОСТах говорится лишь о подразделении гравия (щебня) на четыре фракции, что в первую очередь связано с назначением максимальной крупности зерен при подборе состава бетона, и указывается на необходимость выбора отдельных или нескольких фракций с учетом требований таблицы стандарта. При этом полный остаток на ситах (% по массе) составляет:

Размер отверстий контрольных сит . . .	$D_{\text{наим.}}$	$0,5 D_{\text{наим.}} + D_{\text{наиб.}}$	$D_{\text{наиб}}$	$1,25 D_{\text{наиб.}}$
Полный остаток на ситах, %	95—100	40—70	0—5	0

Особое внимание уделяется генезису горных пород и получению гравия и щебня искусственным путем при обжиге глин, выплавке чугуна или при другой технологии. Как было показано при анализе петрографического состава гравия по генезису, его зерна исключительно разнообразны (значительно больше, чем щебня, при получении которого мы можем оценить исходную горную породу в монолите). Резкая неоднородность петрографического состава гравия учитывается в ГОСТе.

Для оценки прочности зерен гравия в бетоне в соответствии с его назначением в строительных работах, проводят лабораторные испытания на дробимость гравия в цилиндре или представительных* образцов горных пород при сжатии, истираемости в полочном барабане. Для гравия, используемого в балластном слое на железных дорогах, важно определение прочности при многократных ударах, которая проверяется на копре ПМ.

При эксплуатации бетонных и железобетонных конструкций в условиях многократного смачивания водой, замораживания и оттаивания особое значение приобретает морозостойкость крупного заполнителя. Многочисленные опыты показывают, что ускоренные испытания в растворе сернокислого натрия, а также в бетоне не позволяют с нужной достоверностью определить стойкость гравия при замораживании и оттаивании (см. § 67). Столь же важна и оценка качества гравия по его минерало-петрографическому составу в части определения в нем реакционно способного свободного кремнезема.

При определении качества гравия (природного щебня) необходимо убедиться в отсутствии в нем минеральных (глинистых, илистых и пылевидных) частиц и органических примесей. Если наличие первого вида примесей всегда связано с ухудшением таких технических свойств, как прочность, морозостойкость, то присутствие органических примесей влияет на процессы твердения цемента. В одном случае, когда органических примесей незначительно (что определяется по калориметрической стандартной методике), процесс гидролиза и гидратации цемента задержится, но постепенно приобретет нормальный характер. В другом случае — при содержании больших количеств органического вещества (гумуса) процесс твердения может затормозиться на длительный период, что недопустимо не только по условиям производства работ, но и по условиям формирования структуры цементного камня в конструкциях, когда бетон остается без надлежащего ухода.

В ГОСТах также отмечается значение формы зерен гравия (щебня), что связано с резким ухудшением свойств бетонной смеси, приготавливаемой на гравии (щебне), содержащем зерна пластинчатой — лещадной или игольчатой формы. К зернам указанных форм относят такие, толщина или ширина которых в 3 раза меньше

* Представительным считается образец, по которому можно оценить качество камня в месторождении. Такие образцы изготавливают в соответствии с правилами разведки нерудных материалов и оценки их качества.

их длины. Такие рыхлые смеси имеют значительно больший объем пустот, усложняют назначение максимального размера зерен, что связано, в первую очередь, с расстоянием в свету между арматурными стержнями (пучками).

Особенности технических условий на легкие искусственные заполнители связаны с их природой, что отражено в ГОСТах.

Керамзитовый гравий по объемной массе делят на 12 марок (от наиболее легкого с М150 до наиболее тяжелого с М800*). При выборе шлакового щебня важна стабильность — устойчивость структуры шлаковых фаз, гарантирующая шлаки от распада (силикатного и железистого, который проверяется по специальной методике). Легкий бетон используют не только для производства конструкций, но и как конструктивно-теплоизоляционный, а также теплоизоляционный материал, поэтому в СНиПе его подразделяют не только по прочности, но и по объемной массе на 10 марок (от 800 до 1800 кг/м³) в строгом соответствии с делением легких крупных заполнителей. Ранее сказанное о требованиях ГОСТов на тяжелые крупные заполнители в части оценки их зернового состава, прочности, морозостойкости, чистоты имеется и в ГОСТах на легкие заполнители.

В СНиП I-Д.2—62 «Автомобильные дороги. Материалы и изделия» качество крупного каменного заполнителя рассматривается применительно к специфике проектирования и строительства автомобильных дорог и, в частности, тяжелого бетона для покрытий. Естественно, что вопросы качества гравия (щебня), например для бетона, изложены в иной редакции, так как они должны быть увязаны с конкретными местами и условиями использования заполнителя.

Отличительной чертой указанного СНиПа, например для щебня цементнобетонных покрытий, является дифференциация требований по петрографическим особенностям исходной горной породы, категориям дорог и климатическим условиям. Для этой цели составлены таблицы, в которых все применяемые горные породы для приготовления щебня, а также гравий разбиты (условно) на классы и таблицы, в которых указаны технические нормы на гравий (щебень).

Деление горных пород на изверженные, метаморфические и осадочные может быть расширено на базе более детальных представлений об их генезисе [4, 17, 33]. То же следует сказать и о наименованиях горных пород, так как перечень названий недостаточен для ориентировки в качестве породы. Наиболее интересен показатель механической прочности, который определяют не только непосредственными испытаниями образцов, но и косвенно — испытаниями на истирание в полочном барабане.

* В специальных видах бетона, например для гравитационных сооружений атомных реакторов, в каждом случае выбирают крупный заполнитель с особыми качествами; в том числе и с наиболее высокой насыпной массой.

Таблица IV. 27

Слой дорожной одежды	Рекомендуемые классы щебня и его морозостойкость при категории дороги								
	I, II			III			IV, V		
	Климатические условия								
	суровые	умеренные	мягкие	суровые	умеренные	мягкие	суровые	умеренные	мягкие

Определение прочности путем раздавливания образцов на прессе практически не реализуется в силу сложности массового изготовления образцов из кусков камня. Поэтому замена таких испытаний истиранием в полочном барабане гравия (щебня) позволяет проводить широкие исследования прочности материала и контрольные испытания. Сопоставление обоих видов испытаний — предела прочности и потерь при истирании — дает информацию об условной прочности горных пород.

По происхождению и потерям при истирании горные породы делят на классы. Изверженные породы имеют три класса, метаморфические и осадочные — четыре. Необходимо отметить, что класс без названия горной породы не дает необходимой информации о качестве гравия (щебня). В отличие от щебня деление гравия связано с наличием в нем различных горных пород и с формой зерен. По этой причине для I класса гравия дана меньшая цифра потерь при истирании в полочном барабане (20% против 25% для щебня из прочных горных пород).

В табл. IV.27 приведена форма записи технических требований к щебню и гравия для дорожных одежд в зависимости от категории дороги и климатических условий.

В таблицах СНиПа в соответствии с категорией дороги и климатическими условиями эксплуатации указаны только два показателя качества гравия (щебня): класс (т. е. его прочность) и морозостойкость. При этом морозостойкость нормируется в пределах 25—150 циклов испытания, хотя в ГОСТ 8268—62 за максимальный показатель морозостойкости принято 300 циклов. ГОСТ 4797—64 предлагает иной метод назначения морозостойкости гравия (щебня), по которому испытывают крупный заполнитель непосредственно в бетоне и нормируют его морозостойкость по морозостойкости бетона.

Однако остается неясным, как назначать морозостойкость бетона (см. § 64). Известно, что разрушение бетона может иметь раз-

личные причины, и при наличии морозостойкой структуры дементного камня неморозостойкий крупный заполнитель окажется причиной разрушения бетона. Указанные вопросы являются результатом отсутствия обоснованных методов моделирования испытаний материалов на различные воздействия внешней среды.

Изучение качества бетонных покрытий, бордюрных камней и других дорожных сооружений, эксплуатируемых в различных климатических условиях, показывает, что в ряде случаев дефекты связаны и с учетом отдельных технических свойств, которые не могут быть определены требованиями СНиПа. Действительно, между прочностью материала (например, горной породы) и его морозостойкостью нет однозначной зависимости.

Прочность горной породы, ее условный класс не отвечают и на такой важный вопрос, есть или нет в нем реакционно способный кремнезем. Целенаправленное изучение всей совокупности качественных характеристик позволяет не только определить пригодность материала для использования в строительном производстве, но и направить усилия исследователей на разработку на базе естественных наук таких технических мероприятий, которые позволили бы скорректировать недостатки тех материалов, браковавшихся без такой корректировки качества.

§ 35. Арматура и ее виды

Отечественная промышленность выпускает арматурную сталь специально для армирования железобетонных конструкций (обычных и напряженно-армированных, любого вида и назначения). При этом надо учитывать возможность возникновения коррозии арматуры в некоторых видах бетона и агрессивной среде: в холодном бетоне с добавками хлористых солей без ингибитора коррозии в бетонах недостаточной плотности, подверженных коррозии в мягкой воде, где из него будет выщелачиваться известь, или в бетонах с некачественным защитным слоем, постоянно карбонизирующемся на воздухе, что вызовет коррозию арматуры молекулярным кислородом воздуха, и т. д.

Правильно запроектированный бетон надежен, долговечен в любых условиях эксплуатации железобетонных конструкций (сооружений). Бетон, армированный стальной арматурой позволяет конструкциям работать не только в условиях деформаций, предусмотренных расчетом, но и обеспечивает арматуре щелочную среду, в которой невозможна коррозия. Любое армирование вызывает не только трудоемкие работы по изготовлению, транспортированию и монтажу конструкций или объемных элементов, но и изменения максимального размера крупного заполнителя для бетонной смеси. Чтобы приблизить состав смеси для железобетона к конкретным условиям производства работ, нужно осуществить такое армирование, которое удовлетворит не только требованиям расчета данной конструкции (детали), но и техническим требованиям высококачественного бетонирования.

Арматурную сталь изготавливают двух основных видов: горячекатаную стержневую и холоднотянутую проволочную. Кроме этого, арматуру классифицируют по условиям применения и профилю. По условиям применения арматуру делят на ненапрягаемую — для изготовления ненапряженного железобетона и напрягаемую — для предварительно напряженного железобетона. Естественно, качество арматурной стали для обычного и предварительно напряженного железобетона должно быть различным, что следует учитывать при проектировании составов бетона. Например, арматурная сталь для предварительно напряженного железобетона изготавливается с большим содержанием углерода, что в случае коррозии бетона способствует возникновению коррозии арматуры.

В железобетоне, как и в бетоне, сцепление цементного камня с заполнителем зависит от шероховатости и формы его зерен, поэтому для повышения сцепления цементного камня с арматурой целесообразно изменять ее профиль. В связи с этим, кроме гладкой выпускается арматура профилированная периодического профиля (она может быть стержневой и проволочной). Арматурная сталь

периодического профиля имеет стержни с разным видом, часто расположенных выступов, повышающих сцепление арматуры с бетоном.

В технологии изготовления арматурной стали есть особенности, связанные с показателями ее качества. Так, при изготовлении стержневой арматуры после горячего проката не применяется последующая обработка. Такая арматура названа горячекатаной. Если после проката арматура дополнительно упрочняется термической обработкой, ее называют термически упрочненной, а при упрочнении вытяжкой в холодном состоянии — арматурой, упрочненной вытяжкой.

Для расчета железобетонных конструкций требуется деление арматуры по показателям механических свойств. По этим показателям стержневая арматура условно обозначается буквой А с индексами. В табл. V.1 приведены классы арматурной стали горячекатаной, термически упрочненной и упрочненной вытяжкой.

Таблица V.1

Класс арматурной стали	Диаметры стержней, мм	Основные механические характеристики			
		Предел текучести, кг/см ² (10 ⁻¹ МПа), не менее	Временное сопротивление разрыву, кг/см ² (10 ⁻¹ МПа), не менее	Относительное удлинение, %, не менее	Угол загиба в холодном состоянии**
A-I	6—40	2 400	3 800	25	180° при C=0,5 d
A-II	10—90	3 000	5 000	19	180° при C=3 d
A-III	6—40	4 000	6 000	14	90° при C=3 d
A-IV	10—32	6 000	9 000	6	45° при C=5 d
A-III	6—40	4 000*	6 000	—	—
A-IV	10—32	6 000	9 000	—	—
A-V	10—40	8 000	10 500	—	—
At-VI	10—40	10 000	12 000	—	—
At-VII	10—40	12 000	14 000	—	—
Atk	6, 7	14 000	16 000	—	—
Atk	8, 9	13 000	15 000	—	—
A-IIв	10—90	4 500	5 000	8	90° при C=3 d
A-IIIв	6—40	5 500	6 000	6	45° при C=5 d

Примечание. A-I, A-II, A-III и A-IV — классы горячекатаной арматурной стали; At-III, At-IV, At-V, At-VI и At-VII — классы термически упрочненной арматурной стали; A-IIв, A-IIIв — классы арматурной стали, упрочненной вытяжкой; Atk — катанки.

* Предел текучести условный $\sigma_{0.2}$.

** C — толщина оправки, d — диаметр стержня.

Класс стали получают из соответствующих марок стали, которые установлены требованиями ГОСТ 5781—61. Например, для изготовления стержневой арматуры классов A-I всех диаметров и A-II до диаметра в 40 мм нужно применять углеродистую сталь соответствующих марок, а для остальной стержневой и горячекатаной арматуры, начиная с класса A-II, — диаметром выше 40 мм и классов A-III, A-IV — низколегированную сталь. Причиной использования стали разных составов является не только перечень

требований, указанных в табл. V.1, но и технологические требования при ее использовании в строительстве. Одним из таких главных требований изготовления арматурной стали с точным нормированием ее химического состава и способа выплавки является ее свариваемость (контактной — стыковой и точечной сваркой, дуговой — шовной и ванной). Например, арматурную сталь классов А-I, А-II, А-III можно сваривать контактной стыковой, точечной и дуговой шовной и ванной сварками, в то же время для стали А-IV допускается при соблюдении специальных правил только контактная стыковая и дуговая шовная сварки.

Для термически упрочненной арматурной стали от класса Ат-IV до класса Ат-VII требований по свариваемости не предъявляют. Когда арматура (по тем или другим причинам) монтируется без сварки, ее следует брать того класса, которому она соответствует по механическим показателям, указанным в СНиПе. Стержневая арматура может иметь один из перечисленных здесь двадцати трех размеров номинального диаметра: 6, 7, 8, 9, 10, 12, 14, 16, 18, 20, 22, 25, 28, 32, 36, 40, 45, 50, 55, 60, 70, 80 и 90 мм (этот сортамент стержневой арматуры един как для гладкого, так и для периодического профилей). Стержни арматурной стали класса А-I — гладкие в отличие от стержней арматурной стали А-II, А-III, А-IV, которые имеют периодический профиль, различный для каждого класса.

Холоднотянутую проволочную сталь также делят на арматурную проволоку и проволочные изделия. Различают проволоку холоднотянутую низкоуглеродистую (класс В-I), используемую для изготовления ненапрягаемой арматуры и названную обыкновенной арматурной проволокой, и холоднотянутую углеродистую (класс В-II), используемую для изготовления напрягаемой арматуры и названную высокопрочной арматурной проволокой. Проволока, как и стержневая арматура, может иметь профиль. Тогда к обозначению класса проволоки добавляют индекс «р» (рифленая). Например, рифленая высокопрочная арматурная проволока обозначается Вр-II.

Проволочные изделия выпускают в виде прядей, канатов, сварных сеток, сеток для армоцемента с обозначением их класса. Пряди состоят из трех, семи или девятнадцати проволок. Такие нераскручивающиеся пряди используют для напрягаемой арматуры и имеют индекс П с цифрой, обозначающей число проволок в пряди (например, прядь из девятнадцати проволок обозначается П-19). Арматурные каркасы бывают двух- и многопрядные. Их также применяют для напрягаемой арматуры и обозначают индексом К, добавляя две цифры, из которых одна обозначает число прядей в канате, а другая — количество проволок в пряди (например, двухпрядевый арматурный канат, в котором каждая прядь состоит из семи проволок, обозначается К.2×7).

СНиПы в случае необходимости по проектным условиям разрешают оговаривать не только класс стали, но и иные требования к ней (марку, способ плавки и др.), и отмечать их на чертежах, в

спецификациях на материалы и при выдаче заказов на поставку арматурной стали. Диаметр проволок в арматурных прядях должен быть одинаковым и принимается следующих размеров: 1; 1,5; 2; 2,5; 3; 4; 5; 6; 7; 8 мм. Сортамент (основной) арматурной проволоки — это проволока с номинальным диаметром: 3, 4, 5, 6, 7, 8 мм с возможностью получения по заказу арматурной проволоки промжуточных диаметров, кратных 0,5 мм.

Если для добавочной и высокопрочной арматурной проволоки в СНиП I-B.4—62 установлен ее сортамент, то для двух- и многопрядевых канатов, сварных арматурных сеток и сеток для армоцемента такие сортаменты установлены в соответствующих ГОСТах и технических условиях (в частности, при армировании сварными сетками учитывается направление рабочей арматуры, которая может быть продольной, поперечной, расположенной в обоих направлениях, иметь разную форму сеток, диаметр рабочих и распределительных стержней, различное расстояние между ними и т. д.). По этим причинам существует соответствующее количество типов сеток, подразделенных на марки. Для качественного контакта с бетоном поверхность арматуры должна быть чистой от посторонних примесей и не иметь пленок из корродированной стали.

§ 36. Поставка, приемка и контроль качества арматурной стали

Поставляемая арматурная сталь должна быть замаркирована в соответствии с требованиями СНиПа. Отсутствие такой маркировки не позволяет применять ее без трудоемких испытаний, которые могут проводить только лаборатории, специально оборудованные соответствующими приборами. Отсутствие маркировки не позволяет правильно складировать арматурную сталь и создает безответственность поставщика к качеству продукции.

Испытания контрольных образцов поступившей с заводов продукции производятся в соответствии с государственными стандартами. Каждый вид арматурной стали поставляется в виде: 1) прямолинейных стержней, длина которых может варьироваться в пределах, устанавливаемых заводом-изготовителем в соответствии с ГОСТом, или мерной длины, которая оговаривается в заказах на сталь (например, в ряде случаев для уменьшения работ по сварке целесообразно получать стержни длиной до 25 м, что больше указанной в ГОСТе); 2) бунтовой арматурной стали, поставляемой в мотках (бунтах), на катушках установленной массы и диаметра; 3) плоских и рулонных сварных арматурных сеток; 4) тканых и сварных сеток для конструкций из армоцемента.

В СНиПе указано, в каком виде должен поставляться каждый класс арматурной горячекатаной стали. Арматурная проволока поставляется в мотках, при этом каждый из них должен состоять из одного отрезка проволоки. Особое значение имеет выбор внутреннего диаметра высокопрочной арматурной проволоки, что важно для выправления ее после размотки. В СНиПе даны указания о поставке арматурных прядей и арматурных канатов. Как и для

проволоки, каждый моток (но не катушка, на которой может быть несколько мотков) должен состоять из одного отрезка пряди или каната, а при выборе внутреннего диаметра мотков или катушек должна обеспечиваться после размотки прямолинейность прядей и канатов.

Из вышесказанного видно, как в нормах отражаются условия изготовления и поставки арматурной стали различных видов и классов. Особое внимание при транспортировании надо уделять прутковой арматурной стали, чтобы при любых операциях с ней исключить искривление стержней. Для этого прутковую сталь укладывают в пакеты или пучки, плотно их перевязывают и прикрепляют металлические бирки с обозначением необходимых сведений о стали. Также необходимо маркировать поставляемую сталь в бунтах. Арматурная сталь поступает с техническим документом — сертификатом, в котором записаны сведения о ее качестве в соответствии с ранее изложенными положениями о маркировке.

Сталь, поступившая на строительство или завод по изготовлению сборного железобетона, подлежит обязательной приемке, которая заключается в сопоставлении внешнего вида и произведенных замеров поступившего материала с записями в сертификатах. В случае необходимости при поступлении арматуры для обычного железобетона (появились сомнения в правильности сведений, помещенных в сертификатах, или отсутствует сертификат) проводят контрольные испытания.

Обязательные контрольные испытания должна пройти напрягаемая арматура для предварительно напряженных конструкций и в особых случаях (когда в соответствии со СНиПами и другими техническими документами по проектированию железобетонных конструкций даются специальные указания по повышению коэффициентов однородности, повышенные расчетные сопротивления арматуры, по технологии их изготовления или применению конкретных видов арматурных сталей).

Для испытания поставляемую сталь делят на партии, т. е. из общего количества арматурной стали выделяют сталь одного завода, одной поставки, класса, марки, диаметра и профиля. Отбор проб и испытания проводят в полном соответствии с требованиями ГОСТов и технических условий. В особых случаях по разрешению и указанию проектных организаций допускается использовать арматурную сталь, которая при испытании оказалась не соответствующей нормативным требованиям. От строительных лабораторий требуется такое же внимание к приемке, складированию и хранению арматурной стали, как к цементу или любым строительным материалам. Арматурную сталь нужно размещать отдельными партиями, чтобы она не загрязнялась и не корродировала, а также, чтобы можно было легко подходить и прочитать записи, приведенные на бирках.

В большинстве стран главными показателями физико-механических свойств арматурной проволоки [40] считаются: временное сопротивление разрыву, физический или условный предел текучести,

относительное удлинение при разрыве, число перегибов в холодном состоянии. Опыт показывает, что правильный выбор арматуры для предварительно напряженных железобетонных конструкций, так же как и правильный выбор любого материала для железобетона, прямым образом связан с их строительно-техническими свойствами, экономичностью и надежной долговечной работой.

Исследования обосновывают необходимость комплексных определений технических свойств арматурной стали (например, даже при очень низких напряжениях мягкие высокопрочные стали часто не удовлетворяют требованиям по величине деформации — проявляют пластические деформации), чтобы выбрать необходимые марки для конкретных условий расчета и работы конструкций. Строитель, проектировщик, технолог должны быть хорошо осведомлены о качестве арматурной стали, так как условия эксплуатации железобетонных конструкций (например, в случае многократного нагревания при эксплуатации в горячих цехах, из-за возникновения пожара, создания напряжения при изготовлении) могут вызвать для ряда марок высокоуглеродистой проволоки снижения прочности (высокоуглеродистая проволока приобретает значительную прочность вследствие холодного волочения, нагрев проволоки снижает эту прочность) [6, 40].

БЕТОН (РАСТВОР) — ИСКУССТВЕННЫЙ КАМЕННЫЙ МАТЕРИАЛ

ГЛАВА VI

ПРОЕКТИРОВАНИЕ БЕТОНА (РАСТВОРА)

§ 37. Бетонная смесь и бетон

В многочисленной технической литературе и в практической деятельности понятие о бетонной смеси часто заменяют термином бетон. Следует обратить внимание на необходимость четкого разделения этих двух понятий.

Бетонная смесь — это смесь вяжущего, воды и крупного и мелкого заполнителя, из которой можно изготовить деталь, конструкцию или сооружение любого назначения. В смеси отсутствует связность между частицами, ее можно уплотнять для придания требуемой плотности и других свойств. Следовательно, от состава смеси, ее формуемости в плотное тело и физико-химическую систему будет зависеть качество плотного тела — бетона. Формуемость определяется не только составом смеси, но и средствами, производящими уплотнение, формой (опалубкой), в которой она формируется в конструктивный элемент, и наличием арматуры, как правило, всегда затрудняющей распределение смеси в форме. Бетонные (растворные) смеси приготавливают на заводах или непосредственно на местах их использования.

Бетон — искусственный (технический) каменный материал, получающийся в результате уплотнения бетонной смеси и последующего твердения в ней вяжущего вещества. Бетон состоит из вяжущего, воды, мелкого и крупного заполнителей, раствор — из вяжущего, воды и мелкого заполнителя. Некоторые специалисты пользуются новым термином — песчаный или мелкозернистый бетон, что не улучшает широко принятую номенклатуру материалов. Растворы могут иметь прочность, аналогичную прочности бетона, что учитывают при проектировании искусственного камня (из раствора или бетона).

Классификация бетонных смесей и бетонов осуществляется с учетом следующих общих положений: 1) объемной массы материалов, составляющих бетон (раствор). Например, при относительно высокой объемной массе заполнителя бетон (раствор) называют тяжелым или холодным, при низкой объемной массе — легким или теплым; 2) породы и природы заполнителя. Например, при использовании керамзита или перлита бетон называют керамзитовым или перлитовым; 3) вида цемента. Например, при использовании портландцемента, бетон называют портландцементным, шлако-

портландцементным и т. д.; 4) способа уплотнения. Например, при уплотнении смеси с помощью вибраторов бетон называют вибрированным.

Таким образом, обилие материалов, разнообразные способы получения бетона, каждый из которых влияет на его технические свойства (и на стоимость), требуют их фиксирования как в нормативных документах, проектах конструкций (сооружений) из бетона (раствора), так и в технической литературе. Действительно, поведение бетона (раствора) в разнообразных условиях работы в конструкциях (сооружениях) без детализации его наименования не позволяет провести объективный анализ достоинств и причин недостатков этого универсального строительного материала.

§ 38. Проектирование бетонной смеси и бетона

В технической литературе, посвященной производству бетонных работ, встречаются два термина, связанные с определением состава бетона: подбор и проектирование. Они относятся к двум различным процессам в работе технолога-строителя. Часто считают, что это один процесс, состоящий лишь из подбора материалов для бетона в чисто лабораторных условиях, без должного учета многих факторов. С таким толкованием нельзя согласиться по ряду причин. Исключительно большое разнообразие условий работы бетонных (железобетонных) конструкций выдвигает требование применять такие бетоны (растворы), которые надежно работают длительные сроки. Следовательно, для бетонных (железобетонных) конструкций необходимо назначать составы бетона (раствора) по сумме требований, названных нами комплексной маркой.

Таким образом ставится вопрос не о надежной работе бетона, испытываемого в лаборатории под действием заданных механических воздействий, а о надежной работе бетона в условиях воздействия комплекса нагрузок. Известно, что во всех случаях запроектированные механические воздействия, как бы они ни были значительны, без каких-либо деформаций воспринимаются конструкцией при правильно подобранном составе бетона на любом виде цемента. В то же время даже незначительные механические воздействия при неучете всех условий работы бетона приводят к исключительно быстрому разрушению конструкций или деталей из железобетона и бетона, например разрушению бетонных камней. Поэтому нужно учитывать особенности среды, в которой должен работать материал, свойства компонентов бетона, средства производства работ.

Необходимо перейти к инженерному проектированию, которое должно осуществляться наравне с проектированием и расчетом сооружений (конструкций) и являться его составной частью.

При проектировании сооружений до сих пор (по-видимому, и из-за недостаточной надежности применяемых бетонов) не назначается срок их службы, который для правильно запроектированно-

го состава может достигать нескольких сотен лет. Срок службы связывается с классом сооружений, которые по длительности работы не соответствуют длительности сроков надежной службы бетона (он меньше последнего), в том случае, когда состав бетона запроектирован в полном соответствии с комплексной маркой бетона.

Значительное расширение области применения бетона (особенно за последние 30 лет), в том числе сборного железобетона, обязывает специалистов резко повысить такое свойство, как однородность бетона (раствора) в конструкциях, деталях и сооружениях в любых условиях эксплуатации. Несмотря на многолетние и разнообразные исследования бетона остается много нерешенных вопросов. Попытки отказа от использования широкого по своему разнообразию экспериментального подбора состава бетона с различными свойствами и перехода только к использованию одних аналитических приемов на данном этапе оказались несостоятельными; эти направления должны быть объединены.

Обратим внимание на тот факт, что даже широко известная закономерность связи прочности бетона с водоцементным отношением $R_b = f(B/C)$ при $R_d = \text{const}$ имеет узко ограниченный смысл. Следовательно, установление более широких взаимозависимостей прочности, морозостойкости, химической стойкости, водонепроницаемости, деформативности, которые зависят от качества исходных материалов, их соотношений и других условий, очень сложно, но необходимо. В этом вопросе решающее значение должен иметь выбор правильного методического направления, к которому относится глубокое и всестороннее изучение свойств вяжущих (см. раздел первый, гл. I).

Действительно, многочисленные попытки изучать свойства бетона, не прибегая к широкому использованию химии силикатов, давали частные решения практических вопросов, которые не позволяли использовать их для, казалось бы, аналогичных условий. Например, применяя бетоны высоких марок по прочности, но без учета состава и качества цемента, во многих случаях не удается получать бетоны высокой морозостойкости. Следовательно, изучение бетона нельзя отрывать от изучения свойств цемента, а необходимо начинать с теоретических задач получения цемента, изучения физико-химических процессов его гидролиза и гидратации в различных условиях образования структуры цементного камня в бетоне (растворе), его поведения в различные по длительности и условиям среды периоды службы сооружений (конструкций).

Для дальнейшего развития исследований имеют значение и такие особенности, как методические приемы испытания свойств бетона, принципы разработки нормативных документов для СНиПов, унификация и стандартизация лабораторного оборудования, разработка положений о моделях в испытании свойств*, принципы

* Здесь понимается не только испытание готового бетона, но и приготовление образцов, изделий, конструкций.

деления сооружения на зоны агрессивного воздействия на его материал и др. Рассмотрим некоторые из перечисленных вопросов.

Методические приемы испытания свойств не дают необходимой информации о предельном состоянии материала — об условиях, связанных с его разрушением. Действительно, если испытание образцов на механическую прочность проводится до их полного разрушения, то это не делается, например, при испытании на морозостойкость. Подбор состава бетона при ускоренном режиме твердения осуществляется по принципу получения проектной прочности без сравнения с качеством бетона — эталона и расходом для него цемента. В ряде исследований применение цемента не связывается с его широким анализом, что не позволяет сравнивать одни работы с другими и таким образом получать нужную научную и практическую информацию. Это, в одном случае, приводит к получению бетонов с излишним расходом цемента, высокой неоднородностью и пониженным качеством, в другом — к получению бетонов с необоснованно высокими свойствами, не требующимися для долговечной работы сооружений. При наличии у специалистов глубоких знаний химии цемента и технологии бетона ни первый, ни второй случаи не будут иметь места.

Назначение сроков службы имеет свои особенности, которые следует рассмотреть, так как из них вытекает положение об едином сроке службы бетонных и железобетонных конструкций (сооружений). Бетон — материал, структура цементного камня которого, без какого-либо ухода за ним во время эксплуатации, не будет разрушаться сотни лет. Это нельзя сказать о большинстве органических материалов, стареющих* в любых, даже самых мягких условиях эксплуатации сооружений во внешних средах (инженерные сооружения и конструкции из древесины, уплотненные асфальтобетонные и битумоминеральные смеси, различные пластмассы и др.).

Поэтому необходимо назначать для бетона с различными техническими свойствами как бы единый срок службы, но при одном неперменном условии — правильном использовании каждого вида бетона в месте, соответствующем его структурно-текстурным характеристикам. В бетоне каждый компонент имеет свои структурные особенности, а сочетание их в камне требует введения понятия о текстуре бетона. Проектируя бетон по комплексной марке, можно в полной мере удовлетворить это требование. Нужно помнить, что бетоны с резко отличными техническими свойствами мало отличаются по стоимости. Для народного хозяйства страны изготовление долговечных бетонов связано с экономией колоссальных средств и требует самого пристального внимания многочисленной армии строителей и специалистов.

* Под старением принято понимать постепенное снижение различных технических свойств материала.

§ 39. Определение параметров, учитывающих условия работы бетона

Проектирование бетона — комплексный процесс, позволяющий правильно назначать его состав для конструкций или их зон и целых сооружений. В проектной документации указывается весьма ограниченное число требований. В проекте, как правило, указывают марку бетона (раствора) по прочности и, если нужно, морозостойкость и водонепроницаемость. Однако этого недостаточно для подбора состава бетона. Необходима значительно большая информация, в первую очередь, связанная с условиями работы материала в сооружении. Из табл. VI.1 видно, что многообразные влияния внешней среды дифференцированы на девять достаточно крупных групп, каждая из которых, в свою очередь, имеет технические показатели, нуждающиеся в дальнейшем углубленном изучении до включения в стандарт и использования при проектировании объектов. Во всех пунктах таблицы, кроме первого, перечислены агрессивные воздействия, вызывающие разнообразные деструктивные процессы в структуре цементного камня, в текстуре бетона и арматуре.

При проектировании бетона главная задача состоит в том, чтобы учесть комплексное воздействие на него агрессивных факторов и в соответствии с этим найти меры для его предотвращения.

При обычном подборе состава без учета сказанного о смысле проектирования бетонов на случайных цементах, позволяющих получить только водонепроницаемый бетон, не стойкий в агрессивных условиях, последующее разрушение сооружений (конструкций) неизбежно через довольно короткий срок*. Основой надежной эксплуатации сооружения в любой период является правильное определение агрессивных воздействий на бетон; такой принцип проектирования бетона не допустит возникновения деструктивных процессов, будет способствовать систематическому увеличению в цементном камне гидратированных соединений и улучшению их характеристик. Ошибочность чисто лабораторного подбора, который некоторыми называется проектированием, состоит в том, что образцы изготавливают без учета действительных условий работы бетона. Такой подбор условно правилен, если воздействует неагрессивная среда (п. 1 табл. VI.1); однако его нельзя распространять на остальные случаи воздействия агрессивных сред, так как это приведет к приготовлению бетонов со сниженной долговечностью, а в ряде случаев и к быстрому их разрушению. Из сказанного также нельзя делать вывод о том, что для получения долговечных бетонов достаточно выполнить только требования, указанные в табл. VI.1. Это необходимые условия, но они еще не обеспечивают получения долговечных бетонов.

* В этом случае не рассматривается особый вопрос об агрессии бетона (железобетона) в цехах промышленного производства.

Таблица VI.1

№ группы	Условия внешней среды	Требования к бетону (раствору), цементному камню	Обозначение комплексной марки бетона (раствора) — зональной марки**
1	Неагрессивные условия для бетона	Состав бетона подбирают только по проектным требованиям марочной прочности	R
2	Неагрессивные условия для бетона, но вызывающие коррозию арматуры	Состав бетона проектируют по методам, изложенным в гл. I, как для бетона с высокой плотностью защитного слоя, чтобы предотвратить снижение величины pH из-за карбонизации $\text{Ca}(\text{OH})_2$	R' для основного бетона
3	Атмосферные реагенты (дождь, снег, солнечная радиация, резкая смена температуры)	Состав бетона проектируют по наиболее агрессивному из перечисленных воздействий, при этом бетон должен удовлетворять условиям комплексного воздействия внешней среды	R^A
4	Вода разного химического состава	Состав бетона проектируют необходимой химической стойкости после определения химического состава воды (СН 249—63)	R^X
5	Газы разного химического состава	Состав бетона проектируют необходимой химической стойкости после определения химического состава газов	$R^Г$
6	Вода с неагрессивным химическим составом при разных давлениях	Состав бетона проектируют с обеспечением заданной водонепроницаемости (в соответствии с требованиями ГОСТ 4795—59 *)	R^B
7	Вода разной агрессивности при разных давлениях	Состав бетона проектируют с обеспечением необходимой водонепроницаемости (в соответствии с требованиями ГОСТ 4795—59 * и указаниями п. 4 таблицы)	R^{X+B}

№ группы	Условия внешней среды	Требования к бетону (раствору), цементному камню	Обозначение комплексной марки бетона (раствора) — зональной марки**
8	Многократное увлажнение бетона водой разного солевого состава и высыхание при изменении температур от положительных до отрицательных	Состав бетона проектируют с обеспечением необходимой морозостойкости (в соответствии с требованиями ГОСТ 4795—59* и указаниями п. 4 и § 65)	R^{X+M+B}
9	Механическое истирание бетона при постоянном или эпизодическом смачивании водой разного солевого состава при систематических изменениях температур от положительных до отрицательных	Состав бетона проектируют с обеспечением стойкости при истирании (в соответствии с требованиями ГОСТ 8424—63 и указаниями гр. 4 и гр. 8)	R^{X+M+I}

Примечания. 1. Под неагрессивными следует понимать условия, которые не вызывают в бетоне деструктивные процессы. В научном аспекте и в этом случае при испарении воды из бетона происходит изменение процесса структурообразования в цементном камне, отражающееся на текстуре бетона.

2. R — *resistans* — марка по прочности; индексы к R : X — химическое воздействие; M — воздействие мороза; A — воздействие атмосферы; G — воздействие газа; I — истирание; B — напорное действие воды при обеспечении тех же требований по прочности.

§ 40. Определение параметров, учитывающих условия производства работ

При каждом подборе состава нужно обязательно учитывать конкретные условия приготовления смеси или отказаться от стандартных лабораторных условий и воспроизводить производственные. Последний прием наиболее правильный, но требует создания новых лабораторных баз типа полигонов, где можно проводить испытания в производственной обстановке. Такие базы должны быть оснащены оборудованием, механизмами и укомплектованы квалифицированными кадрами. Такая деятельность типична для крупных гидротехнических строителей (например, лабораторная база на строительстве Саратовского гидроузла), исследовательских центров (НИИЖБ Госстроя, ЦНИИС Минтрансстроя и т. д.).

В области разработки новых технологий сборного железобетона исследователи придерживаются этого направления. Так, были начаты подборы составов бетона в ЦНИИС Минтрансстроя для опор контактной сети, шпал, обделок тоннелей метрополитенов и других объектов.

Проанализируем с позиций проектирования бетона возможность наиболее целесообразного* подбора состава смеси и бетона в мно-

* Под этим термином понимается ранее сказанное о долговечных бетонах, которые полностью соответствовали бы и требованиям экономики.

точных строительных лабораториях, использующих только стандартное оборудование, приборы и механизмы, проследим условия приготовления бетона в лаборатории и на производстве по отдельным технологическим переделам, на одних и тех же материалах, считая, что при их выборе полностью учтены условия работы материала в конструкции (сооружении).

При автоматическом дозировании цемента, песка, гравия или щебня не возникает существенных отклонений от заданных масс. Однако условия работы дозирующего на пульте, частые оперативные по ходу заказов на бетон изменения его состава приводят к неизбежным ошибкам, что в конечном счете и сводит на нет точность дозирования. По этой причине могут возникать недопустимые отклонения в однородности бетона конструкций.

Указанное обстоятельство должно учитываться лабораторией при организации и выполнении контроля, например, путем создания контрольного поста на пульте дозирования, введения паспортов на бетонную смесь, устройства двусторонней связи между диспетчером и дозирующим для взаимной проверки марки (номера) выдаваемого состава смеси и других мероприятий, наиболее рациональным из которых следует считать автоматическое приготовление смесей по заданной на смену программе с введением в нее номеров закрепленных автомобилей-самосвалов или других транспортных средств. Работа дозаторов воды должна находиться под особым контролем лаборатории, а перестройка на другие дозы производится персоналом лаборатории. Для этой цели желательно осуществлять непрерывный автоматический контроль за влажностью песка, гравия (щебня) в бункерах.

Выбор пластичности бетонной смеси связан с рядом условий, которые во многих случаях заменяются достаточно общими рекомендациями, связанными лишь с типом выполняемой конструкции. Однако кроме типа конструкции необходимо знать ее конфигурацию, геометрические размеры, вид, конструкцию и материал опалубки, вид арматуры и ее расположение в опалубке. При этом следует выбрать тип бетоносмесителя, условия перемешивания, выдачи смеси в транспортное средство, расстояние и условия ее перевозки, в том числе температуру воздуха, возможную скорость доставки, наличие дополнительных перегрузок, условия выгрузки смеси, типы вибраторов. Приведенный перечень сведений позволит рассчитать время от окончания перемешивания до уплотнения смеси с учетом свойств цемента, песка, гравия (щебня), назначить ее пластичность жесткость. Без учета перечисленных факторов пластичность бетона будет случайной, а смесь не обеспечит долговечности бетона с минимально возможным расходом цемента.

Зная условия производства работ со всеми указанными подробностями, лаборатория получает необходимые сведения для подбора состава бетонной смеси. Качество бетона при прочих равных условиях в конечном счете зависит от качества компонентов, среди которых определяющим является цемент.

Сказанное о комплектности требований видно на примере производства бетонных работ, когда из-за желания повысить пластичность смеси увеличивают содержание воды, компенсируя ее увеличение повышенным расходом цемента. При этом считают, что если сохранить соотношение В/Ц, все свойства бетона останутся неизменными. В действительности можно говорить только об условной неизменной прочности образцов-кубов, испытываемых на сжатие. Остальные же свойства бетона изменятся, в чем не трудно убедиться, анализируя результаты испытаний, опубликованные в различных работах. Причиной сказанного, в первую очередь, является особенность формирования структуры цементного камня при различных численных соотношениях воды и цемента и контактных слоев последнего с поверхностью заполнителей и арматуры.

Таблица VI.2

Бетон для смесей различной пластичности-жесткости		Пределы В/Ц в бетоне	Исходные значения для расчета B^x и $B^{св}$			Химически связанная вода через 30 сут., л/м³	Химически несвязанная вода через 30 сут., л/м³	Увеличение количества связанной воды при одном значении В/Ц, л/м³
Количество цемента условного качества, кг/м³	Количество воды, л/м³		Валовое значение В/Ц в бетоне	Цемент, кг/м³	Вода, л/м³			
200	110—200	0,55—0,90	0,60	200	120	30,0	90,0	До 67,5.
250	120—200	0,48—0,80	0,60	250	150	37,5	112,5	
				300	180	45,0	135,0	
				350	210	52,5	157,5	
300	120—210	0,40—0,70	0,50	250	125	37,5	87,5	„ 70,0
				300	150	45,0	105,0	
350	120—210	0,34—0,60	0,50	350	175	52,5	122,5	
				400	200	60,0	140,0	
				450	225	67,5	157,5	
400	120—220	0,30—0,55	0,40	300	120	45,0	75,0	„ 50,0
				350	140	52,5	87,5	
				400	160	60,0	100,0	
450	130—230	0,29—0,50	0,50	450	180	67,5	112,5	
500	140—230	0,28—0,46	0,50	500	200	75,0	125,0	
550	150—240	0,27—0,43	0,35	400	140	60,0	80,0	„ 60,0
				500	175	75,0	100,0	
600	160—240	0,27—0,40	0,35	600	210	90,0	120,0	
				700	245	105,0	140,0	
650	170—250	0,26—0,38	0,30	400	120	60,0	60,0	„ 45,0
				500	150	75,0	75,0	
				600	180	90,0	90,0	
700	180—250	0,25—0,36	0,30	700	210	105,0	105,0	
800	180—250	0,24—0,30	0,25	700	175	105,0	70,0	„ 10,0
				800	200	120,0	80,0	

Примечание. B^x — химически связанная вода; $B^{св}$ — химически несвязанная вода.

Водоцементное отношение бетона — условная величина, не отражающая особенностей связывания воды цементом и формирование структуры цементного камня. Известно, что в процессе твердения цемента участвует не вся вода затворения (табл. VI.2). Поэтому независимо от пропорционального увеличения воды и цемента в бетоне количество свободной воды систематически растет, что вызывает снижение его важных технических свойств при практически малом изменении показателя прочности стандартных образцов бетона на сжатие. Широко известно, что свободная вода, отделившаяся от цементного теста, образует под каменным материалом и под арматурой микрополости, являющиеся источниками образования последующих дефектов бетона в конструкциях (сооружениях), снижая их однородность и сцепление арматуры с бетоном.

§ 41. Зональность бетона в конструкциях. Методы подбора и расчет состава бетона

Понятие зональности* связано с реализацией принципа о долговечности бетона (см. § 78). Действительно, рассматривая многочисленные конструкции (сооружения), можно увидеть, что их разные части находятся не в однотипных условиях (рис. VI.1). По этой причине бетон надо классифицировать не по видам конструкций (сооружений), а по условиям их работы. Например, бордюрный камень в районах с частыми изменениями отрицательных и положительных температур и высокой влажностью воздуха подвергается таким же агрессивным воздействиям, как и стены доков, шлюзов, плит откосов каналов, лотков для пропуска воды. Вместе с тем перечисленные элементы и конструкции из бетона (железобетона) ниже зоны замерзания воды или выше горизонта воды-среды находятся в иных условиях, что во многих случаях позволяет применять разные составы бетона в каждой из этих двух зон.

Разбивка бетона сооружений на зоны должна производиться при полном учете всех агрессивных внешних факторов. В ряде случаев при членении на зоны должны в полной мере учитываться проектные требования, предъявляемые к конструкции (сооружению) при расчете по предельным состояниям, как и возможность организации работ на различных составах бетона.

Зная требования, предъявляемые к смеси и бетону, переходят к подбору, который заканчивают расчетом состава. На первых этапах состав бетона подбирали по объему компонентов и оценивали по так называемому номинальному составу, в котором давалось отношение каждого из заполнителей (песка, гравия, щебня) к единице объема или массы цемента в бетоне. В практике строительства широко использовали следующие номинальные отношения в составах бетона: 1 : 1,5 : 3; 1 : 2 : 4 и ряд других. Из этих отношений вид-

* Деление конструкции (сооружения) на зоны по условиям работы материала предложено автором и при его участии осуществлено в проекте сооружений канала им. Москвы в 1934 г.

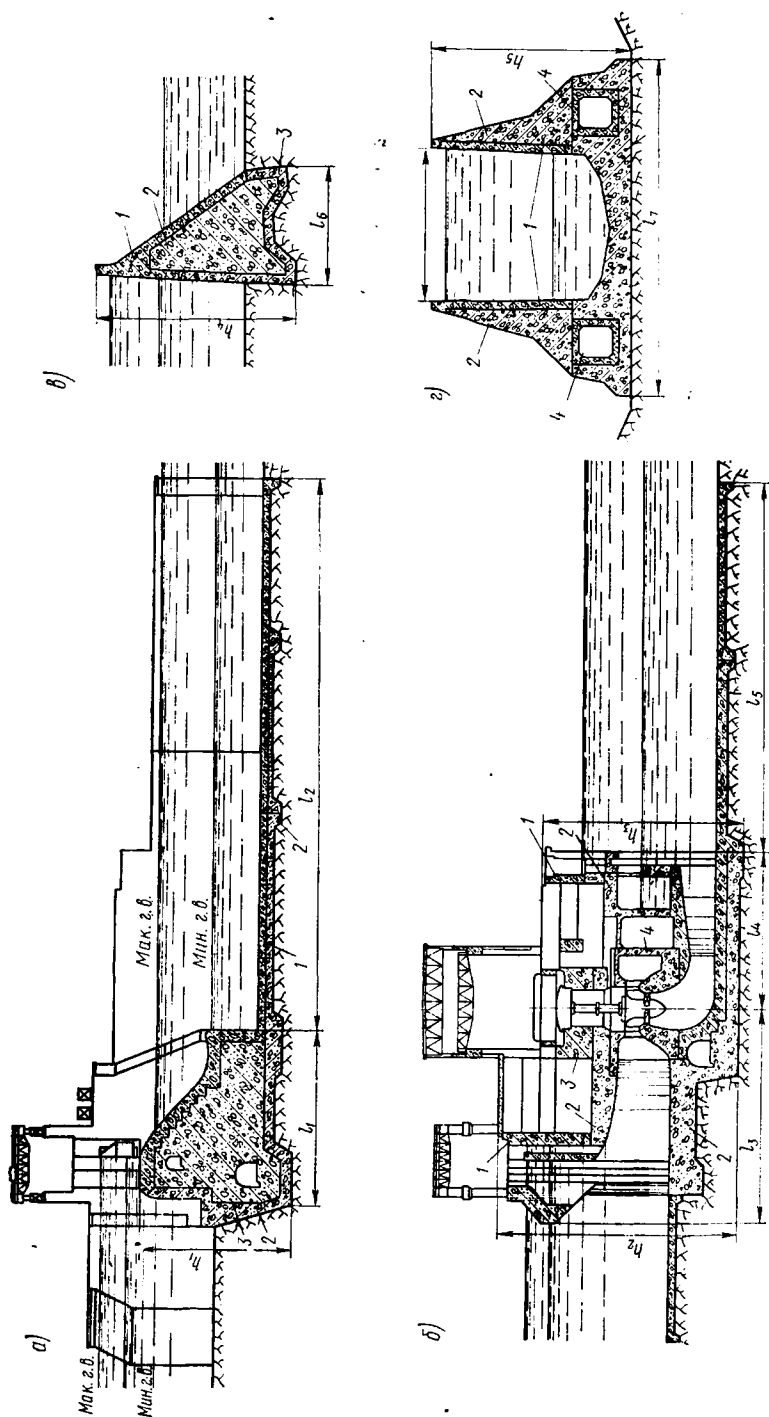


Рис. VI.1. Разбивки сооружений на зоны по условиям работы:

а — водосливная плотина; б — гидроэлектростанция; в — глухая плотина; г — судовой шлюз; 1 — морозостойкий бетон; 2 — водонепроницаемый бетон; 3 — бетон для внутренних частей сооружений; 4 — труднотравиющийся бетон

но, что количество воды не считалось определяющим качество бетона. Это естественно, так как применялись жесткие смеси с ограниченным содержанием воды, которая должна была обеспечить уплотнение бетонной смеси трамбованием, осуществляемым ручными трамбовками.

Первые наиболее обоснованные методы подбора состава относятся к 1895 г., когда проф. И. Г. Малюга опубликовал книгу «Состав и способ приготовления цементного раствора (бетона) для получения наибольшей крепости» [34]. В частности, он установил, что изменение прочности бетона (раствора) непосредственно связано с количеством воды затворения. Это положение подтвердилось в обширных работах, осуществленных в течение ряда лет в США под руководством проф. Абрамса и выражено в следующем виде:

$$R_6 = f (B/C).$$

На основании многочисленных опытов ее использования в научных работах и строительной практике указанная закономерность формулируется следующим образом: прочность бетона из пластичной смеси, удобной для ручного уплотнения при прочих равных условиях вслед за ее замешиванием, определяется как функция отношения количества воды к количеству цемента в единице объема бетона. Под прочими равными условиями подразумевается приготовление, транспортирование, укладка, уплотнение смеси и уход за бетоном.

Заметим, что начало использования в практической деятельности этой закономерности относится к 1915 г., когда многие научные положения химии цемента, технология и средства производства бетона находились на значительно более низком уровне. Впервые числовая зависимость между прочностью бетона и водоцементным отношением записана Абрамсом

$$\sigma_{28} = \frac{A}{K - B/C},$$

где A и K — коэффициенты, зависящие соответственно от сорта цемента и от условий хранения; B/C — водоцементное отношение (отношение объема воды к объему рыхлого цемента).

Для сравнения приводим более ранние формулировки указанной закономерности, названной в те годы законом водоцементного фактора в бетоне.

Одна из формулировок была следующей: прочность бетона при использованных материалах и условиях их обработки, пока смесь остается пластичной и удобной для работы, определяется единственно отношением количества воды, употребляемой для смеси, к количеству цемента *. Применяя жесткие смеси, нельзя осуществить широкое внедрение монолитных железобетонных конструкций с

* Такая формулировка связана с широким использованием пластичных смесей, уплотняемых штыкованием ввиду отсутствия вибраторов. Эта формулировка не точна, что видно из сведений, приведенных в § 70.

относительно небольшими сечениями и значительным уменьшением максимальной крупности гравия (щебня) при отсутствии средств для уплотнения бетонной смеси (кроме центрифугирования опор). Поэтому развитие новых видов более ажурного железобетона [6, 40, 74] требовало гарантированного обеспечения заданных проектных решений.

Методы подбора состава бетона и его расчета продолжают совершенствоваться. Любой из ныне применяемых методов должен завершаться приготовлением рассчитанного состава бетона и испытанием контрольных образцов. Для облегчения практической деятельности строительных лабораторий должны быть подобраны и рассчитаны типовые составы бетона на материалах, применяемых в конкретном строительстве. Тогда при наличии типовых составов в текущую деятельность лаборатории входит только систематический контроль качества материалов (соответствие компонентов бетона, поступающих на строительную площадку, а также на заводы сборного железобетона, качеству материалов, заложенных в типовые составы).

Независимо от методов составы бетона должны получаться одни и те же. Из наиболее широко применяемых можно назвать метод абсолютных объемов Мак-Миллана, подбор по методу Абрамса — Беляева, пробный метод (Trial Method) или метод попыток; метод последовательного приближения (проф. Б. Г. Скрамтаева); метод подбора состава бетона при заданном содержании цемента в 1 м³ бетона и заданном В/Ц [26] и др.

В методах подбора и расчета составов конечным результатом является определение весовых частей компонентов бетона, что отличает такой состав в лучшую сторону по точности от ранее применявшихся составов при подборе в номинальном выражении (в единице объема бетона):

$$1 : p : m,$$

где 1 — единица цемента по массе или объему; p — то же, песка; m — то же, гравия (щебня) или их смеси.

Следует обратить внимание на то, что методы подбора составов различаются выделением на первое место разных показателей: расхода цемента; пустотности заполнителей с использованием коэффициентов избытка цементного теста в пустотах песка и раствора в пустотах крупного заполнителя; условного показателя абсолютной плотности бетона после его расчета; практических значений зависимости пластичности смеси от качества заполнителей, прочности бетона при различной пластичности смеси и разных марок цемента и ряд других.

Все методы позволяют рассчитать состав бетонной смеси по заданной прочности *. По методу Абрамса — Беляева исходными данными для подбора состава бетонной смеси служат марка бетона и

* При проектировании бетонной смеси необходимо расширять количество условий для выбора материалов для бетона и показателей определяемых свойств, не ограничиваясь теми, которые содержатся в данном методе.

пластичность смеси по осадке конуса; активность цемента $R_{ц}$; стандартность качества заполнителей и их характеристика — наибольшая крупность гравия, модуль его крупности $M_{кр.г(ш)}$; плотность, объемная масса и модуль крупности песка $M_{кр.п}$; таблица номинального состава бетона 1 : n для выбора коэффициента r ; таблица модуля смеси мелкого и крупного заполнителя M_c и номинального состава бетона; график связи M_c номинального состава бетона и его прочности для смесей с определенной осадкой конуса и график зависимости $R_6 = f(B/C, R_{ц})$.

Указанные графики (рис. VI.2) — результат статистической обработки многочисленных исследований и практических данных различных строительных, осуществленных в СССР и за рубежом. Большую работу по обработке таких первичных данных осуществил проф. Н. М. Беляев, который предложил для расчета бетона формулу зависимости предела прочности бетона на 28 сут. от активности цемента $R_{ц}$ и водоцементного отношения

$$\sigma_{28} = \frac{R_{ц}}{3(B/C)^{1,5}}.$$

Активность цемента $R_{ц}$ определяется по итогам испытания цемента и нормам, которые действовали в 1930 г. В связи с этим отметим, что у исследователей разных стран аналогичные зависимости при новых методах испытания и маркировки цемента будут иными:

$$\text{у Тальбота и Рихарта} \quad \sigma_{28} = \frac{32\,000}{(1 + 2,07 B/C)^{2,5}};$$

$$\text{у Абрамса (в метрических мерах)} \quad \sigma_{28} = \frac{985}{7 B/C} \quad (\text{рис. VI.3})$$

и в действовавших в США единицах измерения [26, 62]

$$\sigma_{28} = \frac{14\,000}{7x},$$

где x — водоцементный фактор — водоцементное отношение ($x = 1$ при $B = C$).

Расчет по методу Абрамса — Беляева состоит из следующих этапов:

1. Из графика $R_6 = f(B/C, R_{ц})$ определяют B/C , а R_6 и $R_{ц}$ заданы для расчета состава бетона.

2. По правилу смешения определяют $M_c = M_{кр.п} + M_{кр.г(ш)}(1-r)$, зная значения $M_{кр.п}$ и $M_{кр.г(ш)}$ и задаваясь значением r — долей песка в объеме смеси заполнителей при стандартном уплотнении. Многочисленные опыты (Абрамса, Беляева и др.) позволили выявить, что для ручного уплотнения пластичных бетонных смесей оптимальными следует считать $r = 0,34-0,5$. При известных значениях M_c , $M_{кр.п}$, $M_{кр.г(ш)}$ в случае использования таблицы оптимальных значений M_c в зависимости от номинального состава, вида

крупного заполнителя и максимального размера гравия (щебня) можно определить r :

$$r = \frac{M_{кр.г(ш)} - M_c}{M_{кр.г(ш)} - M_{кр.п}}.$$

3. Зная M_c и имея график кривых равных сопротивлений, построенный на основании опытов, находим вероятное значение номинального состава — $1:n_1$ (1 — объем цемента с условной объемной массой 1300 г/л, n_1 — сумма объемов заполнителей в стандартном состоянии). Для построения кривых равных сопротивлений исполь-

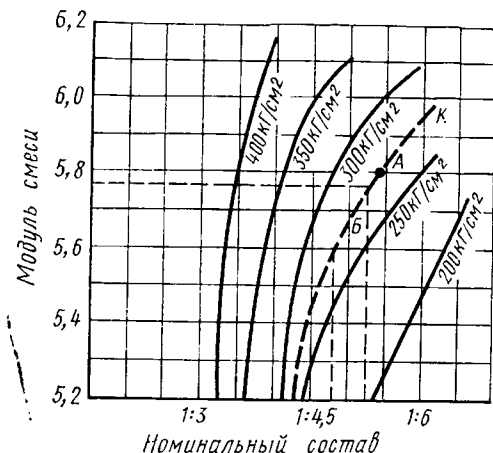


Рис. VI.2. График для подбора состава бетонной смеси

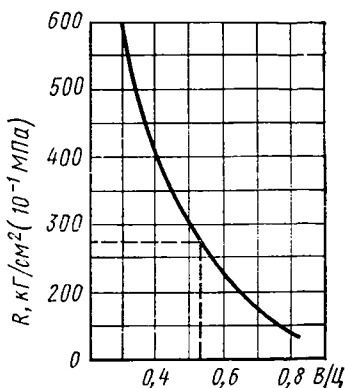


Рис. VI.3. График кривых равных сопротивлений ($R_n = 360 \text{ кг/см}^2$, возраст 28 сут.)

зуют результаты разных серий образцов из бетонных смесей примерно одной пластичности-жесткости, например с осадкой конуса 1—3 см, 3—5 см, но разных составов (разных значений $1:n_1$). Имея значения M_c , $1:n$, и R_6 для одной и той же пластичности-жесткости смеси, можно построить указанный график. Для этого по оси абсцисс откладывают значения номинальных составов бетона, по оси ординат — значения M_c ; затем в этой системе координат наносят соответствующие испытанным составом бетона значения R_6 . Отметим, что в большинстве случаев приходится строить новые линии на графике и брать табличные значения для номинальных составов и M_c , прибегая к интерполяции (табл. VI.3).

Из табл. VI.3 видно, что модуль крупности смеси заполнителя M_c зависит от вида заполнителя и максимальной крупности его зерен. Для одного и того же номинального состава бетона значения модуля смеси меняются примерно в 1,5 раза (от 4,4 до 6,9).

4. Имея графически рассчитанный номинальный состав $1:n_1$, определенный в соответствии с п. 3, определяют значение M_c . По

Таблица VI.3

Номинальный состав 1 : п	Модуль крупности заполнителя при											
	гравий, мм						щебень, мм					
	10	20	30	40	50	80	10	20	30	40	50	80
1 : 3	4,4	5,3	5,7	6,1	6,5	6,9	4,1	5,0	5,4	5,8	6,2	6,6
1 : 4	4,3	5,1	5,5	5,9	6,3	6,7	4,0	4,8	5,2	5,6	6,0	6,4
1 : 5	4,2	5,0	5,4	5,8	6,2	6,8	3,9	4,7	5,1	5,5	5,9	6,3
1 : 6	4,1	4,9	5,3	5,7	6,1	6,5	3,8	4,6	5,0	5,4	5,8	6,2
1 : 7	4,0	4,8	5,2	5,6	6,0	6,4	3,7	4,5	4,9	5,3	5,7	6,1

уточненному модулю M_c с помощью графика кривых равных сопротивлений уточняют номинальный состав, которому в табл. VI.3 будет соответствовать новое значение M_c . Если разница между двумя значениями M_c , найденными приемом последовательного обращения к графику и табл. VI.3, не будет превышать величины 0,05, определенной многочисленными опытами и принятой для подбора и расчета состава рассматриваемым методом, выбор номинального состава считается законченным при соотношении $1 : n_2$, соответствующем второму значению M_c из табл. VI.3 (в ином случае продолжают уточнять номинальные составы и модули смеси так, как это было показано).

5. Зная номинальный состав и модуль смеси, можно определить раздельно количество песка и гравия (щебня) — развернуть номинальный состав из вида $1 : n_2$ в вид $1 : p : m$, где $p = r n_2$, $m = (1 - r) n_2$. Из уже известной формулы определяют значение r , p и m .

6. Получив развернутый номинальный состав, переходят к определению количества цемента, воды, песка, гравия (щебня) в единице объема бетона:

а) объем цемента $V_{ц} = \frac{1300}{\beta (1 + n_2)}$, где 1300 — объемная масса 1 м^3 бетона, т/м^3 ; β — выход бетона (см. § 79);

б) объем воды $V_{в}$ определяют из числового значения В/Ц, найденного по п. 1 и известного теперь из п. 6, а числового значения $V_{ц}$;

в) объем песка $V_{п} = c r n_2$;

г) объем гравия (щебня) $V_{г(щ)} = c (1 - r) n_2$.

7. Имея объем каждого компонента бетона, легко определить их весовые количества в 1 м^3 бетона путем умножения объемов каждого из них на значения соответствующих объемных масс.

Рассмотрим подбор и расчет состава бетона по методу абсолютных объемов. Используя метод подбора по абсолютным объемам каждого компонента бетона в сочетании с экспериментальной проверкой сделанных расчетов, наметим этапы расчета состава бетонной смеси и бетона. Основными исходными данными для этого должны быть:

1. Проектные требования к бетонной смеси и бетону для изготовления детали, элемента, изделия, конструкции и всего сооружения. Следовательно, лаборатория должна иметь не только перечень строительно-технических свойств, записанных в проекте, но и чертежи той продукции, которая должна быть изготовлена.

2. Условия организации и приготовления бетонной смеси и производства работ, запроектированные и осуществленные с участием лаборатории [77].

3. Результаты испытания (или паспортные данные) на все компоненты (соответствующих ГОСТу) бетона, в том числе результаты определения объемной массы, плотности песка и крупного заполнителя (гравия или щебня).

4. Типовой график зависимости пластичности-жесткости бетонной смеси от содержания в ней воды (рис. VI.4)

$$r = \frac{V_{\text{ц}}^{\text{аб}}}{V_{\text{п}}^{\text{аб}} + V_{\text{г(ш)}}^{\text{аб}}},$$

где $V_{\text{ц}}^{\text{аб}}$, $V_{\text{п}}^{\text{аб}}$, $V_{\text{г(ш)}}^{\text{аб}}$ — соответственно абсолютные объемы цемента, песка, гравия или щебня.

5. Типовой график зависимости

$$R_6 = f(B/\text{Ц}, R_{\text{ц}}).$$

6. Таблица числовых значений коэффициента r .

Указанные графики при работе лаборатории на неизвестных материалах позволяют составить типовые графики для каждого строительства (завода железобетонных конструкций), которые значительно сокращают объем экспериментальной проверки подбираемых составов бетонной смеси. Для хорошо организованных строителей и предприятий работы по подбору и расчету бетонной смеси в основном заменяются использованием таких хорошо проверенных типовых составов. Напомним, что хороший типовой состав при минимальном содержании в нем цемента отвечает всем технико-экономическим требованиям, предъявляемым к нему проектом изделия, конструкции, сооружения.

Мы полагаем, что в расчетах состава бетона целесообразнее пользоваться зависимостью $R_6 = f(B/\text{Ц}, R_{\text{ц}})$ в ее графической интерпретации, не прибегая каждый раз к вычислениям.

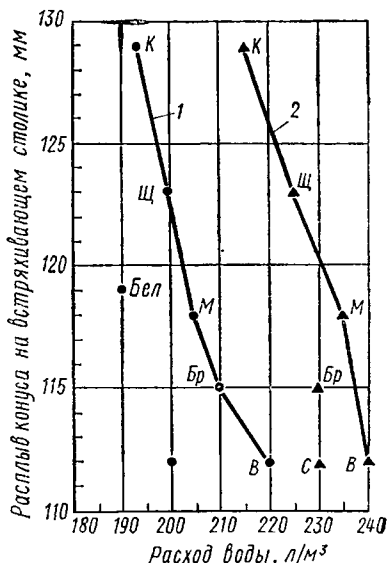


Рис. VI.4. Типовой график зависимости осадки конуса от содержания в смеси воды:

В — Воскресенский завод; Бел — Белгородский завод; Бр — Брянский завод; С — Себряковский завод; К — Карадагский завод; Щ — Шуровский завод; М — Михайловский завод; 1 — смесь с осадкой конуса 6—7 см; 2 — смесь с осадкой конуса 15—17 см

Имея указанные сведения, можно приступить к расчету состава. Принятое условие не точно определяет существо вопроса, так как при приготовлении в условиях окружающей среды обязательным пятым компонентом является воздух *. Представим, что условный разрез бетонного куба получен сплавлением всех твердых материалов до жидкого состояния. Тогда схема расчета по этапам протекает следующим образом:

1. Определение количества воды с учетом требований к пластичности-жесткости. Для этого используем график зависимости пластичности-жесткости бетонной смеси от содержания воды. Многолетние исследования в области повышения качества бетонной смеси и бетона показали, насколько значителен эффект от применения пластифицирующих — воздухозадерживающих (гидрофильных) и гидрофобизирующих — воздухововлекающих ПАВ в технологии бетонных работ. Определив группу пластифицирования цемента [60], необходимо уменьшить в бетонной смеси содержание воды на эту величину. Действительное количество воды определится при опытных затворениях бетонной смеси.

2. Определение количества цемента по графику $R_6 = f(V/Ц, R_п)$ и $V/Ц$ бетона. Здесь известными являются марки бетона и цемента (или активность цемента). Определив значение $V/Ц$ и зная количество воды в бетоне из первого этапа расчета, находят количество цемента.

Для использования принятого метода подбора необходимо получить по ходу расчета абсолютные объемы воды $V_{в}^{аб}$ и цемента $V_{ц}^{аб}$, что делается путем деления их числовых значений на соответствующие значения плотности.

3. Определение суммы абсолютных объемов заполнителей $V_{з}^{аб} = 1 - (V_{в}^{аб} + V_{ц}^{аб})$ путем вычитания из объема бетона (1 м³ абсолютно плотного объема бетона) абсолютных объемов воды и цемента.

4. Определение абсолютного объема песка $V_{п}^{аб}$. Зная числовое значение коэффициента $r = V_{п}^{аб}/V_{з}^{аб}$, легко определить этот объем $V_{п}^{аб} = r V_{з}^{аб} = r (V_{п}^{аб} + V_{г(щ)}^{аб})$. Значение коэффициента r берут из таблицы, составленной на основании многочисленных опытов. Следует иметь в виду, что увеличение пластичности смеси для сохранения ее нерасслаиваемости вызывает соответствующее увеличение значения r и, наоборот, его уменьшение приводит к снижению пластичности.

5. Определение абсолютного объема крупного заполнителя (гравия, щебня или их смеси) $V_{з}^{аб}$. Вычитая из абсолютного объема всех заполнителей абсолютный объем песка $V_{п}^{аб}$, определяют абсолютный объем крупного заполнителя $V_{г(щ)}^{аб}$, в котором при изучении чертежей бетонируемого объекта была заранее установлена максимальная крупность зерен. Если не учитывать сказанного, при использовании гравия (щебня) крупнее допустимого такой запол-

* Для улучшения ряда свойств бетонной смеси и бетона в качестве пятого компонента учитывается воздух, который с помощью ПАВ дозируется с надлежащей точностью в количествах, строго заданных проектом состава бетона.

нитель не пройдет между стержнями или пакетами арматуры, между арматурой и стенками опалубки, что нарушит ритм работы и приведет к браку. Следует учитывать, что при использовании песка, гравия (щебня) более крупного зернового состава можно применять смеси с меньшим содержанием воды.

6. Проверка правильности вычислений абсолютных объемов каждого компонента путем арифметической проверки — их сложения. Сумма объемов должна равняться 1.

7. Переход от абсолютных объемов компонентов бетона к их весовым значениям. Для этого числовые значения абсолютных объемов каждого компонента умножают соответственно на числовые значения их плотности. Объемная масса тяжелого бетона (и других видов бетона) должна отвечать требованиям проекта *. Закончив расчет, переходят к опытным затворениям смеси сначала в лаборатории, затем на производстве для определения стабильности ее свойств (получения смеси надлежащей пластичности-жесткости при стабильности ее параметров на всех технологических пределах, т. е. с надлежащей подвижностью, удобоукладываемостью и формуемостью).

Если пластичность-жесткость и внешний вид смеси (наличие избытка или недостатка песка) при опытном определении на замесе объемом 8 л соответствует заданной величине и смесь не расслаивается, переходят к приготовлению смеси в объеме, требующемся для изготовления серий образцов, позволяющих проверить заданные технические свойства бетона — прочность на различные виды нагрузок, морозостойкость, водонепроницаемость и др. (ГОСТ 10180—62, ГОСТ 4800—59 и ГОСТ 8424—63).

Если пластичность-жесткость смеси (в том числе и внешний вид, расслаиваемость или связность) не соответствует требованиям, которые положены в основу расчета, результаты последнего корректируют по тому же замесу (что возможно сделать, когда в смеси недостаточно песка или пластичность смеси ниже заданной) или другому замесу. При этом не формуют опытных контрольных образцов бетона.

Указанный способ подбора и расчета состава бетонной смеси по сравнению с другими способами отличается простотой. Объем пустот в каменных материалах учитывается по связности бетонной смеси и коэффициенту r , числовое значение которого определено опытами и производством бетонных работ, осуществленных в разных условиях. Действительно, любой способ требует проверки. Даже широко проведенные эксперименты по составлению табличных рекомендаций подбора и назначения состава бетона с учетом особенностей заполнителей также требуют опытных затворений. Это связано с чрезвычайным разнообразием рыхлых каменных мате-

* Собственный вес бетонных и железобетонных конструкций должен соответствовать требованиям проекта. Например, при расчете плотин на сдвиг и опрокидывание важно, чтобы этот вес всегда был больше принятого в расчете. Столь же важно, чтобы собственный вес балок перекрытий был минимальным при заданных величинах прочности бетона.

риалов-заполнителей (см. § 20—34) и исключительным различием свойств цементов.

При проектировании бетона главным является не последний его этап — подбор и расчет, который при любых способах с большей или меньшей затратой времени позволяет получить его состав, а те проектные предпосылки, которые служат основой для получения бетона заданных свойств (правильный выбор материалов, назначенные параметров качества бетона, которые определяют его оптимальные технико-экономические показатели при минимальном расходе цемента и высокой долговечности, условий организации и осуществления бетонных работ, которые реально обеспечивают массовое изготовление бетона).

Многолетняя практика показала, что использование этого простого способа подбора и расчета состава бетона не приводит к увеличенному содержанию цемента в бетоне или разрушению бетона, получению бетона более низкого качества. Основное внимание должно уделяться этапам проектирования бетона, обеспечивающим его правильный выбор не только по количеству компонентов, но и по их качеству, что значительно сложнее подбора и расчета состава (см. § 39) и, по существу, является содержанием технологии бетона. Никакой способ расчета состава только по одной прочности, без учета всего комплекса требований, не обеспечит долговечную надежную работу бетона.

Существовавшая много лет тенденция подбирать и рассчитывать состав бетона по показателю прочности, несомненно, принесла пользу и позволяет осуществлять это с надлежащей простотой и скоростью. Однако на дальнейшем этапе развития технологии бетонных работ, когда расширилась область применения бетона, усложнились условия службы конструкций при возросших темпах производства работ на протяжении всего года, при широком и систематически уменьшающемся сроке твердения бетона в пропарочных камерах (в целом при ускорении режима твердения бетона), особенности материалов-компонентов бетона, подбор и расчет состава бетона по прочности позволили применять любые материалы. Последующее воздействие различных агрессивных сред приводит такой бетон к разрушению. Необходимо совершенствовать все стадии проектирования состава бетона, начиная с определения условий службы сооружений, которые должны быть органически связаны, что в конечном счете должно обеспечить подбор и расчет состава долговечного бетона для любых условий работы.

БЕТОННАЯ (РАСТВОРНАЯ) СМЕСЬ

§ 42. Технологические пределы

Изучение бетона начинают с рассмотрения свойств бетонной смеси, а изучение бетонной смеси — с технологии изготовления конструкций, условий производства, материалов и средств производства. Например, применение вибраторов связано с разжижением бетонной смеси при вибрировании. Поэтому при выборе пластичности-жесткости смеси надо учитывать, что при таком разжижении могут создаться условия для ее расслоения.

Расслоение бетонной смеси может происходить и по другим причинам, что надо учитывать при проектировании организации бетонных работ. Приготовление связано не только с краткими по времени процессами смешивания материалов, транспортирования смеси к месту уплотнения и придания заданной конструктивной формы. Эти этапы, или пределы, занимают относительно небольшое время в производстве бетонных работ, но нарушение их может иметь серьезные, а в ряде случаев катастрофические последствия. Недопустимо нарушать и последний предел — уход за твердеющим бетоном (раствором). В этом случае любой по составу бетон, сформованный из высококачественной смеси, приобретает непроектные свойства, становится неопределенным по техническим параметрам.

Виды смесей. Ранее смеси делили по способу уплотнения на трамбуемые (жесткие, типа влажной земли), пластичные и литые. Трамбуемые смеси уплотняли трамбованием, пластичные — штыкованием металлическими стержнями; литые — разливом из специальных устройств — бетонолитых башен. После того как ввели уплотнение бетонных (растворных) смесей с помощью вибрирования, отпало понятие трамбуемой смеси и подавляющее количество бетона стали готовить из жестких и пластичных смесей и относительно немного — из литых. Как для литых, так и для части пластичных смесей, близких по пластичности, вибрирование применять нельзя из-за опасности их расслоения.

Сказанное является результатом недооценки важности разделения процесса проектирования бетона на стадии — проектирование смеси с учетом требований их приготовления на всех технологических переделах и проектирование бетона, т. е. получение технологического камня с заданными свойствами. Только тщательно перемешав рыхлые материалы и воду, удастся уплотнить смесь в монолит, что обеспечивает проектные свойства смеси и способность формироваться при минимальной затрате сил и средств. Такое состояние называют пластичным. Смесь (жесткая, пластичная, литая) должна обладать указанным свойством, если в ней будет такое количество воды, которое пластифицирует — придает ей пластичность, или при меньшем количестве воды, но с вибрированием, т. е. созданием тиксотропного разжижения цементного теста. По этой причине понятия пластичности и жесткости (смесь непластична в есте-

ственном состоянии при выходе из бетоносмесителя, когда ее не подвергали вибрированию) можно объединить в одно — пластичность-жесткость смеси. Объединенное понятие для определения состояния бетонной смеси, измеряемое по осадке конуса (в см) или по осадке конуса при его переформировании после вибрирования путем замера времени (в с), затраченного на этот процесс, не позволяет оценивать качество смеси, ее пригодность для производства работ после всех технологических переделов.

Действительно, технические переделы в разной степени влияют на стабильность состояния смеси в процессе бетонирования. Следовательно, требуется оценивать ее состояние после каждого технологического передела, а именно: после перемешивания, выгрузки из смесителя и доставки к месту укладки качество смеси характеризуется подвижностью; после распределения в опалубке — удобоукладываемостью и после уплотнения — формуемостью. Если смесь отвечает этим понятиям, подбор смеси произведен качественно и бетон в конструкции будет отвечать проектным предпосылкам.

Если смесь расслаивается на любом из переделов, требуется вновь ее проектировать. К сожалению, в нормативных материалах этот вопрос не рассматривается. В лаборатории проверяют осадку конуса или время переформирования без анализа качества смеси (т. е. сохранения однородности и пластичности-жесткости) после каждого технологического передела. Смесь одной и той же пластичности-жесткости может оказаться расслоенной в момент выхода из бетоносмесителя, при транспортировании или уплотнении.

Из расслаивающейся смеси нельзя получить бетон высокого качества, что легко установить путем определения отдельных свойств бетонной смеси или испытания контрольных образцов, изготовленных из смеси, взятой из разных мест приготовленной для укладки порции.

Понятия подвижность, удобоукладываемость и формуемость связаны между собой, и ни одно из них не должно отличаться от заданных проектом, т. е. на каждом технологическом переделе нужно сохранять заданное числовое значение пластичности-жесткости в однородной бетонной смеси. Потеря однородности, в первую очередь, связана с наличием в бетонной смеси крупного заполнителя с зернами различной формы и размеров, с особенностями цементного теста разной консистенции* — степени мягкости, густоты, связности и адгезии к поверхности заполнителей (мелкого — песка и крупного — гравия или щебня).

Однако при выборе средств, повышающих связность компонентов бетонной смеси, всегда надо иметь в виду конечную цель — получение не только однородного бетона, но обеспечение необходимой по свойствам структуры цементного камня. Например, можно повышать связность бетонной смеси, вводя в цемент гидравличе-

* Если консистенция хорошо характеризует густоту, связность таких материалов, как краски, жиры, смазки, и может быть применена для оценки состояния цементного теста, то использование ее для оценки бетонной (растворной) смеси нецелесообразно.

Таблица VII.1

Пластичность-жесткость * бетонной смеси		Технологические условия, дополняющие требования к пластичности- жесткости смеси	Механизм для формования бетонной смеси	Вид бетона (железобетона)	Рекомендации по применению
по осадке конуса, см	по техниче- скому виско- зиметру				
1—2	10—40	Подвижность: сохране- ние заданной пластично- сти-жесткости без рас- слоения от перемешива- ния до разгрузки в опа- лубку при любых положе- ниях и способе транспортиро- вания	Поверхностные вибро- раторы и вибропло- щадки, виброукладоч- ные машины и вибро- вакуумные устройства	Монолитный и сборный с любой арматурой	Конструкции с большой пло- щадью и небольшой высотой (10—30 см): дорожные и аэро- дромные покрытия, основания под покрытия из различных ма- териалов, полы помещений, пли- ты крепления откосов и т.д.
>2—<5	10	Укладываемость: со- хранение заданной пла- стичности-жесткости без расслоения при распре- делении в опалубку в лю- бую погоду	Внутренние вибро- раторы, в некоторых случаях площадочные вибраторы и группа подвесных внутренних вибраторов	То же	Массивные блоки различного объема и конфигурации с воз- можностью последующего уплот- нения смеси: фундаментные блоки шлюзов и других гидро- технических сооружений, опо- ры мостов, ленточные фунда- менты, подпорные стены и ана- логичные им блоки конструк- ций (сооружений)

Пластичность-жесткость * бетонной смеси		Технологические условия, дополняющие требования к пластичности-жесткости смеси	Механизм для формования бетонной смеси	Вид бетона (железобетона)	Рекомендации по применению
по осадке конуса, см	по техническому вискозиметру				
>5—<10	10	Формуемость: сохранение заданной пластичности-жесткости без расслабления при уплотнении в конструкции (сооружении) при любой погоде до плотности, определенной при подборе состава	Внутренние вибраторы, подвесные тисковые вибраторы, виброплощадки, поверхностные вибраторы	Монолитный и сборный с любой арматурой	Конструкции различного сечения и конфигурации: балки, плиты перекрытий с балками, колонны, сваи, трубы, обделки шахт и тоннелей, бункера силосов, ящики-гиганты и т. д.
>5—<15**	10—200	—	Виброплощадки***, подвесные тисковые вибраторы, внутренние вибраторы, центрифуги	Сборный железобетон с любой арматурой, изготовляемый только в заводских условиях	Конструкции разного сечения и конфигурации, бордюры, каменья, оконные перемычки, лестничные марши, шпалы, опоры контактной сети, ступени, оболочки, выше перечисленные конструкции и т. д.

* Показатели пластичности-жесткости приведены для пластифицированных смесей.

** Бетонные смеси с большей осадкой конуса применяют весьма редко (в сильно армированных конструкциях значительной высоты и не большого поперечного сечения, когда из-за применения металлической опалубки исключается использование подвесных вибраторов, а уплотнение внутренними вибраторами неэффективно).

*** Виброплощадки различной грузоподъемности и длины, но с синхронизированным приводом.

Таблица VII.2

№ образца	Состав цемента в растворе 1:3	В/Ц	Продолжительность твердения, сут.				
			1	2	3	4	12
1	Синтетический, мо- номинеральный из . . .	0,45	Затвердели после затворения за 3 ч			76	115
2	№ 1+0,3% с. с. б.	0,45	Не твер- деют	—	—	Затвер- дели	45
3	№ 2+3% гипса . . .	0,50	То же	—	—	То же	—
4	№ 3+5% минерала СзА	0,50	—	Затвер- дели	—	100	—

Примечания: 1. Образцы № 1 и 2 длительный срок не теряют исходной пластичности. 2. Образцы № 3 после 50 ч, прошедших с момента первого затворения, затворяются снова.

ские, удерживающие воду добавки, бентонитовую глину или используя другие приемы изменения состава цемента. Указанные приемы необходимы там, где бетон будет работать в условиях постоянного смачивания при положительных температурах воздуха, и недопустимы в условиях многократного насыщения водой, замораживания и истирания. Следовательно, выбирая приемы, обеспечивающие связность бетонной смеси, нельзя допускать снижения запроецированных технических свойств бетона.

Определение состояния смеси сводится в лабораторных условиях к измерению осадки конуса или времени переформирования смеси (без учета сказанного в § 52). В табл. VII.1 приведены соответствующие рекомендации по выполнению таких определений и интервалу пластичности-жесткости бетонной смеси.

Факторы, влияющие на состояние смесей. Между вяжущим и водой в присутствии воздуха сразу вслед за смешиванием начинается процесс физико-химического взаимодействия, поэтому свойства бетонной (растворной) смеси систематически изменяются. Это хорошо видно по определению начала и конца схватывания и, в частности, по изменению показателя пластической прочности цементного теста (см. § 9). Физико-химический процесс — основа изменения состояния смесей — связан со смачиванием поверхности зерен цемента, с процессом гидролиза и гидратации и, как следствие этого, систематическим увеличением дисперсности цемента*. Сказанное хорошо иллюстрируется примером торможения гидратации цемента большими дозами с. д. б. (см. § 47), когда загустевание цементного теста значительно замедляется.

* Ряд исследователей считают, что в затвердевшем цементном тесте удельная поверхность твердых частиц больше 180 м²/г, а через сутки — 10 м²/г. Эти цифры условны, однако позволяют создать представление о характере развития исходной поверхности сухого цемента.

В наших опытах показано, что при затворении мономинеральных синтетических цементов (силикатов кальция C_3S и C_2S) с добавками с. с. б., введенными в тесто в больших количествах, резко тормозится процесс загустевания теста (табл. VII.2).

Следует заметить, что твердение полиминерального цемента всегда протекает медленно, так как условия твердения каждого минерала этой физико-химической системы (полиминерального и полидисперсного цемента, зерна которого в разной степени агрегированы) резко различны, что не позволяет по каждому из минералов их оптимизировать. В нашем случае большие количества с. с. б. блокируют поверхность зерен от действия жидкой фазы — воды. В этих опытах изменяются не только сроки загустевания (постепенной потери пластичности), но и сроки упрочнения образцов, которые значительно отдалаются. При этом крупные зерна цемента в микробетоне Юнга при отсутствии необходимой влажности внешней среды для их участия в процессах твердения останутся в виде балласта — неиспользованного вяжущего.

Таблица VII.3

№ пп.	С. с. б., % от массы цемента	Начальная пластич- ность и В/Ц смеси	Состояние смеси при продолжительности наблюдения за цементным раствором, сут.				
			1	2	30	100	300
1	0,50	Полный расплав при В/Ц-0,5	Смесь пластич- ная	Смесь пластич- ная	Затвердела	—	—
2	0,75				Смесь пла- стичная	Затвердела	—
3	1,00					Смесь пла- стичная	— Не затвер- дела То же
4	1,50						
5	2,00						

В полиминеральных цементах при введении ПАВ типа с. с. б. (с. д. б.) для сроков растормаживания имеет значение не только наличие минерала C_3A , но и вид его связи с силикатами. В этих опытах минерал C_3A не связан с силикатами физико-химической связью, а входит в смесь как порошкообразная добавка, что и не обеспечивает возможность эффективного растормаживания блокировки поверхности зерен коллоидными пленками с. с. б.

Из табл. VII.3 видно, что процесс твердения полиминеральных безгипсовых цементов тормозится дольше, однако доза пластификатора значительно выше. Увеличение дозирования с. с. б. (с. д. б.) позволяет изменить пластифицирующий эффект только до дозирования в 0,5%. При дальнейшем возрастании дозы пластификатора увеличивается только эффект торможения процесса твердения. Следовательно, проектирование бетонных (растворных) смесей заданной пластичности-жесткости нельзя осуществлять без предварительного

го всестороннего исследования свойств компонентов (цемента, песка, гравия, щебня). Необходимо помнить, что пластичность-жесткость бетонной (растворной) смеси меняется с изменением температуры воздуха. Это непосредственно связано со скоростью гидролиза и гидратации цемента (ускорением процесса при повышении и замедлением при снижении температуры воздуха) и в значительно меньшей — со степенью испарения воды из смеси. Например, при температуре воздуха 35°C и невысокой относительной влажности смеси показатель пластичности ее уменьшается на 30% в пределах времени до 40 мин.

§ 43. Роль гипса в процессе загустевания бетонных смесей и твердения портландцемента и цементов на его основе

Определение роли гипса в процессе твердения портландцемента и цементов на его основе начнем с рассмотрения безгипсовых, нестандартных цементов. Роль гипса в процессе структурообразования цементного камня из полидисперсного и полиминерального цемента и воды, протекающем в самых различных условиях, нельзя рассматривать вне сведений о минералах цемента (см. § 4). Напомним, что реакции между полиминеральными зернами цемента протекают с двухводным гипсом, который сам не образует с водой вяжущего материала.

Наличие гипса в цементе приводит к образованию новых соединений, которых нет в безгипсовом цементе. Эти соединения названы гидросульфоалюминат а и м и кальция и имеют две формы: высокосульфатную $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \times \times 3\text{CaSO}_4 \cdot 31\text{H}_2\text{O}$ и низкосульфатную $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{CaSO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$. Как видно из химической формулы, для образования этих соединений в цементах должен присутствовать минерал C_3A . Каждая из этих двух форм гидросульфоалюмината обладает свойствами, которые широко используются в строительном производстве.

На рис. VII.1 показано изменение объема образца, изготовленного из гидросульфоалюмината высокосульфатной формы с избытком извести. Основным признаком этой формы гидросульфоалюмината является значительное расширение объема такого соединения. Для его образования из минерала C_3A и гипса в их эквимолекулярной смеси на 1 вес. ч. C_3A надо брать 1,91 вес. ч. $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ и 1,94 вес. ч. H_2O . Для регулирования сроков схватывания (см. § 12) такое соотношение количеств вводимого гипса и воды значительно меньше. Это видно из расчета соотношения этих компонентов в цементах.



Рис. VII.1. Разрушение раствора при образовании гидросульфоалюмината в среде со 100%-ной относительной влажностью воздуха

Из ГОСТа на цементы следует, что максимальное содержание химически чистого гипса не должно превышать 7% (или 3,5% в расчете на ангидрид серной кислоты SO_3). Следовательно, если в сульфатостойком портландцементе (см. § 13) содержится максимально допустимое количество минерала C_3A —5%, то химически чистого гипса надо вводить при помолке $5 \cdot 1,91 = 9,55\%$, что больше максимальной нормы. В рядовых портландцементях содержание минерала C_3A различно и значительно превышает количество минерала C_3A в сульфатостойких цементах, где оно нормируется особыми приемами*, и в обычных портландцементях может достигать до 12—14%. Поэтому во всех цементах после твердения остается некоторое количество минерала C_3A , для которого не было в цементе нужного количества гипса для образования гидросульфатоалюмината высокосульфатной формы. Увеличение гипса в цементе возможно только в том случае, когда цемент размолот до большей дисперсности.

Ограничение содержания гипса в цементе связано с физическим эффектом — расширением объема новообразований, сопровождающим эту реакцию, которое допустимо лишь на период, когда цементное тесто (цементный камень) находится еще в упруго-вязкопластичном состоянии, позволяющем возникающим в нем напряжениям от расширения новообразований гидросульфатоалюмината рассасываться — релаксироваться.

В опытах по испытанию образцов на механическую прочность было показано, что указанное в ГОСТе количество гипса обеспечивает его связывание с минералами в гидросульфатоалюминаты без деструкции. Только значительное увеличение дисперсности цемента с применением измельчения клинкера и гипса в водной среде позволяет связываться значительно большему их количеству без деструкции цементного камня. В табл. VII.4 показаны результаты одного из таких опытов, в которых использован клинкер разного минералогического состава и разных петрографических показателей**.

В одном и другом клинкерах (опыты № 1—20) по расчету содержится 11% минерала C_3A при различных минералогических составах. В цементе обоих видов не наступает разрушения образцов с высоким содержанием гипса (в 20%), если помол клинкера и гипса в водной среде продолжается не менее 180 мин (опыты № 16—20 и 31—35). При этом отмечается, что в опытах на клинкере, содержащем большее количество минерала C_3A (11%) и 20% гипса, получены максимальные результаты, в то время как это же количество гипса является избыточным для другого цемента с тем

* Для изготовления цементов с нормированным содержанием минерала C_3A в сырье вводят добавки, способствующие преимущественному образованию в цементе альюмоферритной фазы.

** Петрографические характеристики — это характеристики минералогического состава, структуры клинкера и существа процессов обжига, на протяжении которого формируются новые — искусственные физико-химические системы, в нашем случае — клинкер портландцемента.

Таблица VII.4

№ опыта	Способ помола и минералогический состав клинкера	Характеристика измельчения	Количество гипса, %	Относительная прочность, %						
				при сжатии			при изгибе			
				Продолжительность твердения, сут.						
				28	90	180	365	90	130	
1	Сухой помол в течение 185 мин; C ₃ S — 51%; C ₂ S — 22%; C ₃ A — 11%; C ₄ AF — 11%	Остаток на сите № 0085 — 10—12%	3	100	111	113	135	100	171	187
2			5	100	113	127	155	130	171	228
3			10	80	113	135	170	113	145	228
4			15	52	72	105	158	82	118	236
5			20	46	55	52	Разрушение	58	52	Разрушение
6	Мокрый помол в течение 90 мин; тот же состав	Остаток не определен	3	80	92	114	—	172	181	—
7			5	77	111	129	—	198	183	—
8			10	70	129	168	—	200	200	—
9			15	52	47	51	—	51	70	—
10			20	38	43	24	Разрушение	43	Разрушение	—
11	Сухой помол в течение 370 мин; тот же состав	То же	3	75	95	112	—	139	146	—
12			5	80	108	132	—	178	170	—
13			10	100	119	143	—	152	200	—
14			15	100	128	128	Полное разрушение	151	178	—
15			20	55	63	53	Разрушение	62	Полное разрушение	—
16	Мокрый помол в течение 210 мин; тот же состав	Остаток на сите № 0085 — 1%	3	110	132	139	152	166	160	145
17			5	95	115	132	137	167	166	188
18			10	109	140	137	162	155	218	188
19			15	108	146	157	172	193	178	218
20			20	60	85	134	185	80	180	236

№ опыта	Способ помола и минералогический состав клинкера	Характеристика измельчения	Количество гипса, %	Относительная прочность, %						
				при сжатии			при изгибе			
				Продолжительность твердения, сут.						
				28	90	180	365	90	180	365
21	Сухой помол в течение 180 мин; C ₃ S—33%; C ₂ S—33%; C ₃ A—11%; C ₄ AF—19%	Остаток на сите № 0085—10—14%	3	100	118	127	156	100	150	173
22			5	95	109	127	164	110	150	187
23			10	56	93	113	136	140	—	247
24			15	28	30	48	Разрушение	17	40	Разрушение
25			20	21	28	Разрушение	—	—	—	—
26	Мокрый помол в течение 80 мин; тот же состав	Остаток на сите № 0085—12—14%	3	59	74	100	—	122	128	—
27			5	55	69	88	—	128	138	—
28			10	63	96	128	—	183	198	—
29			15	25	59	72	—	107	168	—
30			20	21	Разрушение	Разрушение	—	Разрушение	—	—
31	Мокрый помол в течение 180 мин; тот же состав	Остаток не определен	3	83	110	112	122	72	140	158
32			5	77	90	107	111	153	110	162
33			10	83	97	111	126	158	154	178
34			15	62	86	110	129	170	197	185
35			20	34	19	31	54	50	103	109
36*	Сухой помол; твердение в растворе Na ₂ SO ₄ ; C ₃ S—51%; C ₂ S—22%; C ₃ A—11%; C ₄ AF—11%	s = 5000 см ² /г	0	95	69	Разрушение	—	—	—	—
37*	То же	s = 3000 см ² /г	5	248	176	191	138	—	—	—

* Растворные образцы при хранении в сульфатной среде в зависимости от количества несвязанного с гипсом гидратированного минерала C₃A разрушаются с разной скоростью.

же содержанием этого минерала. В опытах № 16—20 оптимальным является 15% гипса (опыт № 19) и в опытах № 31—35 соответственно 10—15%, что отличается от химического соотношения компонентов гидросульфоалюмината, равного $11 \cdot 1,91 = 21,01\%$.

Это различие указывает на неоднородность в клинкерных составах каждого цемента. Опыты проведены на растворных образцах состава 1 : 2,5, изготовленных из пластичного раствора с пластичностью, определяемой по распылу стандартного конуса (диаметром 125—135 мм). Смеси приготавливались с пластификатором с. с. б. (см. § 47). Клинкер до помола в лабораторной мельнице пролежал на воздухе 5 лет. Соотношение воды и цемента в растворных образцах различно ($B/C = 0,34—0,46$). Содержащийся в цементе второй компонент гидросульфоалюмината — минерал C_3A распределяется примерно пропорционально в массе зерен цемента, поэтому для образования гидросульфоалюмината из всего количества минерала C_3A необходимо обеспечить его вскрытие путем размолта цемента до высокой степени дисперсности.

На цементных заводах это не выполнимо, хотя бесспорен технический эффект от связывания всего количества минерала C_3A в комплексную соль — гидросульфоалюминат кальция ($3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 3CaSO_4 \times 31H_2O$). На рис. VII.2 видно резкое снижение производительности мельниц при относительно небольшом увеличении дисперсности цемента.

Прочность образцов с высоким содержанием гипса снижается по следующим причинам: 1) 15 и 20% активного клинкера порошка заменяют на порошок гипсового камня — неактивного материала; 2) гидросульфоалюминат, образовавшийся при твердении цемента из всего количества минерала C_3A , имеет большую прочность, чем его гидратированный трехкальциевый алюминат; 3) более низкая прочность у части образцов в опытах № 20 и 35 показывает, что образование гидросульфоалюмината проходило в условиях частичной деструкции цементного камня, имеющей локальный характер и связанной с петрографией клинкера. Следовательно, часть минерала C_3A вступила в реакцию образования гидросульфоалюмината в момент, когда связи в образце не обладали необходимой для их деформирования податливостью — сделались хрупкими.

Рассмотрим, что же показывает петрографическое исследование таких образцов с различным содержанием в них гипса. Для этого

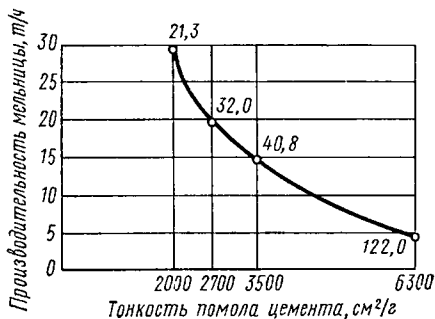


Рис. VII.2. Зависимость производительности шаровых мельниц при увеличении тонкости помола клинкера

от исследуемых образцов надо взять шлифы и их проанализировать под оптическим микроскопом.

Образец № 15 содержит значительное количество гидросульфоалюмината в виде тонкоигловчатых кристаллов с показателем преломления 1,47 *. Встречается и другая форма кристаллов сульфоалюмината, представленная слабодвупреломляющей тонкозернистой массой с тем же показателем преломления. В образце гипс не наблюдается.

Результаты петрографического анализа показывают, что весь гипс (20% от массы цемента) связался с минералом C_3A и это было обеспечено более тонким измельчением по сравнению с образцами № 1—10, продолжавшимся 190 мин. Несмотря ни на что, образцы разрушались, что видно из снижения показателей механической прочности по сравнению с показателями прочности образцов, содержащих меньше гипса. Этот результат является следствием образования гидросульфоалюмината на стадии начавшегося упрочнения структуры цементного камня из силикатов кальция (алита и белита).

По-видимому, две кристаллические формы гидроалюмината, наблюдаемые в образце, можно связывать со сроками их образования. Присутствие тонкоигловчатых кристаллов гидросульфоалюмината в структуре цементного камня служит показателем позднего формирования новообразования и влечет за собой появление микротрещин. Однако это является пока гипотезой, и многие считают, что образование тонкоигловчатых кристаллов указанного соединения — положительный факт в твердении.

В образце № 19 значительно меньше гидросульфоалюмината, чем в образцах с цементом обычного сухого помола, гипса в образце нет, наблюдаются обломки кристаллов карбоната кальция, гексагональные пластинки не встречаются **.

Образцы № 9 и 15 имеют практически одинаковую прочность при сжатии и изгибе. Однако если ни один из образцов серии под № 9 не разрушился, то в серии № 15 к 180 сут. балочки полностью разрушились. Из этого можно заключить, что помол образцов в воде за 90 мин эффективнее по результатам диспергирования полиминерального клинкера и перемешивания теста из него, чем сухой помол, который продолжался 370 мин.

Петрографические составы этих двух серий резко отличны, в частности в этих образцах не видны тонкоигловчатые кристаллы гидросульфоалюмината.

Сказанное подтверждается петрографическим анализом других образцов этого же приема измельчения. Так, у образца той же продолжительности измельчения с большим содержанием гипса (20%) резкое уменьшение прочности и разрушение в период от 180 до

* Показатель преломления определяется на шлифах в проходящем свете.

** Гексагональные пластинки — одна из кристаллических форм продуктов гидратации алюминатов кальция и, в частности, трехкальциевый гидроалюминат. Отмечается, что эта форма появляется в качестве второй кристаллической формы, переходящей в кубическую в зависимости от условий твердения цемента.

365 сут. твердения происходит из-за наличия несвязанных гипса и гидратированного алюмината. Это естественно, так как опыты проведены со значительно большим количеством гипса, который при недостаточном вскрытии помолом клинкера минерала C_3A не смог связаться в первые сутки и образовать гидросульфоалюминат. В итоге, ввиду его образования в более поздние сроки, произошло разрушение структуры формирующегося цементного камня, и в трещинках зафиксированы кристаллы гидросульфоалюмината, что позволяет сделать вывод о протекании этого химического процесса и его физических результатах — необратимых деформациях в структуре цементного камня.

Рассматривая опыты и шлифы образцов на более тонко измолотом цементе (№ 19 и 20) того же приема диспергирования в водной среде за 210 мин, можно убедиться, что вскрытие поверхности минерала C_3A позволяет в наибольшей степени приблизиться к эквивалентному соотношению между содержащимся в клинкере минералом C_3A и количеством гипса, которое надо вводить в цемент. Следовательно, в этом случае в первые сутки формирования структуры цементного камня, когда она еще находится в вязкоупруго-пластичном состоянии, образуется высокосульфатная форма гидросульфоалюмината без образования в камне разрывов его сплошности. Прочность таких образцов после года твердения значительно выше прочности эталонных образцов 28-суточного твердения. Действительно, эталонный образец № 1 с 3% гипса через 1 год имеет прочность больше в 1,35 раза, чем через 28 сут., а образец № 20 — соответственно больше в 1,86 раза. Такие же результаты получены и на клинкере с другими петрографическими характеристиками.

Образец № 29 содержит значительное количество кристаллов гидросульфоалюмината кальция тонкоигольчатой формы с показателем преломления около 1,47; видны кристаллы гипса и много кристаллов карбоната кальция. На образце-балочке замечено много глубоких трещин, так как при данной степени дисперсности цемента часть минерала C_3A не была вскрыта, что задержало процесс образования гидросульфоалюмината. Образец изготовлен из цемента, измолотого в воде в продолжение 80 мин.

Образец № 24 содержит значительное количество тонкоигольчатых кристаллов гидросульфоалюмината кальция, имеющих показатель преломления около 1,47. Встречаются единичные кристаллы гипса, а также двупреломляющие гексагональные пластинки со средним показателем преломления 1,522 и 1,536 (гидроалюминаты). В образце содержится значительное количество карбоната кальция.

На образце-балочке замечено много крупных трещин, и размер балочки стал больше эталона. Цемент с таким содержанием гипса стал расширяющимся (а следовательно, и напрягающим). Это происходит по следующим причинам: 1) химические процессы, вызывающие увеличение объема образца, протекают в структуре цементного камня без передачи усилий, возникающих при увеличении образца от расширения новообразований гидросульфоалюмината,

и проходят без внешнего обжатия формирующегося цементного раствора или бетона (так как это может происходить при заполнении растворной или бетонной смесью пространства между обделками или тубингами шахт, тоннелей и т. д.) с запаздыванием против сроков, когда напряжения в образце релаксируются и 2) не весь минерал C_3A вступил в реакцию к 180 сут., а отсюда дальнейшее развитие процесса вызывает деформации, приводящие к полной потере монолитности образца. Увеличение содержания гипса в таком цементе (образец № 25) вызывает в большем количестве образование гидросульфоалюмината высокосульфатной формы, а

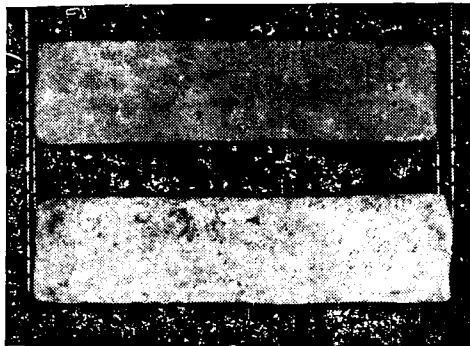


Рис. VII.3. Разрушение образца вследствие позднего образования гидросульфоалюмината

следовательно, и разрушение образца в более короткие сроки (в этом случае реакция образования гидросульфоалюмината кальция происходит за более короткие сроки чем 180 сут.). Действительно, в этом образце разрушение произошло после 90 сут. твердения. На рис. VII.3 показан деформированный образец-балочка.

Анализ других образцов этой серии (например, № 35), в том числе измельчение образцов, для которых цемент был измельчен за 180 мин в воде, показывает при наблюдении пре-

парата в оптическом микроскопе, что значительно полнее прошла реакция образования гидросульфоалюмината. В поле зрения отмечается меньше гипса и гидросульфоалюмината. Кристаллы гидросульфоалюмината, видимо, формируются при отсутствии препятствий для их роста и таких относительно небольших размеров, которые не удастся увидеть в поляризационный микроскоп.

Можно высказать гипотезу, что в отдельных случаях при полноценном процессе образования гидросульфоалюмината кальция из гипса и всего количества C_3A , находящегося в цементе, в начальный период гидролиза и гидратации силикатных минералов и минералов алюмоферритной фазы в поле зрения микроскопа не должно быть ни компонентов этого новообразования, ни его самого. Это и будет оптимальным случаем равномерного распределения в цементном камне (в итоге высокого дисперсного помола и перемешивания образующегося полиминерального цемента в воде) гидратирующихся новообразований с максимально возможным исправлением структуры камня путем разрушения коагуляционных* структур

* Коагуляция — это сгущение, коагуляционные структуры — структуры, в которых в избытке находится химически несвязанная вода.

гидратированного алюмината и таких же структур других минералов, образованных из-за наличия в нем гидратированного минерала C_3A (C_3AH_6 или $3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 6H_2O$).

При разрушении таких структур силикатные минералы будут обеспечены наиболее благоприятными условиями для гидролиза и гидратации, что видно из опытов на безгипсовом цементе, т. е. предельном случае, когда весь гидратирующийся минерал C_3A образует коагуляционные структуры. Одним из прямых приемов проверки качества образцов является их испытание на длительную сульфатостойкость. Если отсутствует в цементе минерал C_3A , то ион



Рис. VII.4. Сульфоалюминатная коррозия в образцах на безгипсовых цементах: а — при сухом; б — при мокром способе помола клинкера

SO_4^{2-} , находящийся в воде-среде, не окажет отрицательного воздействия на структуру цементного камня. Для образования гидросульфоалюмината кальция не будет второго компонента.

В табл. VII.4 приведены данные, подтверждающие, как сказанное согласуется с гипотезой о стойкости безгипсовых образцов*. Образцы, изготовленные на цементах без гипса с любым содержанием минерала C_3A в сульфатных средах всегда разрушаются (рис. VII.4) аналогично тому случаю, о котором сказано выше.

Приведенные сведения о роли гипса в твердении полиминерального и полидисперсного портландцемента и цементов на его основе (пуццолановом, шлакопортландцементе, смешанных цементах) показывают, как важно знать особенности твердения цементов, меняющиеся по ряду причин. Однако сказанное о роли гипса надо расширить сведениями о поведении в бетонах гидросульфоалюмината, образованного при его участии. Впервые было показано (Т. Ю. Любимовой), что гидросульфоалюминат кальция высокосульфатной формы не является устойчивым соединением.

* В зависимости от алюминатности цемента, когда в нем нет гипса, меняется скорость разрушения образцов в сульфатной среде [24, 70].

Это своеобразное соединение может устойчиво работать в среде с относительной влажностью водяного пара в атмосфере не ниже 30—35%. Поэтому цементы на основе такого соединения много лет устойчиво работают в виде зачеканки между блоками и тубингами тоннелей метрополитенов. Различные свойства гидросульфоалюмината прямым образом отражаются в разнообразных технических свойствах бетона (раствора): прочности на различные виды деформирования, морозостойкости, сульфатостойкости, воздухоустойчивости, усадки, ползучести. Поэтому неверно рассматривать свойства гидросульфоалюмината и технические свойства искусственного камня (бетона, раствора или цементного камня) в отрыве от технологии производства цемента и бетона (раствора).

Состав материала без описания технологии его осуществления не дает информации, необходимой для производства строительных работ. Свойства бетона формируются в сложных физико-химических процессах, начало которым положено при изготовлении цемента, конец их формирования наступает на строительном объекте после тщательно проведенного ухода за твердеющим бетоном. Поэтому любое название исходных материалов, из которых формируется бетон (раствор) сооружения (конструкции), без соблюдения всех требований технологии производства работ не может определять качество бетона.

Сульфатостойкость цемента одного и того же расчетного минералогического состава различна. Понятие расчетный состав — условно, так как оно не учитывает, какое количество минерала C_3A вскрыто помолом из общего количества, находящегося в полиминеральном и полидисперсном цементе. То же касается и других минералов. По этой причине рекомендуется новое понятие — действующий минералогический состав, определяющийся продуктом гидролиза и гидратации цемента. Из-за недостаточной дисперсности цемента, при которой часть минерала C_3A не вскрыта помолом, для предотвращения сульфатного разрушения в цементах нормируется количество гипса. В сульфатостойких цементах нормируется и предельное содержание минерала C_3A .

Для выяснения свойств гидросульфоалюмината кальция были поставлены опыты на синтетическом минерале C_3A и химически чистом гипсе. Для ряда опытов в смесь вводилась химически чистая CaO . Было выяснено следующее:

1. С повышением температуры твердения образуется низкосульфатная форма гидросульфоалюмината, если в цементном тесте был не гидратирующийся, а гидратированный алюминат (в цементном камне могут находиться как трехкальциевый алюминат, так и трехкальциевый гидроалюминат).

2. Пропаренные образцы гидросульфоалюмината кальция быстрее теряют прочность при последующем воздушном хранении.

3. Повышение температуры внешней среды резко ускоряет процесс образования гидросульфоалюмината (табл. VII.5).

4. Образцы из чистого гидросульфоалюмината кальция при твердении во влажных условиях в течение восьми и больше меся-

Таблица VII.5

Температура, °C	Количество связанного иона $\text{SO}_4^{''}$, % к эквивалентному, при продолжительности выдерживания образцов									
	ч				сут.					
	2	4	6	24	2	4	9	11	18	25
0	27	28	29	46	—	68	—	82	—	—
20	25	25	27	43	61	—	82	—	—	92
45	34	54	59	80	71	—	84	—	86	—
80	38	72	79	86	86	—	90	—	90	—

Примечание. При наличии CaO в смеси образование гидросульфоалюмината несколько ускоряется при 20° C и значительно ускоряется за первые 2 ч при 80° C.

цев имеют невысокую прочность (в опытах эта прочность не превышала 25 кг/см², или 2,5 МПа).

5. Состав образующегося гидросульфоалюмината кальция не зависит от соотношения минерала C_3A и гипса в смеси, если реакция протекает при стандартной температуре 15—20° C.

6. При высоких значениях отношения массы воды к массе минерала и гипса $\text{B}/(\text{C}_3\text{A} + \text{гипс})$ образцы не твердеют в атмосфере насыщенного пара.

7. На количество связанного гипса кроме температуры внешней среды, в которой протекает процесс, влияет соотношение в реакционной смеси минерала C_3A , гипса и воды (табл. VII.6). Увели-

Таблица VII.6

Количество эквивалентов гипса на один эквивалент C_3A	Количество связанного иона $\text{SO}_4^{''}$, % к эквиваленту, при продолжительности выдерживания						
	ч				сут.		
	2	5	9	24	4	11	25
0,5	50	50	50	50	50	50	50
1,0	49	83	92	88	89	88	90
1,5	112	117	121	116	119	113	114

Примечание. Опыты показывают, что наименьшая водостойкость образцов зависит от состава смеси. Чем меньше в ней гипса, тем выше водостойкость. Лучший результат имели смеси, в которых гипса было меньше 0,45—0,5 эквивалента.

чение гипса в смеси (или увеличение количества эквивалентов гипса на один эквивалент минерала C_3A) за одно и то же время резко увеличивает количество связанного гипса (или связанного иона $\text{SO}_4^{''}$ в % к эквивалентному количеству). В этом опыте количество воды также варьировалось из расчета необходимости гидратации

избыточного минерала C_3A , не вступающего в реакцию при меньшем содержании гипса, и образования новых количеств гидросульфатоалюмината. Однако при этом образцы теряют прочность при последующем твердении в воде (табл. VII.7).

8. Избыток свободной CaO при образовании гидросульфатоалюмината из компонентов C_3A + гипс + вода приводит к значительной потере прочности образцов в любых условиях твердения и к их набуханию в атмосфере насыщенного пара с потерей связности материала.

Количество извести, близкое к оптимальному, при соответствующем подборе состава реакционной смеси и первоначальных условиях твердения во влажной среде обеспечивает максимальную морозостойкость в серии испытанных составов (опыт № 7, табл. VII.7).

Таблица VII.7

№ опыта	Количество эквивалентов гипса на один эквивалент минерала C_3A	Добавка CaO , % к массе минерала C_3A	Отношение $B/(C_3A + \text{гипс})$	Условия твердения	Предел прочности при сжатии, $кг/см^2$ (10^{-1} МПа)		Потеря предела прочности при твердении в воде, %	Морозостойкость, циклы
					после 60 сут.	после 40 сут. пребывания в воде		
1	0	—	1,27	Влажные, воздушные	0	—	—	—
2	0,25	—	0,88	То же	90	—	—	—
3	0,50	—	0,89	.	130	90	30	22—24
					301	111	68	15
					299	122	59	25
4	0,75	—	0,90	.	450	Разрушились через 5—8 сут.	100	4
					279	86	78	29—30
					224	Разрушились через 4 сут.	100	3
5	1,0	—	0,88	.	189	53	69	20
					174	Разрушились через 30 сут.	100	10
					0	—	—	—
6	0	—	1,40	.	100	—	—	—
					111	80	28	48
					308	Разрушились через 45 сут.	100	13
7	0,25	3	0,91	.	198	82	59	48
					432	Разрушились через 19 сут.	100	4—6
					161	83	48	20
8	0,50	3	0,92	.	147	Разрушились через 3 сут.	100	0
					96	То же	100	0
					124	»	100	0

Примечание. Образцы из чистого минерала C_3A с добавкой CaO твердели 60 сут. в атмосфере насыщенного пара, находясь в формах, так как не приобрели прочности. После этого образцы были помещены в холодильную камеру. Разрушение их специфическое — они постепенно уменьшаются в размере за счет округления ребер и углов. После потери кубической формы образцы снимали с испытания. Образцы, разрушившиеся ранее 13—15 циклов замораживания и оттаивания, постепенно рассыпались на мелкие части.

Приведенный экспериментальный материал показывает на своеобразность свойств минерала C_3A и гидросульфоалюмината кальция. Следовательно, повышение строительно-технических свойств бетонов на полиминеральных цементах, в которых минерал связывается с гипсом в гидросульфоалюминат кальция, зависит от оптимизации физико-химического процесса твердения силикатов кальция, определяющих положительные свойства портландцемента и цементов на его основе. По-видимому, кроме разрушения коагуляционных структур гидратированного трехкальциевого алюмината, при образовании нового соединения — гидросульфоалюмината кальция решающее значение имеет физический фактор — увеличение объема новообразований, если этот процесс протекает в период упруго-вязко-пластичного состояния формирующихся незначительных количеств силикатных новообразований, еще не имеющих каркасности. Большое внимание в формировании структуры цементного камня надо уделять степени дисперсности мягкой породы — гипса и его распределению в массе цементного теста при перемешивании. Несомненно, любой химический процесс, связанный с изменением объема продуктов реакции, примером которого является процесс формирования цементного камня из полиминерального и полидисперсного цемента и образование гидросульфоалюмината кальция на данном технологическом уровне, всегда приводит к частичному разрушению образующихся связей. Однако в целом эффект превалирует над локальными деструктивными процессами, поэтому и применяют гипс, без которого резко ускоряются сроки загустевания цементного теста (растворной и бетонной смесей), сроки схватывания, что затрудняет, а в большинстве случаев не позволяет производить работы, значительно снижает технические свойства бетона (раствора).

Одним из существенных недостатков портландцемента и цементов на его основе является усадка — уменьшение размеров образца (конструкции) по причине испарения части воды из бетона и связанных с этим сложных физико-химических изменений состояния цементного камня. Одним из технических приемов, уменьшающих усадку и не допускающих ее, служит разрушение коагуляционных структур в цементном камне с помощью гипса.

§ 44. Управление процессом формирования свойств бетонной смеси

Процесс формирования свойств бетонной смеси зависит от качества цементного теста, оцениваемого сроками схватывания, нерасслаиваемостью, пластичностью-жесткостью и комплексной маркой. Управление формированием свойств бетонной смеси — комплексный процесс, связанный с обеспечением строительства цементом с запроектированными свойствами, что является необходимым условием для получения высокого качества бетона в конструкциях (сооружениях). Этапы этого процесса взаимозависимы. Выполняя каждый из технологических переделов, но не обеспечивая сказанного

о выборе цемента и содержании воды в смеси, нельзя получить нерасслоенный бетон. В табл. VII.8 приведен перечень вопросов комплекса и указаны последствия, которые влечет нарушение технических условий его выполнения для двух крайних условий работы бетона — при расчете на его долговечность, а именно для постоянного твердения во влажном воздухе, воде и в систематически изменяющихся условиях.

Таблица VII.8

№ смеси	Условия работы бетона в сооружении (конструкции)	Рекомендации по составу смеси для монолитного бетона (железобетона)	Технологические пределы при бетонировании
1	Постоянное твердение во влажном воздухе и в воде	Цемент с гидравлическими добавками; крупный каменный заполнитель в случае применения влагеомких пород предварительно увлажняется; применяется комплекс ПАВ и электролиты	Увеличивают время перемешивания смеси и количество воды в смеси, расслоение уменьшается даже при увеличении содержания воды; уход за бетоном должен быть более продолжительным по сравнению с бетонами на портландцементе
2	Постоянное твердение в систематически изменяющихся условиях, в том числе при многократном попеременном замораживании и оттаивании	Портландцемент и глиноземистый цемент; крупный каменный заполнитель в случае применения влажных пород предварительно увлажняется; применяется комплекс ПАВ и электролиты	Нормативное время перемешивания смеси; количество воды в смеси уменьшается за счет точного подбора электролитов и комплекса ПАВ; тщательный и длительный уход за бетоном

Примечания: 1. Приведенные сведения показывают, что в случае применения пуццолановых портландцементов с высокой водоудерживающей способностью уменьшается возможность их расслоения. Однако область применения таких смесей ограничена. Смеси № 2 могут быть применены и в случае, показанном для применения смеси № 1.

2. При перевозке смеси № 1 должна быть обеспечена защита от испарения при положительных температурах и защита от замерзания воды при отрицательных.

Однородность смеси и причины, вызывающие ее потерю. Неоднородность смеси резко изменяет все свойства бетона, поэтому ее нельзя связывать только с одним свойством, например прочностью. Исследования подтверждают сложность получения бетона высокой однородности. Сказанное о неоднородности нельзя смешивать с неоднородностью образцов бетона, полученных путем распиливания блоков или кусков монолита, по показателям их прочности, на которые существенно влияет и состояние поверхности образцов — кубов или цилиндров, подвергающихся испытанию на сжатие. В лаборатории получают контрольные образцы-близнецы с высокой однородностью. Отклонение в прочности контрольных образцов-кубиков может возникать из-за некоторых различий в геометрических размерах форм.

Рассмотрим причины возникновения неоднородности бетона конструкций и сооружений. На опыте эксплуатации ряда конструкций и строительных объектов даже визуально можно обнаружить, насколько неоднородным может быть бетон. Так, из-за неоднородности состава бетона вследствие технологических нарушений при производстве работ отмечается разрушение бетона сливных и напорных граней отдельных гидротехнических сооружений, ступеней открытых лестничных маршей, аэродромных и дорожных покрытий, бордюрных камней, балконов и карнизов зданий, карнизов на мостах, железнодорожных шпал и др.

Иногда неоднородность бетона не проявляется благодаря отсутствию условий, выявляющих ее. Выявить неоднородность бетона в конструкции и ее величину — сложно; этому посвящено значительное количество исследований [6, 23, 27, 30, 50, 54, 57], направленных на разработку приемов определения прочности бетона непосредственно в исследуемом объекте без разрушения конструкции и взятия из нее проб. Основная причина, обуславливающая неоднородность бетона, — наличие в его составе зерен разного размера*, непропорционально распределенных (по высоте, ширине и длине конструкции), седиментация цементного теста, образование воздушных полостей и ряд других дефектов в текстуре бетона.

Ранее было сказано, что практическое значение имеет правильный выбор вязкости цементного теста, так как при этом обеспечивается значительное повышение однородности смеси и бетона на каждом переделе, что способствует сохранению между зернами крупного каменного материала их взаимного расположения, достигнутого при смешивании компонентов. Это же имеет значение для смесей, приготавливаемых на фракционированных каменных материалах.

Многочисленные исследования подтвердили важность фракционирования мелкого и крупного каменных заполнителей именно для достижения наибольшей однородности. То же относится и к составу цемента, который при вибрировании смесей в силу своей полиминеральности и полидисперсности подвержен расслоению. В этом легко убедиться, например, при определении, прочности по отпечатку прибора, которым наносится удар по поверхности бетона; при химическом анализе, по содержанию воды в цементном камне (тесте), скорости прохождения ультразвука, морозостойкости образцов. Любой из перечисленных приемов позволяет зафиксировать различие в качестве цементного камня верхнего слоя образца (или поверхности бетонируемой конструкции) и нижележащих слоев. Так, от расслоения цементного теста при уплотнении бетонной (растворной) смеси и, следовательно, повышения значения B/C в

* В этом идеальном случае предполагается, что зерна заполнителей и цемента имеют один и тот же состав.

ее верхнем слое начало разрушения у бетонов любой степени морозостойкости* всегда начинается в этом слое.

Однородность бетонной смеси можно значительно повысить не только применением фракционированных материалов и подбором состава, но и рациональным выбором машин и оборудования для производства бетонных работ. Одним из важных факторов, повышающих однородность бетона, является сам объект бетонирования, так как именно в опалубке происходит распределение, формирование и уплотнение смеси.

Неоднородность бетона больше в тех конструкциях, где затруднена раскладка и уплотнение смеси. По этой причине при проектировании конструкций введено понятие об их технологичности, т. е. об удобстве их изготовления. Сказанное относится и к армированию конструкций, которое, кроме чисто расчетных вопросов, должно предусматривать условия надежного практического осуществления проектных предпосылок. Например, следует стремиться к такому расположению арматуры, которое допускает применение крупного каменного заполнителя с большим размером зерен.

§ 45. Регулирование сроков схватывания цемента

Сроки схватывания цемента значительно изменяются в зависимости от температуры цементного теста. Например, при ее снижении до $+5^{\circ}\text{C}$ можно считать, что время до начала схватывания удлинится в 1,5—2,5 раза, а при повышении до $25\text{—}30^{\circ}\text{C}$ сокращается в 2—3,5 раза. Изменение сроков схватывания цемента находится в прямой связи с изменением в цементе количества минерала — трехкальциевого алюмината C_3A , вскрытого помолем, и их надо определять в каждом конкретном случае при температуре внешней среды, на рабочих составах цементного теста, соответствующих конкретному дню бетонирования.

Для регулирования сроков схватывания в цемент при помеле клинкера вводят двуводный гипс $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, которого по ГОСТ 10172—62 должно быть 1,5—3,5% (в расчете на ангидрид серной кислоты SO_3) (см. § 12). Следует иметь в виду, что сроки схватывания цемента в бетонных (растворных) смесях в случае их приготовления с водоемным отношением большим, чем значения, соответствующие нормальной густоте цемента, удлиняются. Если на строительство поступает цемент, который не обеспечивает указанные в стандарте сроки схватывания, его использование невозможно без дополнительных мер.

Указанные в ГОСТе минимальные сроки схватывания назначают исходя из необходимости осуществить весь комплекс технологических переделов (см. § 42), без которых нельзя изготовить элемент, деталь, изделие, конструкцию, сооружение. Многочисленные исследования особенностей формирования бетонов (растворов) по-

* Под степенью морозостойкости следует понимать различную морозостойкость по числу циклов испытания при многократном попеременном замораживании и оттаивании.

казывают, что смеси, потерявшие пластичность вследствие схватывания, резко снижают технические свойства искусственного каменного материала, так как в этом случае его уже не удастся сформировать с заданной плотностью *.

Т а б л и ц а VII.9

№ цемента *	Минералогический состав, %				Удельная поверхность по прибору Дерягина, см ² /г	Нормальная густота, %	Сроки схватывания, ч-мин	
	C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF			начало	конец
1	33	41	10	12	17 670	24,6	2-15	4-00
1	33	41	10	12	25 490	25,0	2-15	3-55
1**	33	41	10	12	14 730	24,0	2-55	4-25
1	33	41	10	12	18 600	26,0	4-50	6-40
1	33	41	10	12	21 050***	26,5	2-40	4-05
1	33	41	10	12	25 260	29,2	0-15	2-45
2	31	39	10	14	13 100	25,5	3-45	5-40
2	31	39	10	14	15 730	25,0	2-20	4-05
2	31	39	10	14	18 130	27,5	3-05	5-10
2	31	39	10	14	20 330	26,2	1-50	4-45
3	53	20	9	14	14 420	25,7	4-35	5-40
3	53	20	9	14	20 540	25,7	1-15	3-05

* Под одним номером указаны цементы, намолотые из одного клинкера; действующий состав цементов различен.

** Начиная с $s = 14\,730$ см²/г — цемент другой партии.

*** По стандартному поверхностному $s = 5000$ см²/г.

Так, были поставлены опыты по определению пористости растворяемых образцов состава 1 : 2, 1 : 3 и 1 : 4 при разных отношениях воды затворения к цементу. Было выяснено, что с определенного для каждой растворной смеси значения водоцементного отношения (например, для смеси состава 1 : 2, начиная с В/Ц < 0,36) при существующих стандартных приемах формования образцов величина открытой пористости не уменьшается, а стабилизируется. У цементов с короткими сроками схватывания резкое увеличение пористости произойдет при более высоких значениях В/Ц, чем здесь указано.

Цемент большинства отечественных заводов имеет значительно более длинные сроки схватывания, чем указано в ГОСТе, вследствие особенностей минералогического состава (табл. VII.9 и VII.10). Нельзя считать, что для любого состава цемента сроки схватывания связаны однозначной зависимостью с тонкостью помола (с удельной поверхностью). Из табл. I.18 и VII.11 следует, насколько разнообразны исходные качества портландцементов, а также опыты пластифицирования синтетического мономинерального цемента из трехкальциевого алюмината (см. § 44). В этом случае при введении гидрофильной добавки с. с. б., несмотря на большее количество во-

* Если схватывание цементного теста связано с отсутствием в нем необходимого количества гипса, изменение свойств также будет зависеть и от отсутствия в цементном камне минерала $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot 31\text{H}_2\text{O}$ (см. § 13).

Т а б л и ц а VII.10

№ цемен- та	Коли- чество C ₃ A, %	Размер кристаллов, мкм		Характер распределения и взаимоположения кристаллов	Характер кристаллизации и кристаллическая форма
		алита	белита		
1	9	15—20	15—45	Равномерный; встреча- ется белит, заключенный в зернах алита	Отчетливая; алит в ви- де гексагональных призм и удлинённых пластинок; белит — округленной фор- мы
2	8,5—9	10— 100	10—45	Неравномерный; белит расположен группами (небольшая часть заклю- чена в зернах алита)	Неотчетливая; алит в виде гексагональной и призматической форм; бе- лит — округленной фор- мы
3	12	16— 120	—	Неравномерный; белит расположен в виде групп	Отчетливая; алит в ви- де удлинённых гексаго- нальных пластинок; бе- лит — округленной фор- мы с нечетким граниением
4	5—5,5	15—60	15—45	Неравномерный; белит расположен около пор отдельными группами	Отчетливая; алит в ви- де удлинённых пласти- нок; белит — округлен- ной формы
5	9—10	15— 100	10—60	Неравномерный; встре- чается белит, заключен- ный в зернах алита	Неотчетливая; алит в виде удлинённых пласти- нок; белит — округлен- ной формы
6*	10	15—60	15—30	Неравномерный; белит в виде отдельных групп	Неотчетливая; алит в виде призм и пластинок; белит — округленной фор- мы с плохим очертанием граней

* В этом цементе большое количество свободной CaO.

ды, удерживаемой таким мономинеральным тестом, его подвижность была значительно меньше, и сроки схватывания теста сокращались.

Изготовленные двутавровые опоры для электрификации железных дорог на цементе «быстряке» с началом схватывания 12 мин при испытании на морозостойкость быстро разрушаются. На морозостойкость бетона опоры оказало влияние также наличие в его составе дефектных мест — коагуляционных структур из гидратированного трехкальциевого алюмината* (см. § 4, 9, 46). В табл. VII.12 и VII.13 приведены сведения об изменении сроков схватывания мономинерального цементного теста по показателю изменения

* Некоторые исследователи считают, что при гидратации вначале образуются кристаллизационные структуры, которые при их механическом разрушении (например, перетирании теста) переходят в коагуляционные.

Таблица VII.11

Цемент	Нормальная густота, %	Количество дополни- тельно вве- денного гипса, %	Сроки схваты- вания, ч-мин		Активность цемента, кг/см ² (10 ⁻⁴ МПа)
			начало	конец	
Портландцемент № 1 завод- ского помола	23,8	—	4-00	5-50	590
Портландцемент № 1, допол- нительно молотый в лаборато- рии	27,0	—	3-50	5-25	652
Портландцемент № 2 того же завода, что и № 1	24,6	—	2-15	4-00	650
Портландцемент № 2, допол- нительно молотый в лаборато- рии	24,2	2	2-40	4-10	725
Портландцемент № 3 завод- ского помола	25,7	—	4-35	5-40	500
Портландцемент № 3, допол- нительно молотый в лаборато- рии	26,1	1	1-25	5-15	625
Портландцемент № 4 завод- ского помола	29,5	—	3-40	6-15	710
Портландцемент № 4, допол- нительно молотый в лаборато- рии	30,1	—	2-30	5-25	844
Портландцемент № 5 завод- ского помола	28,5	—	4-45	5-50	693
Портландцемент № 5	27,1	—	1-50	4-55	812
То же, дополнительно молотый в лаборатории	28,2	4	1-20	4-35	727

Таблица VII.12

Время от момента затворения цемент- ного теста, мин	Пластическая прочность цемента, Г/см ² (10 ⁻⁴ МПа), при В/Ц=0,25, 1% С ₂ А и добавки с. с. б., % от массы цемента			
	0	0,25	0,50	1
1	40	26	80	26
10	40	625	710	425
30	65	785	1050	655
60	90	1050	1960	1570
120	260	1570	2360	2100
180	370	2100	2880	2800
240	785	2100	5980	5000
300	7320	2360	5980	5000

Примечание. Пластическая прочность теста из сульфоалюмината и гипса в сравниваемых условиях имеет значительно более низкую P_m .

пластической прочности*. Пластическую прочность рассчитывают по формулам:

$$P_m = \frac{1}{\pi} \cdot \operatorname{ctg}^2 \frac{\alpha}{2} \cdot \frac{F}{h_m^2}$$

или

$$P_m = \frac{1}{\pi} \cdot \cos^2 \frac{\alpha}{2} \cdot \operatorname{ctg} \frac{\alpha}{2} \cdot \frac{F}{h_m^2},$$

Таблица VII.13

Время от момента затворения цементного теста, мин	Пластическая прочность цементного теста при $V/C=0,25$, G/cm^2 (10^{-4} МПа), и составе цемента		Время от момента затворения цементного теста, мин	Пластическая прочность цементного теста при $V/C=0,25$, G/cm^2 (10^{-4} МПа), и составе цемента	
	97% мелко-молотого песка +3% C_3A	90% мелко-молотого песка +10% C_3A		97% мелко-молотого песка +3% C_3A	90% мелко-молотого песка +10% C_3A
1	40	40	120	2100	1570
10	390	470	180	2880	1570
30	780	840	240	2880	1570
60	1320	1050	300	2880	1570

где α — угол осевого сечения конуса, град.; F — заданная нагрузка, Г(Н); h_m — глубина погружения конуса, см.

Показатели нормальной густоты соответствуют 100—140 $кГ/см^2$ (10^{-1} МПа) пластической прочности, а сроки схватывания: начало — 1,5 и конец — 5 $кГ/см^2$ (10^{-1} МПа).

Вторая из приведенных формул дает результаты, близкие к действительному состоянию системы цементное тесто + свободная вода (но не вода, выделившаяся из теста) по ее структурно-механическим характеристикам, показывающим предельное сопротивление сдвигу и структурную вязкость, так как в этом случае соблюдается принцип течения вдоль боковой поверхности конуса, преобладающий над деформациями смятия под конусом. В другом случае применяется первая формула. Для того чтобы проиллюстрировать влияние гидратированного трехкальциевого алюмината на сроки схватывания цементного теста, был поставлен опыт по определению сроков на цементах, состоящих из 99% мелко-молотого кварцевого песка ($s=2600 \text{ см}^2/r$) и 1% C_3A с добавками с. с. б., 97% песка и 3% C_3A , 90% молотого песка и 10% C_3A без с. с. б. Такие цементы затворяли обычными стандартными приемами водопроводной водой. Из указанных таблиц следует:

1) увеличение пластической прочности такой системы с добавками с. с. б. аналогично системам на заводских портландцементях и цементах на их основе, следовательно, адсорбция с. с. б. трехкальциевым алюминатом имеет избирательный характер;

* Пластическая прочность — суммарная химическая прочность системы при пластичном (подвижном) состоянии материала, фиксирующая процессы схватывания и кристаллизации новообразований ультрамикроскопических размеров. Быстрый рост P_m объясняется изменением кристаллизации C_3AH_6 при введении добавки с. с. б. (или с. д. б.).

2) нарастание пластической прочности связано с развитием процесса гидратации трехкальциевого алюмината даже при незначительном количестве (1%), при котором появляются тонкодисперсные структуры, химическое связывание воды — уменьшение ее содержания в системе, где она являлась пластификатором, и образование коагуляционной и далее коагуляционно-кристаллизационных структур;

3) роль с.с.б. сводится к пептизации* гидратирующихся зерен минерала C_3A , что хорошо иллюстрируется сравнением показателей пластической прочности систем с 1, 3 и 10% этого минерала в сроки гидратации (такие сроки определения пластической прочности), начиная с 1 мин до 5 ч при содержании в системе 0,25% с.с.б. В табл. VII.14—VII.18 приведены сведения об управлении процессом схватывания цементов различного химико-минералогического состава. Из таблиц видно, какими приемами можно регулировать

Таблица VII.14

Время от затворения цементного теста, мин	Пластическая прочность цементного теста, Г/см ² (10^{-4} МПа), при продолжительности смешивания цемента и воды, мин			
	5	10	15	20
15	340	202	200	—
30	370	207	206	207
60	500	296	290	264
120	1 000	334	300	320
180	1 670	685	705	705
240	2 960	1 520	1850	1 610
300	5 520	3 800	4450	4 050
360	14 500	11 020	9800	10 000

Примечание. Безгипсовый цемент — $s=5500$ см²/г, В/Ц=0,34 с 11% C_3A .

схватывание. Так, удлиняя смешивание с водой цемента без гипса с высоким содержанием минерала C_3A , можно значительно снизить пластическую прочность до 6 ч с момента приготовления цементного теста. Если вместо 5 перемешивать 10 мин, даже для систем с высоким содержанием коагуляционных структур удается резко снизить загустевание. В более ранних опытах В. Н. Юнга и Ю. М. Бутта показано, что, удлиняя сроки стандартного смешивания с водой высокоалюминатного цемента, содержащего 14,1% C_3A , удастся:

а) продлить время до начала схватывания с 2 до 38 мин, конец схватывания с 3 до 90 мин при увеличении времени смешивания с 1 до 15 мин (при этом необходимо увеличивать в цементном тесте содержание воды с 29,5 до 42,5%);

* Речь идет об адсорбционной пептизации, заключающейся в разделении агрегатов из слившихся зерен цемента, полученных при дроблении клинкера, образованных в процессе обжига сырья, под действием жидкой среды, в данном случае с.с.б.

б) увеличить время до начала схватывания с 2 до 90 мин, а конец схватывания с 3 до 200 мин, применяя вторичное смешивание в течение 5 мин (после небольшого перерыва вслед за первичным смешиванием за 5 мин) с несколько меньшим количеством воды по сравнению с опытами при однократном смешивании, а именно 36%. Введение в такую систему полуводного гипса $\text{CaSO}_4 \cdot 0,5\text{H}_2\text{O}$ для регулирования сроков схватывания также требует значительного (при малых дозах гипса) продления срока смешивания цемента с водой. Например, добавка 3% полуводного гипса при перемешивании 1 мин увеличила время до начала схватывания и снизила НГ с 29,5 до 28% (эти сроки ниже требуемых ГОСТ 10178—62). С увеличением содержания полуводного гипса до 6% и продолжительности смешивания до 3 мин время до начала схватывания увеличивается до 74, а конец — до 144 мин. При увеличении содержания полуводного гипса до 10% и времени смешивания до 3 мин начало схватывания составляет до 120 мин, а конец — до 230 мин.

Показанные выше оптимальные дозировки гипса и время приготовления теста означают более тщательное распределение гипса в системе цементное тесто + свободная вода. Снижение равномерности распределения гипса означает неполноценное его участие в процессах разрушения новообразований из трехкальциевого алюмината и воды. При сравнении пластической прочности, например, заводских чистых портландцементов* с относительно невысоким содержанием C_3A данными табл. VII.11 и VII.12 обнаруживается общая линия не только в изменении значений P_m , но и достаточно близкие их числовые значения. Следовательно, можно считать, что сроки схватывания полиминеральных цементов в конечном счете определяет гидратация минерала C_3A .

Из приведенных сведений об изменении значений P_m из-за различного содержания гипса, минерала C_3A , с.с.б. и длительности смешивания следует, что процесс схватывания можно регулировать в требуемом направлении. Показатель степени гидратации минералов (так же, как тепловыделение и контракция) может служить ориентиром в сравнительном определении сроков схватывания при образовании цементного камня. Степень гидратации, тепловыделение и контракция цемента из трехкальциевого алюмината значительно выше, чем активного цемента из трехкальциевого силиката (например, для первого из них на 28 сут. твердения, степень гидратации равна 100%, тепловыделение примерно 210 кал/г (4,2 кДж/кг), контракция 17 мл на 100 г, а для второго соответственно 53—69%, 115 кал/г (4,2 кДж/кг) и 5,2 мл на 100 г. В первые часы процесса указанное различие еще выше.

Опыты показали, что если тормозить твердение цементного теста без гипса с помощью с.с.б., то удастся затормозить гидратацию всех его минералов, за исключением гидратированного минерала

* Из клинкера без введения в цемент при его получении в мельнице разрешенных ГОСТ 10178—62 мелкокомолотых активных минеральных добавок.

Таблица VII.15

№ п.п.	Состав цемента, %					В/Ц теста	Продолжительность схватывания, мин	Пластическая прочность цементного теста, Г/см ² (10 ⁻⁴ МПа), в зависимости от времени с момента затвердения цементного теста, мин							
	C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF	гипс			с. с. 6.	7—10	60—70	120—130	180—190	240—250	300—310	360—370
1	53	20	9	14	2	0,2	0,23	56,6	306,0	816,0	1667,3	3060,0	8670,0	—	
2	53	20	9	14	2	0,2	0,24	40,8	122,4	408,0	686,5	2648,0	9180,0	—	
3	53	20	9	14	2	0,4	0,23	51,0	1428,0	2660,9	5100,0	—	—	—	
4	53	20	9	14	2	0,4	0,24	40,8	510,0	1530,0	3060,0	5610,0	—	—	
5	53	20	9	14	2	0,6	0,22	20,4	9180,0	—	—	—	—	—	
6	53	20	9	14	2	0,6	0,23	14,3	5100,0	—	—	—	—	—	
7	53	20	9	14	2	—	0,25	30,6	102,0	204,0	918,0	3284,0	12240,0	—	
8	53	20	9	14	2	—	0,26	20,4	81,6	196,0	632,4	2448,0	13859,0	—	
9	53	20	9	14	6	0,2	0,23	20,4	357,0	714,0	1275,0	2448,0	5100,0	6630,0	
10	53	20	9	14	6	0,2	0,24	15,9	102,0	204,0	459,0	714,0	3060,0	—	
11	53	20	9	14	6	0,2	0,22	173,4	1224,0	2550,0	4080,0	5304,0	—	—	
12	53	20	9	14	6	0,6	0,22	10,2	9180,0	—	—	—	—	—	
13	53	20	9	14	6	0,6	0,23	7,2	6630,0	—	—	—	—	—	
14	53	20	9	14	6	0,6	0,24	20,4	2452,0	4413,4	6630,0	—	—	—	
15	53	20	9	14	8	—	0,23	71,4	561,0	1029,8	3060,0	7140,8	—	—	
16	53	20	9	14	8	—	0,25	30,6	102,0	357,0	1930,0	5100,0	—	—	

Таблица VII.16

№ п.п.	Состав цемента, %					R/II теста	Продолжительность смешивания, мин	Пластическая прочность цементного теста, Г/см² (10 ⁻⁴ МПа), в зависимости от времени затворения цементного теста, мин													
	C ₅	C ₃	C ₂	C ₁	C ₀			5—10	60—70	120—130	180—190	240—250	300—310	360—370	420—430	480—490	540—560	645	670		
1	58	19	5	16	2	0,2	0,24	5	23,5	98,0	127,5	127,5	196,0	314,0	428,4	735,6	1020,0	2452,0	5312,5	—	
2	58	19	5	16	2	0,2	0,25	10	15,3	61,2	102,0	102,0	137,3	142,5	153,0	319,0	590,0	153,0	3494,0	7140,0	—
3	58	19	5	16	2	0,4	0,22	5	47,9	408,0	714,0	1471,2	306,0	1961,0	3060,0	3570,0	3923,0	6375,0	—	—	
4	58	19	5	16	2	0,4	0,23	10	20,4	122,4	214,2	357,0	612,0	459,0	697,6	1040,0	1530,0	2315,0	2452,0	3138,0	6098,0
5	58	19	5	16	2	0,6	0,22	5	15,3	98,0	357,0	357,0	637,5	1173,0	1632,0	2040,0	2550,0	3264,0	4080,0	4413,0	5304,0
6	58	19	5	16	2	0,6	0,24	10	16,3	127,5	357,0	357,0	637,5	1173,0	1208,7	1734,0	2448,0	3264,0	5777,0	5100,0	—
7	58	19	5	16	2	—	0,26	5	11,3	30,6	49,0	98,0	275,4	980,8	2844,6	11829,0	—	—	—	—	—
8	58	19	5	16	2	—	0,27	10	14,1	26,9	40,8	122,8	216,0	661,0	3294,0	7609,0	—	—	—	—	—
9	58	19	5	16	2	—	0,40	10	—	—	9,7	17,6	27,0	102,0	275,4	867,0	2550,0	5795,0	—	—	—
10	58	19	5	16	6	0,2	0,26	5	22,4	88,6	118,0	196,0	275,4	346,8	601,8	734,4	2060,4	3084,0	7140,0	—	—
11	58	19	5	16	6	0,2	0,27	10	20,9	43,5	78,5	78,5	122,4	183,6	204,8	581,4	1040,4	2468,4	6375,0	—	—
12	58	19	5	16	6	0,6	0,22	5	26,5	745,4	1683,0	2158,0	3138,4	4080,0	5100,0	—	—	—	—	—	—
13	58	19	5	16	6	0,6	0,23	10	25,5	382,5	816,0	1530,0	1961,0	2244,0	3060,0	3923,0	5100,0	—	—	—	—
14	58	19	5	16	8	—	0,28	5	30,6	51,0	108,0	204,0	314,0	714,0	1632,0	5200,0	—	—	—	—	—
15	58	19	5	16	8	—	0,28	10	25,5	61,2	122,4	204,0	510,0	1020,0	2244,0	5610,0	—	—	—	—	—

Таблица VII.17

№ п.п	Состав цемента, %						В/Ц теста	Продолжитель- ность смешива- ния, мин	Пластическая прочность цементного теста, Г/см ² (10 ⁻⁴ МПа), в зависимости от времени с момента затворения цементного теста, мин									
	С ₃ С	С ₂ С	С ₄ А	С ₄ АР	гипс	с. с. б.			7—10	60—70	120—130	180—190	240—250	300—310	360—370	420—450	480—490	
									10,2	306,0	714,0	1326,0	2462,0	3570,0	7140,0	—	—	
1	56	20	12	11	2	0,2	0,23	5	10,2	306,0	714,0	1326,0	2462,0	3570,0	7140,0	—	—	
2	56	20	12	11	2	0,2	0,24	10	10,2	102,0	408,0	816,0	1228,0	2040,0	5610,0	—	—	
3	56	20	12	11	2	0,4	0,22	5	10,2	27,5	81,6	306,0	816,0	1938,0	2750,0	3570,0	6426,0	
4	56	20	12	11	2	0,4	0,23	10	7,1	27,5	102,0	377,4	918,0	2040,0	3060,0	5610,0	—	
5	56	20	12	11	4	—	0,23	5	20,4	122,4	510,0	1224,0	3570,0	6630,0	—	—	—	
6	56	20	12	11	4	—	0,25	10	10,2	102,0	357,0	1224,0	3570,0	10200,0	—	—	—	
7	56	20	12	11	4	0,4	0,23	2	25,5	1020,0	3060,0	7140,0	—	—	—	—	—	
8	56	20	12	11	4	0,4	0,23	5	10,2	255,0	1326,0	3060,0	3570,0	5610,0	—	—	—	
9	56	20	12	11	4	0,4	0,24	10	12,2	153,0	663,0	1734,0	2550,0	5100,0	—	—	—	
10	56	20	12	11	4	0,6	0,22	5	12,2	173,3	1091,4	3570,0	5100,0	—	—	—	—	
11	56	20	12	11	4	0,6	0,23	10	10,2	122,4	714,0	2040,0	3570,0	5100,0	—	—	—	
12	56	20	12	11	8	—	0,23	2	61,0	102,0	255,0	4080,0	8160,0	—	—	—	—	
13	56	20	12	11	8	—	0,24	5	35,7	408,0	1326,0	3060,0	6120,0	—	—	—	—	
14	56	20	12	11	8	—	0,25	10	28,5	153,0	714,0	2040,0	6120,0	—	—	—	—	
15	56	20	12	11	10	—	0,24	10	20,4	102,0	306,0	816,0	2958,0	7650,0	—	—	—	

Таблица VII.18

№ пл.	Состав цемента, %					В/Ц теста	Продолжитель- ность смешива- ния, мин	Пластическая прочность цементного теста, Г/см² (10 ⁻⁴ МПа), в зависимости от времени с момента затворения цементного теста, мин										
								5—10	60—70	120—130	180—190	240—250	300—310	360—370	420—430	480—490	540—560	
	C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF	гипс			с. с. б.										
1	51	22	11	11	4	—	0,35	2	15,3	459,0	1020,0	1530,0	3060,0	5340,0	—	—	—	—
2	51	22	11	11	4	—	0,36	5	10,2	255,0	510,0	714,0	1734,0	4590,0	6120,0	—	—	—
3	51	22	11	11	4	—	0,37	10	7,2	51,0	71,4	204,0	714,0	1530,0	5100,0	—	—	—
4	51	22	11	11	4	0,4	0,30	2	51,0	10200,0	—	—	—	—	—	—	—	—
5	51	22	11	11	4	0,4	0,31	5	51,0	5610,0	—	—	—	—	—	—	—	—
6	51	22	11	11	4	0,4	0,32	10	20,4	714,0	1530,0	2040,0	5100,0	—	—	—	—	—
7	51	22	11	11	4	0,6	0,30	2	10,2	15300,0	—	—	—	—	—	—	—	—
8	51	22	11	11	4	0,6	0,31	5	20,4	17340,0	—	—	—	—	—	—	—	—
9	51	22	11	11	4	0,6	0,32	10	20,4	9180,0	—	—	—	—	—	—	—	—
10	51	22	11	11	4	—	0,37	10	7,2	51,0	71,4	204,0	714,0	1530,0	5100,0	—	—	—
11	51	22	11	11	8	—	0,38	10	10,2	30,6	61,2	102,0	142,8	306,0	1020,0	2550,0	6630,0	—
12	51	22	11	11	8	0,2	0,36	2	10,2	561,0	1020,0	1530,0	2040,0	2240,0	3264,0	5100,0	—	—
13	51	22	11	11	8	0,2	0,38	10	10,2	40,8	112,2	153,0	306,0	459,0	918,0	1530,0	3570,0	5100,0
14	51	22	11	11	10	—	0,37	10	10,2	20,4	51,0	91,8	204,0	714,0	2224,0	6120,0	—	—
15	51	22	11	11	10	0,2	0,36	10	10,2	40,8	142,8	306,0	510,0	1020,0	1581,0	3060,0	6120,0	—
16	51	22	11	11	10	0,6	0,32	10	2,1	61,0	255,0	714,0	1122,0	2040,0	3060,0	4090,0	5100,0	—

С₃А *. По этой причине изменение сроков схватывания цементного теста в указанные стандартные сроки связано с гидратацией минерала С₃А. Схватывание теста в иные, более длительные сроки, зависит от развития процессов гидролиза и гидратации других минералов полиминерального цемента, составляющих твердую фазу цементного теста (концентрированной цементной суспензии).

Следовательно, схватывание полиминерального цемента при обязательном наличии в нем минерала С₃А можно дифференцировать на две стадии: 1) тесто находится в вязко-пластично-упругом состоянии, легко формируется вследствие своей тиксотропности **, 2) тесто переходит в хрупкое состояние, нарушение которого приводит к потере сплошности, образованной кристаллическими связями, возникшими с началом процесса гидролиза и гидратации остальных минералов цемента. Эти стадии после определенного периода времени накладываются одна на другую, что определяется многократным повторным вибрированием (уплотнением) (см. § 72 и [67, 70, 71, 72, 74, 61]).

Отсутствие минерала С₃А в цементе позволяет считать, что схватывание протекает в одну стадию, так как в системе цементные зерна + вода, где гидролиз и гидратация по самой природе минералов проходят заторможенно, не образуется тиксотропных коагуляционных структур из минерала С₃А. Если бы схватывание цементного теста обуславливалось только образованием коагуляционных структур, то загустевание было бы всегда и в любой период времени обратимым (это имеет место, например, при работе с природными глинами, с тестом из гидратированного минерала С₃А, что показано в § 13). Вид такого густеющего цементного теста и сама скорость схватывания будут другие.

Период схватывания в таком цементном камне кончается незадолго до того, как заканчивается и процесс гидролиза и гидратации всех зерен цемента; но этот период схватывания нами не фиксируется, так как не имеет значения для практических целей. Следовательно, схватывание — понятие условное, имеющее важное значение для строителя именно в пределах, связанных с возможностью приготовления из бетонной (растворной) смеси монолитного бетона (железобетона) любой конфигурации и объема с заданной долговечностью, т. е. материала, в полной мере соответствующего условиям надежной эксплуатации. По этой причине процесс твердения нельзя связывать только с появлением у бетона (раствора) механической прочности (с показателем R_m). Схватывание — предпроцесс такого упрочнения.

Процесс постепенного образования структуры цементного камня, т. е. накопления все большего количества новообразований, связан с особенностями процесса гидролиза и гидратации полиминерального цемента, проходящего заторможенно при наличии на зернах гидратированных соединений, и его не следует противопоставлять

* В таких опытах можно добиться получения брикетов сухого цементного порошка в оболочке из СаСО₃.

** Тиксотропность — обратимый процесс загустевания (см. § 13).

получению искусственного камня (бетона, раствора) с необходимой механической прочностью.

Проведенные испытания показали, что коагуляционные связи, развивающиеся на базе гидратированного трехкальциевого алюмината, дополняются связями из новообразований других минералов, постепенно изменяя пластическую прочность цементного камня. По характеру изменения пластической прочности можно судить: об алюминатности цемента и степени связывания гидратирующегося алюмината в гидросульфоалюминат или о характере образования его коагуляционной структуры в форме кристалликов, образующих ее* при отсутствии гипса и наличии с.с.б.. При увеличении времени смешивания цемента и воды — перетирания цементного теста, снижается до определенного момента показатель P_m из-за частичного разрушения коагуляционных структур и перераспределения воды среди остальных гидролизующихся и гидратирующихся минералов, как бы из-за их пластификации. По отделению воды при перетирании цементного теста можно сделать вывод не только о частичном разрушении коагуляционных структур и повышении сроков схватывания теста, но и о различном водоудерживании других минералов полиминерального цемента. Опыт определения пластической прочности цементных паст на заводских цементах показывает большое разнообразие их значений, что в первую очередь объясняется различной доступностью алюминатов для соединения с гипсом, следствием чего и является разрушение водоудерживающих коагуляционных структур, снижающих пластифицирующее действие воды в силу ее блокирования.

§ 46. Поверхностно-активные вещества

Применение поверхностно-активных веществ (ПАВ) связано с желанием улучшить некоторые свойства цементов, затрудняющие производство работ и снижающие качество бетона. Естественно, одно вещество не может обладать универсальностью свойств, поэтому изыскивались вещества с разными свойствами. Акад. П. А. Ребиндер предложил дифференцировать ПАВ по свойствам на гидрофильные и гидрофобные (табл. VII.19). Первая группа ПАВ способствует повышению пластичности смесей, позволяя получать изопластичные** смеси при разном содержании в них воды. Следовательно, смеси, в которые вводится гидрофильное ПАВ, содержат меньше воды, что создает условия для получения бетона более высокого качества (с большей прочностью, плотностью, морозостойкостью и рядом других свойств). Введение ПАВ создает возможность изменить состав бетона путем одновременного пропорционального снижения содержания в нем воды и цемента. В этом случае удастся изготовить бетон при экономии в среднем до 10% цемента.

* Следует иметь в виду, что большинство гелей имеют ультрамикроструктурную структуру.

** Изопластичность — одинаковая пластичность.

№ п.п.	Группа ПАВ	Название ПАВ	Эффект действия ПАВ
1	Гидрофильные	Сульфитно-дрожжевая бражка	Пластифицирующее действие, позволяющее экономить цемент или повышать строительно-технические свойства бетона (раствора)
2	Гидрофобные	Мылонафт, асидол-мылонафт, окисленный петролатум, абиетиновая смола, высшие карбоновые кислоты и некоторые другие	Защитное действие от слеживания цемента при его транспортировании и хранении — способность не смачиваться водой; возможность повышения в бетонной смеси при перемешивании содержания воздуха и придание капиллярам несмачиваемости, следовательно, повышение ряда свойств бетона (раствора)
3	»	Различные кремнийорганические соединения: гидролизированный этилди-хлорсилан (ГКЖ-94), метил- и этилсиликонаты натрия (ГКЖ-10 и ГКЖ-11)	Кроме указанных эффектов при применении гидрофобных ПАВ № 2, в том числе пластифицирования смесей вследствие химического взаимодействия кремнийорганических молекул с гидратом окиси кальция, наступающего вслед за адсорбцией, выделяется молекулярный водород и образуется кальциевая соль. Значительно увеличивается морозостойкость бетонов, так как процесс выделения водорода сопровождается процессом контракции

ПАВ гидрофобного типа особенно целесообразны для повышения таких свойств бетона, как соле- и морозостойкость, водонепроницаемость. Наиболее существенное повышение строительно-технических свойств бетона получается при комплексном использовании ПАВ обоих типов.

Рассмотрим существо физико-химических процессов, определяющих механизм действия ПАВ. При введении в смеси или в цемент ПАВ адсорбируются* на поверхности зерен цемента. ПАВ гидрофильного типа с. д. б. (ранее выпускался продукт под названием сульфитно-спиртовой барды), адсорбируясь на зернах цемента, способствует снижению его качества и размеров флюкул-агрегатов, из которых состоит цемент (рис. VII.5). Этот процесс называется пептизацией. Гидрофильные вещества создают на поверхности зерен своеобразный экран — защиту минералов цемента от контакта с водой, задерживая начало гидролиза и гидратации. При этом повышается устойчивость цементного теста к коагуляции. Кроме того,

* Адсорбция — это процесс сгущения, уплотнения растворенного и парообразного вещества — адсорбтива на поверхности твердого или жидкого тела — адсорбента. Адсорбция — частный случай сорбции — процесса поглощения газов или паров твердыми и жидкими телами.

гидрофильная добавка, тормозя химические процессы, создает иные условия образования зародышей кристалликов новообразований, т. е. оказывает модифицирующее действие (связанное с изменением формы, в том числе кристаллической и свойств новообразований).

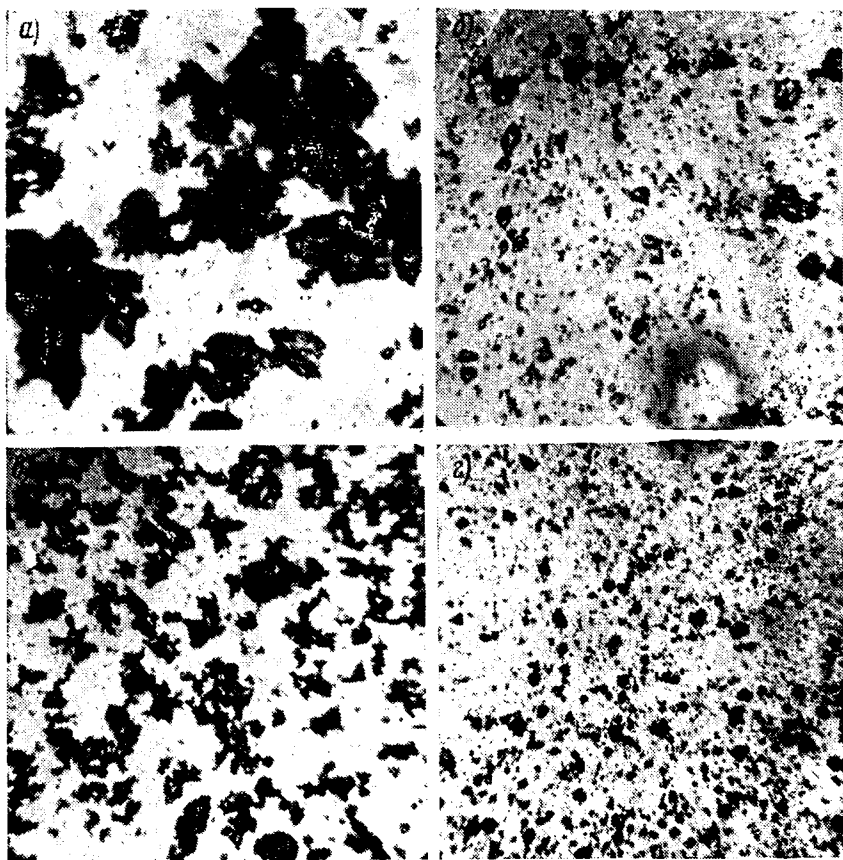


Рис. VII.5. Пептизация флокул из синтетических цементов:

а — пептизация минерала C_2S в воде; б — то же, но в растворе с. с. б.; в — пептизация минерала C_4AF в воде; г — то же, но в растворе с. с. б.

Исследования, проведенные с канд. хим. наук Т. Ю. Любимовой в СоюзДорНИИ, показали, что адсорбция с. д. б. различна у разных минералов. Наибольшая адсорбционная способность была определена у трехкальцевого алюмината C_3A , наименьшая — у двухкальцевого силиката C_2S . Сказанное хорошо иллюстрируется изотер-

мой адсорбции*, являющейся наглядной характеристикой взаимосвязи свойств поверхности минералов цементного клинкера — адсорбента** с с. д. б.— адсорбирующимся ПАВ — адсорбтивом*** (рис. VII.6).

Определение адсорбции ПАВ на цементах осложняется фактом образования из цемента и воды новообразований. Эта особенность адсорбента учтена при организации исследований. Были установ-

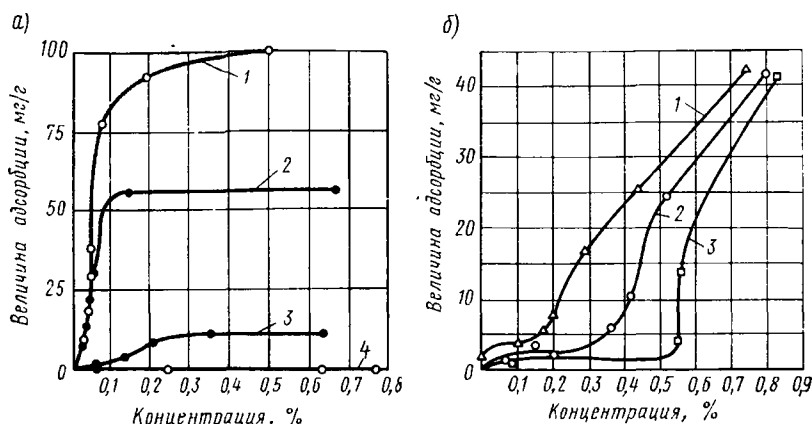


Рис. VII.6. Изотермы адсорбции минералов цемента и влияние удельной поверхности на адсорбцию:

а — изотерма адсорбции с. с. б. минералами цементного клинкера ($s=5000-6000 \text{ см}^2/\text{г}$): 1 — C_3A ; 2 — C_4AF ; 3 — C_3S ; 4 — C_2S ; б — влияние величины удельной поверхности цемента на изотерму адсорбции цемента средней алюминатности: 1 — $s=9000 \text{ см}^2/\text{г}$; 2 — $s=4000 \text{ см}^2/\text{г}$; 3 — фракция цемента 23—53 мкм

лены: тормозящее действие добавок для ряда условий затворения цемента; увеличение адсорбции при повышении тонкости помола цемента; особенность пластифицирования цементов с высоким содержанием трехкислотного алюмината; снижение скорости диффузии ионов воды через пленку адсорбирующей с. д. б.; растворяющее влияние гипса при адсорбции с. д. б. на поверхность

* Изотерма адсорбции — зависимость величины адсорбции от равновесной концентрации при данной температуре. Уравнение изотермы адсорбции (мг/г или мг/см²)

$$\Gamma = f(c) \text{ или } \gamma = \varphi(c),$$

где

$$\Gamma = \frac{(c_0 - c)V}{m \cdot 100} \text{ и } \gamma = \Gamma/s;$$

c_0 и c — начальная и равновесная концентрации ПАВ, мг/л; V — объем растворителя, мл; m — навеска адсорбента, г.

** Адсорбент — тело (материал), на поверхности которого происходит адсорбция.

*** Адсорбтив — тело (газ, раствор), которое адсорбируется. Изотерма адсорбции является характеристикой взаимодействия адсорбента с адсорбируемыми веществами — адсорбтивами.

полиминерального цемента и отсутствие этого влияния на механическую смесь различных (синтетических) минералов цемента, на которых адсорбировалась с. д. б.; проникание воды через разные промежутки времени с момента затворения цемента сквозь пленку с. д. б. любой толщины, а также ионов Ca^{++} и OH' , выделившихся при гидролизе трехкальцевого силиката. Для гидратированного трехкальцевого алюмината толщина адсорбционных слоев с. д. б. примерно равна 4—7 мономолекулярным слоям лигносульфонатов, что соответствует $1,8\text{—}2,2 \cdot 10^{-3}$ мг адсорбированного с. д. б. на 1 см^2 поверхности гидратированного материала. В опытах также выяснялся эффект от адсорбции с. д. б. на поверхности молотых каменных материалов (табл. VII.20).

Таблица VII.20

Добавка с. с. б., %	Подвижность растворяемых смесей состава 1 : 3, мм	
	Молотый известняк	Молотый кварцевый песок
—	126	135
0,02	139	147
0,05	146	145
0,10	162	172
0,15	220	159

Опыты показали, что для молотого кварцевого песка адсорбцию установить нельзя из-за ее незначительности. Для молотого известняка изотерма адсорбции по численным значениям близка к изотермам адсорбции цемента с высокой тонкостью помола и средним по величине содержанием минерала C_3A . По этой причине пластифицирование растворяемых смесей на известняковом порошке дает больший эффект, что видно по расплыву конуса растворяемой смеси при содержании в смеси 0,15% с. с. б. от массы порошка. Меньшее содержание с. с. б. не дает четких результатов по причине сложности равномерного распределения небольших количеств добавки на шероховатой поверхности зерен известняка, имеющих, кроме того, значительно большую пористость по сравнению с плотными зёрнами кварца.

Перечисленные особенности адсорбции ПАВ, в данном случае с. д. б., кроме научных целей имеют значение для производства. Известно, что на первых этапах применения с. с. б. в смеси (при ее приготовлении в бетоносмесителях) на ряде объектов был получен отрицательный результат: смесь быстро загустевала, а иногда не твердела в течение нескольких суток (пяти и более). Причиной, вызывающей быстрое загустевание смесей или длительную задержку твердения цемента, является различная адсорбционная способность минералов, недостаточное количество гипса в цементе, степень свежести поверхности зерен минералов и количество ПАВ в растворяемой или бетонной смеси. Там, где меньше трехкальцевого алюмината, может тормозиться твердение, так как поверхность гидратирующихся зерен силикатов кальция (C_3S и C_2S) покрывается

более толстым слоем с. д. б. по сравнению с цементом, в котором больше минерала C_3A . В этом случае сказывается различие в адсорбционном эффекте минералов цемента.

Ранее было показано, что адсорбция с. д. б. на минералах цемента имеет избирательный характер и особенно высока на поверхности минерала C_3A . Это можно проверить опытами с цементными, подвергавшимися до введения с. д. б. предварительному смешиванию с водой — предварительной гидратации. В этом случае количество с. д. б., адсорбирующейся на поверхности новообразований, значительно возрастает (табл. VII.21). Причиной такого изменения ад-

Таблица VII.21

Время от момента введения с. д. б., ч	Концентрация с. д. б. в жидкой фазе в расчете на сухое вещество, г/л		Поглощение с. д. б., мг на 1 г цемента при введении	
	с. д. б. вводится с водой затворения	с. д. б. вводится через 30 мин после приготовления теста	с водой затворения	после предварительной гидратации
1	2,38	0,75	6,73	7,87
2	1,32	0,71	7,47	7,90
3	1,00	—	7,70	—

Примечание. Цемент содержит примерно 11% минерала C_3A ; $s=3500$ см²/г, отношение массы воды к массе цемента — 0,7.

сорбции является гидратирующийся минерал C_3A и гидратирующийся минерал C_4AF , скорость гидратации которых по сравнению со скоростью гидратации силикатов кальция (C_3S и C_2S) значительно выше. Затворение чистого синтетического цемента из минерала C_3A всегда сопровождается высоким выделением тепла и своеобразным вскипанием теста, из которого выделяется водяной пар.

Кроме того, с. д. б. после предварительной гидратации цемента не препятствует гидратации в нем минерала C_4AF , в то время как затворение цемента с добавкой с. д. б. в воду затворения меняет ход химического процесса. В этом случае поверхность минерала C_4AF блокируется ПАВ. Следовательно, меняется и распределение с. д. б. на поверхности минералов. Число слоев добавки, покрывающей их поверхность, становится большим, так как площадь, покрываемая ПАВ, меньше площади зерен цемента, не вступивших в реакцию с водой, и новообразований из зерен, на поверхности и в массе которых прошли процессы гидратации.

Из табл. VII.21 видно, что: 1) концентрация с. д. б. в жидкой фазе уменьшается с 2,38 до 0,75% г/л при ее введении после предварительной гидратации и выше концентрации даже после 3 ч контакта жидкой фазы с поверхностью зерен цемента и новообразований, полученных в итоге этого контакта за 3 ч; 2) поглощение с. д. б., введенной после предварительной гидратации, больше 7,87 мг на

1 г исходного цемента и больше, чем поглощение с. д. б., которое систематически будет увеличиваться по мере развития гидратации, заторможенной введением большого количества ПАВ, и в нашем случае составляет 7,7 мг на 1 г исходного цемента после 3 ч с момента затворения водным раствором с. д. б.

По указанным причинам все цементы следует подразделять на группы пластифицирования, в которых введение добавок всегда приводило бы к получению технико-экономического эффекта. В настоящее время пользуются предложенным автором делением цементов на три группы, для которых назначаются исходные условия оценки состояния цемента — его качества на момент использования. Соответственно этому качеству назначается дозировка с. д. б. в пределах $0,15 \div 0,3$ (0,4) % от массы цемента на сухой остаток этого вещества. В табл. VII.22 приведены показатели технических характеристик с. с. б. и с. д. б. Пластификатор с. с. б. является побочным продуктом гидролизного производства, концентраты с. д. б. являются отходом при переработке с. с. б., в связи с чем в данное время отпуск последней для нужд строительства прекращен.

Т а б л и ц а VII.22

Наименование	Концентраты с. с. б.		Концентраты с. д. б.	
	жидкие КБЖ *	твердые КБТ **	жидкие *	твердые **
Содержание сухих веществ, %, не менее	50	76	50	76
Содержание золы к массе сухих веществ, %, не более	20	20	—	—
Содержание нерастворимых в воде веществ к массе сухих веществ, %, не более	—	—	1,1	1,1
Плотность (γ_4^{20}), г/см ³ , не менее	1,275	—	—	—
Содержание редуцирующих веществ к массе сухих веществ, %, не более	10,0	10,0	8	8
Активная кислотность рН	—	—	4,5—7	4,5—7

* Густая жидкость темно-коричневого цвета.

** Масса темно-коричневого цвета.

Примечание. На концентраты с. д. б. имеется МРТУ 13-04-35—66; на концентраты с. с. б. — ГОСТ 6003—51. Кроме указанных видов с. с. б., по этому же ГОСТу выпускались концентраты барды порошкообразные КБП и термообработанные концентраты барды (термополимер) ТКБ.

Пластификатор с. д. б. вводится в смесь в расчете на активную часть вещества (т. е. на сухие вещества, содержащиеся в жидком или твердом пластификаторе), поэтому в лаборатории необходимо определить их содержание по обычной методике.

Существует прием введения с. д. б. непосредственно в помольный агрегат при помоле клинкера. Цемент с добавкой с. д. б. назван пластифицированным. Эффект пластифицирования зависит от химико-минералогического состава клинкера, тонкости его измельче-

ния, количества гипса, введенного при помоле клинкера, равномерности распределения пластификатора по поверхности зерен цемента. Несоблюдение этих условий, в ряде случаев, вызывает меньший эффект от введения с. д. б. по сравнению с введением ее на строительной площадке. Изыскивается способ введения с. д. б. не к кусковому клинкеру, а к цементу, образующемуся после помола. В табл. VII.23 и VII.24 показано, как повышается эффект от введения

Таблица VII.23

№ пробного помола	С. с. б., %	Остаток на сите № 90	s, см ² /г
1	—	9,0	3400
	0,2	6,4	3300
2	—	9,0	3400
	0,25	4,4	4300
3	—	9,4	3400
	0,40	7,4	3800
4	—	10,2	—
	0,15	7,1	—

Примечания: 1. Производительность мельницы 2,2×12 м с 18 об/мин — 15—16 т/ч.
2. Добавка с. с. б. (жидкая) повышает интенсивность помола; увеличивается тонкость помола или повышается производительность мельниц на 8—12%.

Таблица VII.24

№ опыта	Содержание опыта	Удельная тонкость помола цемента, см ² /г, при продолжительности помола, ч					
		1	2	3	4	5	6
1	Помол клинкера без добавки	2830	4310	5170	5840	6140	6220
2	Помол клинкера с жидкой с. с. б., вводимой в мельницу два раза: в начале помола на поверхность зерен клинкера и в конце	—	4600	5140	5840	6140	7190
3	Помол клинкера с жидкой с. с. б., вводимой равномерными частями 6 раз по мере развития удельной поверхности цемента		4790	6150	7050	7600	8150
4	Помол клинкера с порошком с. с. б.	2770	4460	5760	6220	6050	6220

Примечание. В лабораторных опытах размер добавки по сухому остатку равен 0,75% с. с. б. от массы цемента, что выше обычной дозировки. При окончании помола (опыт № 3) s=7050 см²/г при содержании с. с. б.=0,36%, что практически соответствует верхнему пределу дозировки для цементов со значительно более низкой дисперсностью s=3000—3500 см²/г.

с. д. б. в жидком виде по мере развития удельной поверхности измельчаемого клинкера в лабораторных условиях. Эти опыты показывают, что из-за чисто технической стороны пластифицирования цемента эффект введения с. д. б. ниже возможного. При пластифицировании максимальный эффект соответствует наибольшему уменьшению в смесях воды для любой заданной пластичности без торможения процесса из-за создания на поверхности твердой фазы слоев с. д. б., которые задерживают ход диффузии ионов, участвующих в обменной реакции между цементом и водой. С. д. б. химически не участвует в этой реакции.

Гидрофобизирующие добавки находят все более широкое применение в цементной промышленности и при производстве бетонных работ. Так же как при приготовлении цементов с добавками гидрофильного типа, например с. д. б., промышленность выпускает цементы с гидрофобизирующими добавками, что позволяет называть их в первом случае пластифицированными, а во втором — гидрофобизирующими. При введении в бетонную смесь гидрофобизирующих добавок значительно повышаются морозостойкость, водонепроницаемость, деформативность и другие свойства бетонов. При этом удается с большим успехом регулировать тепловыделение, что име-

Т а б л и ц а VII.25

Тип и наименование добавки	Состав добавки	Количество добавки, %	
		в бетонах	в растворах
Гидрофильная — с. д. б.	Кальциевая соль лигно-сульфоновых кислот с примесью редуцирующих веществ	0,15—0,30*	0,15—0,30*
Гидрофобизирующая — мылонафт	Натриевые соли не растворимых в воде органических кислот; извлекаются из отходов щелочной очистки керосиновых, газойлевых и соляровых дистиллятов нефти	0,08—0,50**	0,05—0,10**
Гидрофобизирующая — асидол (двух марок) после омыления или эмульгирования	Нефтяные кислоты; извлекаются из щелочных отходов масляных и соляровых дистиллятов	0,08—0,50	0,05—0,10
Гидрофобизирующая — абистат натрия (в виде жидкости или порошка)	Продукт омыления абетиновой смолы	0,01—0,025*	0,01—0,025*
Гидрофобизирующие — пластифицирующие — кремнийорганические жидкости	Этилгидросилоксановая жидкость ГКЖ-94, метилсиликонат натрия ГКЖ-11; этилсиликонат натрия ГКЖ-10	0,05—0,15***	0,05—0,15***

* В расчете на сухое вещество. Для ряда специальных случаев размер добавки может быть увеличен.

** В расчете на товарный раствор мылонафта, содержащий 45—50% воды.

*** В расчете на 100%-ную жидкость.

ет существенное значение при бетонировании конструкций или частей сооружений больших объемов, устраиваемых без членения (опоры мостов, фундаменты, например, под доменные печи, блоки гидротехнических сооружений и т. д.). Следует иметь в виду, что каждая из гидрофобизирующих добавок дозируется в строгом соответствии с нормативными указаниями или в полном соответствии с опытными данными, полученными при изучении ее свойств.

Особый интерес представляет применение комплексных ПАВ, когда удастся использовать положительное действие каждой добавки (гидрофилизующее и гидрофобизирующее). Эффект их применения значительно выше, чем от добавок одного вида, что подтверждено многочисленными исследованиями и опытными работами (табл. VII.25).

§ 47. Электролиты

Разнообразие условий строительных работ, а также природа твердения вяжущих вызывает необходимость применения различных электролитов, кроме добавок, указанных в § 5—7 и 46. Ассортимент таких электролитов систематически расширяется, особенно в последний период [47]. Еще сравнительно недавно применение электролитов сдерживалось из-за малой изученности их влияния на свойства бетона. В последнее время способы использования электролитов внесли в технические условия отдельных ведомств (например, в строительные работы Министерства газовой промышленности, комплексную добавку нитрата кальция и мочевины НКК в инструкцию по производству бетонных работ в зимнее время и т. д.).

Добавки классифицируют по условиям применения, показателям свойств бетонов; при изложении общих теоретических положений о химическом влиянии добавок предлагается разделять их на классы [47, 77]. Рассмотрим некоторые из них.

Класс 1, группа а — добавки, повышающие растворимость силикатной группы минералов полиминерального цемента (алита и белита) и, следовательно, влияющие на скорость их гидролиза и гидратации (механизм действия связан с изменением ионной силы раствора)*: сернокислый и хлористый калий, хлористый натрий (поваренная соль) и ряд других. Необходимо учитывать стойкость арматуры против коррозии в железобетоне, процессу которой способствуют некоторые электролиты. По этой причине для сохранности арматуры необходимо вводить добавки, предохраняющие ее от коррозии.

Класс 1, группа б — добавки, действие которых понижает растворимость силикатной группы минералов полиминерального цемента (алита и белита). Ускоряющий эффект в процессе твердения в этом случае связан с увеличением скорости кристаллизации про-

* Для стойкой работы железобетона необходима надежная работа арматуры без коррозии, следовательно, с сохранением щелочности бетона, в которой она находится. Поэтому электролиты должны быть солями сильной кислоты и сильной щелочи — сильного основания.

дуктов гидролиза и гидратации. В этих добавках содержатся ионы, одноименные с ионами цемента (например, хлористый кальций и др.).

Класс 2, группа а — добавки, ускоряющие процессы гидролиза и гидратации и придающие цементному камню повышенную водонепроницаемость, водоудерживающую способность, деформативность. Эти добавки уменьшают щелочность среды (жидкой фазы цементного теста — цементного камня). Химические реакции цемента с этими солями протекают ступенчато, и на последней ступени образуются труднорастворимые соединения — гидроокиси металлов, которые и придают камню свойства, указанные выше (кольматируют* — уплотняют поры). К добавкам этого вида относятся: сульфат алюминия (для ускорения твердения бетона), хлорное железо (для ускорения твердения и повышения плотности бетона) и др.

Класс 2, группа б — добавки, повышающие щелочность (рН) среды (жидкой фазы цементного теста — цементного камня). Эти добавки ускоряют твердение. Некоторые из них могут привести к коррозии, если щебень (гравий) содержит реакционноспособный кремнезем [42, 59]. Например, при введении углекислого натрия в растворе появляется едкий натрий по реакции гидролиза этой соли. $\text{Na}_2\text{CO}_3 + \text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons \text{NaHCO}_3 + \text{NaOH}$.

При наличии в каменном материале реакционноспособного кремнезема ($\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$) щелочь вступит с ним во взаимодействие, что приведет к разрушению бетона (см. § 33, 63). Электролиты группы б оказывают различное действие на бетон. Одни добавки применяются при производстве бетонных работ без подогрева материалов и без сохранения экзотермического тепла, выделяющегося при твердении цемента, например поташ K_2CO_3 , также Na_2CO_3 , другие — только для ускорения твердения, повышения водонепроницаемости, например алюминат натрия NaAlO_2 .

Класс 2, группа в — добавки, регулирующие твердение алюминатных и алюмоферритных фаз (см. § 8, 9, 43 и 45). В этом случае образуются комплексные соли — двойные соли, гидратированные соединения (например, $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot 31\text{H}_2\text{O}$; $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{CaSO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$; $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{CaCl}_2 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$). Следовательно, электролиты, образующие такие комплексные соединения, относятся к указанной категории добавок. Часть из них, например CaCl_2 , ускоряет процесс гидролиза и гидратации алита и белита. Кроме CaSO_4 и CaCl_2 при холодном бетонировании** применяют кальциевые соли азотной $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ и азотистой $\text{Ca}(\text{NO}_2)_2$ кислот, а также NaNO_2 . Факт отнесения одной и той же добавки к разным группам показывает, что многие электролиты в полиминеральном цементе не имеют избирательного действия. При этом надо отметить, что химическая избирательность действия некоторых добавок (например,

* Кольматирование — процесс наполнения, осаждения в пористых твердых телах какого-либо вещества.

** Бетонирование при отрицательных температурах воздуха без подогрева материалов и утепления бетонируемого объекта.

гипса на гидратированный трехкальциевый алюминат) носит условный характер в процессе гидролиза и гидратации полиминерального цемента, так как всегда резко меняет характер структурообразования каждой минеральной фазы цемента. Механизм действия добавок этой группы протекает при обязательной диссоциации электролитов на ионы (следовательно, в жидкой фазе цементного теста — цементного камня), образовании пересыщенных растворов и выкристаллизовывании соответствующих двойных солей, например, выкристаллизовывании кроме ранее указанных соединений при реакции трехкальциевого гидратированного алюмината и нитрата кальция — гидронитроалюмината кальция $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \times 10\text{H}_2\text{O}$.

Введение электролитов следует рассматривать с позиций направленного структурообразования цементного камня. Мы как бы частично восполняем природные недостатки в процессах гидролиза и гидратации полиминерального портландцемента с резким различием в этом процессе поведения отдельных фаз. Как известно, кристаллические новообразования, слагающие структуры искусственного технического камня, образуются из исходных твердых фаз (продуктов реакции) для каждого петрографического состава вяжущего в оптимальных физико-химических условиях. Создать оптимальные условия без применения добавок невозможно, что следует помнить, направляя свои усилия на отыскание новых добавок, выбирая необходимые виды добавок, их количество и условия применения.

Следует иметь в виду, что действие добавок, относящихся к различным классам и группам, протекает по линии наиболее активной фазы полиминерального цемента, а в случае наличия нескольких добавок, — по линии связи с такими фазами тех добавок, которые с наибольшей скоростью образуют пересыщенные растворы и труднорастворимые комплексы. В этом случае остальные электролиты, находясь в растворенном состоянии (в жидкой фазе цементного теста), способствуют ускорению гидролиза и гидратации силикатной группы минералов цемента. Надо отметить и развитие указанных исследований в направлении сочетания неорганических и органических добавок.

Деление электролитов возможно и по эффекту их воздействия на кинетику процессов твердения, по условиям производства работ и, наконец, по повышению технических свойств бетонной (растворной) смеси и бетона. Развитие исследований процессов твердения цемента показало нецелесообразность применения добавок (неорганических и органических) без одновременного применения ПАВ (см. § 46).

Перечисленные направления классификации добавок в действительности имеют более сложный характер по причине природы цемента, а сказанное о характере процессов при комплексном использовании различных добавок подтверждается прямыми опытами. В табл. VII.26 приведен перечень добавок и их роль в создании технических свойств.

№ п.п	Цель введения добавки	Практический эффект	Условия применения добавок
1	Пластифицирование цемента	Повышение пластичности смеси, повышение технических свойств, или экономия цемента	Дозировка добавок, условия и область применения должны производиться в соответствии с «Указаниями по применению ускоряющих твердение пластифицирующих добавок к бетону при производстве сборных изделий», а также указаний о применении с. д. б. [60, 20] и ряда других указаний, изложенных в СНиП III-B.1—70
2	Гидрофобизирование цемента (различными по природе добавками — СНВ, асидолом, мыло-нафтом и др.)	Защита цемента от слеживания, повышение ряда его технических свойств	Оптимальным решением вопроса повышения качества бетона, как правило, является применение не одной добавки со специфическим действием, а комплекса их. При этом, как правило, лучшие результаты показывает сочетание комплекса ПАВ (№ 1 и 2 или № 1 и 6) и необходимых для достижения соответствующего эффекта неорганических электролитов
3	Ускорение твердения бетона (CaCl_2 , сахаром, глюкозой и т. д.)	Ускорение твердения бетона в различных температурных условиях для конструкций, не имеющих арматуры	
4	Регулирование тепло-выделения бетона (например, с. д. б.)	Защита массивного бетона от появления трещин при твердении	
5	Обеспечение твердения бетона при отрицательных температурах материала (например, CaCl_2 , NaCl)	Обеспечение твердения неармированного бетона при отрицательных температурах	
6	Улучшение качества образующихся контракционных объемов на всех этапах твердения бетона (при «сработке» микробетона Юнга, например ГКЖ-94)	Повышение морозостойкости и других свойств бетона за счет выделения при систематическом гидролизе и гидратации цемента в присутствии добавки — водорода, который будет становиться микроамортизатором в контракционных объемах с высокой степенью его диспергирования	
7	Твердение бетона при отрицательных температурах (например, НКМ, нитрит натрия, НКК, НКХ и др.)	Обеспечение твердения армированного и неармированного бетона при отрицательных температурах	Перед широким практическим применением добавок, независимо от наличия практических рекомендаций, необходимо до начала работ уточнить эффект их действия путем опытных затворений бетонной (растворной) смеси в лаборатории и проверки на образцах, сравнивая их с качеством эталонного бетона

§ 48. Формуемость бетонной смеси

Формуемость — это не только возможность создания из смеси нужных по форме деталей, конструкций, сооружений, но и достижение степени уплотнения, которая задана проектом. Для смесей;

формуемых вибрированием, решающее значение имеет правильный выбор вибраторов и точное соблюдение продолжительности сроков вибрирования. Это требование в ряде случаев не выполняется по той причине, что поверхность вибрируемой смеси сразу же при уплотнении покрывается цементным молоком, что ошибочно считается эффектом ее уплотнения. В итоге бетонная смесь остается недоуплотненной. В сказанном легко убедиться, определив в стандартном техническом вискозиметре на виброплощадке время (с) переформирования конуса из жесткой смеси, т. е. жесткости* (ГОСТ 10181—62).

Эффект вибрирования конуса бетонной смеси на стандартной виброплощадке и в конструкциях (или отдельных частях сооружений) различен и зависит от конструкции вибраторов. Длительность уплотнения на виброплощадке и в конструктивном элементе (сооружении) неодинакова, что должна установить лаборатория строительства. Зона действия вибратора после каждой его последующей установки должна перекрываться. Сказанное о различном воздействии вибраторов хорошо видно из результатов изготовления бетонных образцов на синхронизированной виброплощадке, ряд участков на которой отличается величиной амплитуды колебаний (табл. VII.27). Амплитуда колебаний виброплощадки равна 0,7 мм.

Эти испытания показали, что при жестком закреплении формы все двенадцать образцов имеют большую прочность по сравнению с образцами без жесткого крепления. Прочность некоторых образцов, значительно отличающаяся от прочности других образцов-близнецов, зависит не только от системы закрепления, но и от однородности состава смеси, приготовленной на бетонном смесителе принудительного действия. В случае уплотнения бетонной смеси с пластичностью, обеспечивающей ей возможность растекания в форме при

Т а б л и ц а VII.27

№ формы	Предел прочности образцов при сжатии, кг/см ² (10 ⁻¹ МПа)	№ формы	Предел прочности образцов при сжатии, кг/см ² (10 ⁻¹ МПа)
1	295/255	7	265/230
2	310/200	8	310/235
3	285/200	9	265/175
4	285/215	10	305/211
5	309/285	11	310/247
6	290/270	12	—/245

Примечания: 1. В числителе — прочность жестко закрепленных форм, в знаменателе — незакрепленных.

2. Одновременно уплотняли смесь в двенадцати формах с размером ребра в 20 см.

3. В 1 м³ бетонной смеси содержалось 350 кг портландцемента, 150 л воды, среднезернистый полиминеральный песок и гранитный щебень.

4. У формы № 7 амплитуда колебаний равна 0,9 мм, формы № 12 — 0,65 мм.

* Жесткость бетонной смеси можно определить упрощенным способом без технического вискозиметра.

уплотнении штыкованием, применение вибраторов должно ограничиваться не уплотнением, так как смесь будет расслаиваться, а ее распределением в форме. При таком воздействии на смесь длительность вибрирования составляет несколько секунд.

Надо помнить, что вибрирование приводит не только к уплотнению, но и к расслоению смеси при неправильном выборе состава и длительности уплотнения. Однако преимущества механизированного формирования конструкций различного объема, геометрического очертания и применения настолько велики, что при правильном назначении смеси и режима вибрирования ее небольшое расслоение практически не отражается на долговечности бетона.

Уже в первые годы внедрения вибрирования было узаконено снижение норм расхода цемента на 10%. Тогда же предусматривалось 30—75%-ное повышение производительности труда при уплотнении смесей вибрированием в зависимости от особенностей выполняемых работ. Естественно, что и наиболее высокие технические свойства бетонов, приготовленных при разумном использовании эффекта вибрирования, будут при применении жестких смесей.

§ 49. Этапы контроля качества бетонной смеси

Контроль качества смеси на строительстве начинается с проверки составляющих ее материалов, точности дозирования компонентов, выхода бетонной смеси и проходит через каждый технологический передел до его окончания. Завершается контроль в последний день осуществления ухода за твердеющим бетоном.

Неверно считать, что контроль качества смеси, уплотняемой любым методом, можно рассматривать отдельно от перечисленных этапов, так же как и осуществлять контроль за любым технологическим переделом вне связи с одновременным проводимым последовательно контроле за другими переделами. Разрыв в цепи контроля не гарантирует получение бетона проектных свойств. Устранение недостатков, замеченных при проверке, например дозировании компонентов смеси, не предохраняет от возможности последующих нарушений ее состава в силу нарушения технических условий производства работ на последующих этапах.

Качество бетона связано с правильным производством бетонных работ, приготовлением исходных материалов, их транспортированием на строительную площадку, складированием и хранением строительных материалов. Все перечисленное подлежит постоянному вниманию лаборатории и своевременному принятию необходимых мер. Если область производства работ не входит в компетенцию строительства, о нарушении качества материала или работ необходимо сообщать по подчиненности; если же зафиксированные нарушения касаются подразделений строительства, меры принимаются на месте.

Действенность любого контроля неразрывно связана с его своевременностью, оперативностью, использующей научные достижения в различных областях науки и промышленного производства

и помогающей предупреждать появление ошибок в технологии бетонных работ на каждом этапе, с профилактической деятельностью лабораторий.

§ 50. Свежесть цемента, выраженная показателем потерь при прокаливании

Качество поверхности зерен цемента, выпущенного из помоловых агрегатов, в зависимости от относительной влажности воздуха, всегда отличается от качества поверхности только что образовавшихся частиц. При применении цемента в строительстве это надо учитывать. Как известно, степень корродирования поверхности парами воздуха и газами, составляющими воздух и вступающими в реакцию с минералами цемента (например, с CO_2 воздуха), или степень ее «неповрежденности—свежести» определяется путем прокаливании проб цемента. Значение показателя потерь при прокаливании (п. п. п.) цемента или его свежести имеет важное значение для любых строительно-технических свойств бетона, из-

Т а б л и ц а VII.28

Условия опыта	Содержание воды, %		Сроки схватывания, ч-мин		Предел прочности образцов состава 1 : 3, кг/см ² (10 ⁻¹ МПа)					
	в тесте	в растворе	начало	конец	на разрыв восьмерок			при сжатии кубиков		
					Продолжительность твердения, сут.					
					3	7	28	3	7	28
Цемент испытан вслед за поступлени- ем с завода. Хранение цемента без тары в количестве 100 т. . . .	27	7,0	4-25	6-45	20,7	21,3	24,9	256	348	524
Тот же цемент после 10 мес. хранения на складе	26	7,5	7-15	9-50	15,5	20,7	23,7	202	286	389
Тот же цемент после 18 мес. хранения на складе	28	8,0	5-00	10-50	12,2	21,8	24,7	119	243	410
Тот же цемент после 4 мес. хранения на складе и дополнитель- ного помола в течение 30 мин в большой ла- бораторной шаровой мельнице	26	7,5	3-30	5-45	23,4	20,4	22,8	368	483	539
Тот же цемент после 15 мес. хранения на складе и дополни- тельного помола в те- чение 1 ч 30 мин в большой лаборатор- ной шаровой мельни- це	27	7,7	2-10	4-35	24,1	23,4	28,5	476	564	593

готовленного на цементе, подвергавшемся «атмосферной» коррозии.

К сожалению, указанное обстоятельство очень часто не учитывают, что ведет не только к снижению строительных свойств смесей и технических свойств бетонов на цементах с корродированной поверхностью зерен, но и к значительному перерасходу цемента *. Сказанное в § 8 и 11, относится и к ходу процессов коррозии поверхностного слоя зерен цемента, т. е. при прочих равных условиях эти процессы зависят от поверхности минералов и размеров зерен.

Из опытов, приведенных в табл. VII.28, видно, что цемент теряет свою активность по мере увеличения сроков хранения на складах. Относительная влажность воздуха в данном случае имеет решающее значение — хранение цемента около бассейнов рек, озер, морей, так же как и в дождливый период, приводит к росту показателя п. п. п. С течением времени (табл. VII.28 и VII.29) этот показатель растет, следовательно, систематически снижается и реакционная способность цемента.

Показатель п. п. п. показывает суммарное количество влаги и CO_2 , вступивших в реакцию с зернами цемента. При этом числовое увеличение показателя п. п. п. отражает локальный характер углубления гидратирующихся слоев на зернах цемента именно по активным, а не всем минералам цемента. Особое значение для слеживания цемента имеет его дисперсность, что можно проследить на цементах любого минералогического состава (табл. VII.29).

Время от начала перемешивания цемента с водой	П. п. п., %											
	Клинкер № 1								Клинкер № 2			
	s=2600 см²/г				s=4300 см²/г				s=2450 см²/г			
	Помол 1 ч 20 мин				Помол 5 ч 30 мин				Помол 1 ч 20 мин			
	Затворение											
	сразу после помола	через 6 мес.	через 1 год	через 1 год домол 1 ч	сразу после помола	через 6 мес.	через 1 год	через 1 год домол 1 ч	сразу после помола	через 6 мес.	через 1 год	через 1 год домол 1 ч
Затворение	3,60	3,73	4,94	3,93	3,14	4,39	7,77	5,28	2,53	2,99	3,86	4,51
1 ч	3,35	3,97	—	3,58	3,50	5,02	—	5,35	2,53	3,91	—	4,65
3 ч	3,54	4,38	—	3,72	3,34	5,42	—	5,37	2,76	3,68	—	4,63
5 ч	3,54	4,07	—	—	4,01	4,98	—	—	3,17	3,63	—	—
8 ч	—	—	—	4,63	—	—	—	6 89	—	—	—	5,62
1 сут.	6,76	7,28	—	—	9,75	9,53	—	—	8,47	7,42	—	—
3 сут.	9,53	10,56	—	—	12,79	14,01	—	—	9,53	11,82	—	—
7 сут.	10,12	11,23	—	—	14,11	13,40	—	—	10,35	11,50	—	—
28 сут.	13,05	13,48	—	—	16,35	16,74	—	—	16,92	16,34	—	—

* Слипшиеся, а затем сцементированные зерна цемента имеют меньшую поверхность контакта с минеральными зернами в растворе и бетоне.

Так, для тонкости помола, выраженной через условную удельную поверхность $s=2450$ и $2600 \text{ см}^2/\text{г}$, исходные цементы после приготовления в лабораторной мельнице в условиях дождливой осени в неотапливаемом помещении имели п. п. п. $=2,53-3,6\%$, а для тонкости помола $s=4040$ и $4300 \text{ см}^2/\text{г}$ соответственно $2,34$ и $3,73\%$. Через 1 год вылеживания эти же цементы при исходной тонкости помола $s=2450 \text{ см}^2/\text{г}$ имеют п. п. п. $=3,86\%$, а при тонкости помола $s=2600 \text{ см}^2/\text{г}$ п. п. п. $=4,94\%$. Различие в измерениях п. п. п. здесь также связано и с минералогическим составом цементов. Из опытов (табл. VII.30 и VII.31) по определению скорости гидратации цемента при разных водоцементных отношениях следует, что эта скорость практически не зависит от количества воды, но прямым образом связана с минералогическим и гранулометрическим составами цемента. Эти опыты проводились на цементах разного состава.

Дополнительно к сказанному о роли дисперсности цемента в процессе гидратации и гидролиза в табл. VII.32 приведены сведения об изменении показателя п. п. п. в особых условиях затворения цемента — при использовании портландцемента М400 Белгородского завода после его разделения в водной среде на мелкие и крупные фракции. В этом случае исследования проводятся на цементах с условной удельной поверхностью: $2727, 3654-4934, 4837-5149, 1605-1965$ и $1148-2095 \text{ см}^2/\text{г}$. Здесь $s=2727 \text{ см}^2/\text{г}$ — условная удельная поверхность цемента, с которым были начаты опыты по водной се-

Таблица VII.29

П. п. п., %											
Клинкер № 2				Клинкер № 3							
s=4040 см²/г				s=2700 см²/г				s=4100 см²/г			
Помол 5 ч 30 мин				Помол 1 ч 20 мин				Помол 4 ч			
цементы											
сразу после помола	через 6 мес.	через 1 год	через 1 год долом 1 ч	сразу после помола	через 6 мес.	через 1 год	через 1 год долом 1 ч	сразу после помола	через 6 мес.	через 1 год	через 1 год долом 1 ч
2,34	2,70	7,88	6,24	2,93	4,47	5,76	5,12	2,59	4,76	7,68	5,26
3,09	5,36	—	6,99	3,56	5,68	—	5,18	3,39	6,36	—	5,67
3,40	5,02	—	6,73	3,45	6,14	—	5,18	4,03	6,61	—	5,49
3,70	4,68	—	—	3,75	5,24	—	—	4,15	5,72	—	—
—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
10,51	9,72	—	—	9,34	7,80	—	—	11,01	10,37	—	—
15,54	15,57	—	—	11,57	11,61	—	—	16,22	16,70	—	—
17,44	15,66	—	—	12,41	10,85	—	—	18,13	17,05	—	—
18,97	20,12	—	—	18,16	17,87	—	—	18,97	21,22	—	—

Таблица VII.30

Время от начала затворения цемента водой, ч	Среднее из трех значений п. п. п., %		Время от начала затворения цемента водой, ч	Среднее из трех значений п. п. п., %	
	В/Ц=0,30	В/Ц=0,60		В/Ц=0,30	В/Ц=0,60
Затворение	2,44	—	6,0	3,61	—
0,17	2,78	—	9,0	4,81	5,22
0,33	3,24	—	12,0	6,08	6,67
0,5	2,84	—	15,0	5,85	6,18
2,0	2,69	—	18,0	6,70	6,27
3,0	2,87	—	21,0	8,30	8,16
5,0	3,36	—	24,0	8,56	—

Примечание. П. п. п. определялись на образцах из портландцемента Криворожского завода с $s=3037 \text{ см}^2/\text{г}$.

Таблица VII.31

Время от начала затворения цемента водой, ч	П. п. п., %	Время от начала затворения цемента водой, ч	П. п. п., %	Время от начала затворения цемента водой, ч	П. п. п., %
0,08	1,54	4,0	2,60	72,0	11,16
0,50	1,61	5,0	3,18	120,0	12,57
0,66	1,92	6,0	3,89	192,0	14,21
1,0	1,77	24,0	8,08	672,0	14,17
2,0	2,33	30,0	9,16	2160,0	16,87
3,0	2,46	48,0	10,87		

Примечание. В/Ц=0,30, $s=2727 \text{ см}^2/\text{г}$, п. п. п. (порошка)=0,93%.

Таблица VII.32

Цемент	$s, \text{ см}^2/\text{г}$	П. п. п., %	Зерновой состав, %, фракций крупностью, мкм							
			5	5-10	10-20	20-30	30-40	40-60	60-80	>80
Исходный цемент заводского помола М500	3130	1,08	2,9	11,6	8,6	10,3	8,8	24,4	10,5	23,0
Мелкая фракция однократной сепарации	3654	4,42	5,4	21,4	15,8	12,9	17,4	16,5	3,3	7,3
Крупная фракция однократной сепарации	1012	1,31	0,4	1,4	4,6	3,4	12,5	29,8	22,6	25,3

Примечания: 1. В опытах по сепарации и определению зернового состава применен цемент, пролежавший в лаборатории 4 мес., что вносит некоторое различие в показатели удельной поверхности и п. п. п. между данными этой таблицы и табл. VII.31. По этой причине в табл. VII.31 показатели условной удельной поверхности исходного цемента ниже (так как в лежалом цементе образуются мелкие цементированные комочки — агрегаты).
2. Перед сепарацией цемента при значительном избытке воды (Ж: Т=10:1) крупные фракции цемента более 40 мкм отбирали от пробы путем просеивания.

парации, остальные являются показателями условных удельных поверхностей цемента после водной сепарации, произведенной в один и два последовательных приема.

Необходимо иметь в виду, что, несмотря на сушку цемента чистым спиртом после водной сепарации, химический процесс присоединения воды к цементу все же имеет место, что установлено в опытах в химической лаборатории на кафедре дорожно-строительных материалов в МАДИ. По этой причине, а также из-за неоднородности в гранулометрии анализируемых проб, взятых в виде навесок цементного теста из сосуда, в котором производится сепарация цемента, показатели условной удельной поверхности в ряде проб не стабильны. Анализ данных табл. VII.29—VII.32 показывает следующее:

1. Портландцемент Белгородского завода с условной удельной поверхностью, несколько меньшей, чем портландцемент Криворожского завода, имеющий большую поверхность зерен, гидратируется за первые сутки быстрее, что важно для условий формирования структуры цементного камня при тепловлажностной обработке бетона и назначении сроков ухода за твердеющим бетоном (у исходного цемента Белгородского завода п. п. п. = 0,93, у исходного цемента Криворожского завода п. п. п. = 2,44).

2. Глубина гидратации мелких фракций цемента одно- и двухразовой сепарации даже к 90 сут. твердения в условиях, оптимальных по влажности воздуха, значительно выше глубины гидратации портландцемента заводского помола и тем более крупных фракций того же цемента (для мелких фракций одnorазовой сепарации п. п. п. = 21,2%, мелких фракций одnorазовой сепарации п. п. п. = 21,2%, мелких фракций двухразовой сепарации п. п. п. = 23,14%, исходного портландцемента заводского помола п. п. п. = 16,87%). Приведенные показатели подтверждают ранее сказанное о различии в слеживании цементов, отличающихся тонкостью помола, а также о резком различии в сроках твердения бетонов (растворов) при производстве работ (в табл. VII.31 приведены зерновые составы исходного цемента и двух цементов, полученных из него при однократном сепарировании).

3. Различие в скорости гидратации цементов с неодинаковым зерновым составом имеет непосредственное отношение к таким важным техническим свойствам бетонной смеси и бетона, как сроки ее схватывания, кинетика экзотермического процесса, ползучесть и т. д. Появляется возможность на крупных фракциях цемента укладывать каждый очередной слой в массивной кладке значительно более медленно (с большими сроками перекрытия новым слоем смеси), что позволяет проектировать бетоносмесительные узлы с меньшей максимальной часовой производительностью и резко снижать тепловыделение в массивном бетоне.

4. При совместном рассмотрении роста показателя п. п. п. и снижения В/Ц цементного теста и бетонной (растворной) смеси следует сделать вывод о значении для качества формирующегося цементного камня недопущения испарения воды из цементного те-

Зона взятия пробы на определение п. п. п. и описание пробы	Среднее значение п. п. п. из трех показателей
<i>Первая зона</i> сразу под бумагой (на глубине до 5 см); твердый и прочный камень; проба взята путем соскабливания ножом	16,86
<i>Вторая зона</i> — на глубине 5 см от поверхности; твердый, но менее прочный камень по сравнению с камнем первой зоны; проба соскабливается с меньшим усилием	15,42
<i>Третья зона</i> на глубине 8 см от поверхности; крошится при соскабливании, соскабливается легко	8,95
<i>Четвертая зона</i> — комочки из слежавшихся зерен цемента; внутри корка цементного камня размером 2—4 мм; комки легко превращаются в порошок	6,20
<i>Пятая зона</i> — комки размером 0,4—2 мм из слежавшихся зерен цемента; внутри — корки из цементного камня; комки легко превращаются в порошок	5,66
<i>Шестая зона</i> — порошок цемента — зерна-агрегаты размером <0,4 мм, внутри — корки из цементного камня; для определения п. п. п. пробу просеивают через сито 400 мкм	3,84

Примечание. Данные табл. VII.33 являются как бы иллюстрацией возрастающего содержания микробетона Юнга по глубине мешка.

ста. Действительно, уход воды из теста связан с прекращением в этих местах дальнейшего твердения цемента, в частности, в силу их карбонизации углекислотой воздуха и снижения технических свойств бетона (раствора), изготовленного на таком цементном тесте, в котором увеличивается количество крупных пор. Анализ сведений, приведенных в табл. VII.29, позволяет высказать предположение о возможности моделирования условий слеживания цемента. Так, цемент с $s=2600$ см²/г в лабораторном помещении с меняющейся относительной влажностью воздуха в пределах от 50 до 80% за 6 мес. хранения имеет п. п. п., равное п. п. п. после 5—6 ч гидратации при затворения цемента водой, а за 1 год — примерно равное 18—20 ч гидратации, за 7 сут. — 4—5 годам хранения в мешках в неоталливаемом помещении.

Гидратация цемента парами воздуха в стандартных крафт-мешках имеет непрерывный, все возрастающий характер, что связано с длительностью действия этих паров и высокой адсорбционной способностью цемента (табл. VII.33). Опыты по изменению п. п. п. и прочности цементов, сведения о которых приведены в табл. VII.34, позволяют сделать вывод, что каждый слой цемента в этом стандартном мешке в 50 кг, начиная со слоя с п. п. п. = 8,95% и ниже, является материалом с разными вяжущими свойствами. Домол резко улучшит свойства этих цементов, так как вскрыет еще непрореагировавшие с водой минералы цемента. Для полной гидратации цемента п. п. п. должны быть около 28%.

Однако любой домол, способствующий увеличению прочности цементов одной прочности, но принципиально различного химико-минералогического состава, не дает цементного камня одного качества, так как в одном из цементов часть минералов представлена

№ клинкера	Расчетный минералогический состав цемента, %				Продолжительность помолы клинкера, ч-мин	Исходный цемент				Цемент после 1 года хранения				Цемент после 1 года хранения и помолы в течение 1 ч.			
	C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ A		s, см ² /т	П. п. п., %	Предел прочности, кг/см ² (10 ⁻¹ МПа), через		s, см ² /т	П. п. п., %	Предел прочности, кг/см ² (10 ⁻¹ МПа), через		s, см ² /т	П. п. п., %	Предел прочности, кг/см ² (10 ⁻¹ МПа), через	
								7 сут.	28 сут.			7 сут.	28 сут.			7 сут.	28 сут.
1					2600	3,54	89/15,8	123,5/26,7	2698	4,94	48,6/17,9	86,9/22,0	2747	3,93	43,5/14,5	83,6/29,3	
	48	35	3	14	4300	3,81	192,5/32,0	265,0/42,2	3424	7,77	134,5/32,6	112,3/34,6	4422	5,28	80,8/16,0	156,0/2,76	
2					2450	2,71	—	—	2687	3,86	—	—	2870	4,51	—	—	
	48	26	8	12	4040	4,04	306,5/31,2	377,0/51,6	3561	7,88	155,2/36,5	305,0/29,5	4382	6,24	192,5/29,4	167,8/34,8	
3					2700	3,62	140,5/25,8	213,5/32,6	2689	5,76	129,5/25,7	174,0/40,9	3117	5,12	112,7/28,7	145,2/39,9	
	53	26	8	12	4100	4,70	295,8/37,5	369,0/48,8	3444	6,78	233,3/40,8	274,9/44,5	4307	5,26	285,5/44,3	200,0/45,9	

Примечания: 1. Помол и довод клинкера производился в лабораторной мельнице конструкции Гипроцемента. При помоле в цемент аводили типс (CaSO₄·2H₂O) из расчета 3% по SO₃. Стандартные образцы раствора 4X4X16 см при В/Ц=0,40 хранили в воздушно-влажной среде. Высшее начальное п. п. п. объясняется тем, что опыты проводились на цементях, пролежавших в крафт-мешках в подвальном помещении с ноября по март. Следует иметь в виду, что п. п. п. отнесены к общему количеству цемента и различны для разных зерен цемента в силу полиминеральности, полидисперсности цемента и их агрегируемости.

2. В числителе — R_{сж}, в знаменателе — R_{изг}.

размолотыми продуктами гидратации. Действительно, продукты гидратации минералов цемента — это технический камень, в котором прошли процессы твердения и сопутствующий им процесс контракции (см. § 11). В таком цементном камне имеется микронаполнитель, не участвующий в последующем твердении свежих, не гидратированных зерен цемента, что и создает иные структурные связи и, следовательно, технические свойства цементного камня вне зависимости от их прочности. П. п. п., приведенные в табл. VII.33, показывают, что при испарении воды в бетоне будет значительный процент зерен цемента, не вступивших в реакцию гидролиза и гидратации и остающихся в нем своеобразным микронаполнителем. †

Следует отметить, что кинетика изменения п.п.п. во времени (в частности, от лежания цемента, процессов гидролиза и гидратации его в бетоне) служит косвенным показателем соотношения минералов C_3S и C_2S в силикатах кальция. Чем выше содержание минерала C_2S , тем меньше изменяется во времени показатель п.п.п. Сказанное о снижении свойств цемента после его помола вызывает необходимость защиты поверхности цементных зерен ПАВ.

Вылеживание на открытом складе одиннадцати клинкеров перед их последующим мокрым измельчением (см. § 76) вскрывает действительную причину различия в водопотребности цементов, которая при прочих равных условиях определяется минералом C_3A . Клинкеры различного химико-минералогического и петрографического составов с одиннадцати цементных заводов, пролежавшие один год на поверхности земли (на досках) в условиях климата Москвы (под дождем, снегом, при многократном высыхании зерен клинкера и последующем смачивании), как видно из табл. VII.35, значительно снижают водопотребность.

Таблица VII.35

Минералогический состав клинкера, %				Нормальная густота ** цементного теста после 12 мес. вылеживания клинкеров, %	Сроки схватывания, ч-мин	
C_3S	C_2S	C_3A *	C_4AF		начало	конец
53	20	9	14	23,5	3-45	7-25
51	22	11	11	22,0	3-00	6-50
48	23	8	17	21,5	2-05	5-25
31	39	10	14	20,5	2-15	5-20
56	20	12	11	19,5	1-45	4-30
49	27	6	15	19,5	2-10	5-10
39	37	11	11	19,0	3-40	5-40
58	19	5	16	18,5	1-35	4-05
55	18	6	17	18,5	3-05	6-25
43	27	6	19	18,5	2-40	6-30
27	46	11	13	18,5	3-20	6-10

* Часть минерала C_3A вступила в реакцию с водой и следовало бы писать C_3A и $C_3A \cdot lH_2O$. Это в значительно меньшей степени относится и к остальным минералам.

** Нормальная густота теста на любом из клинкеров (без их вылеживания) значительно выше.

Следует отметить, что если на лежалых цементах резко снижается морозостойкость бетонов, то бетоны на цементах из размолотых лежалых клинкеров повышают строительно-технические свойства, что, по-видимому, в первом случае связано с гидратацией всех минералов, а во втором — с преимущественной гидратацией только глиноподобного по свойствам минерала C_3A . 15 лет пребывания нескольких сортов клинкера в естественных условиях показали, что нормальная густота цемента резко снизилась, а свойства его повысились. В МАДИ на кафедре дорожно-строительных материалов при определении экзотермического тепловыделения в адиабатическом калориметре в бетонных образцах объемом в 30 л определено значительное снижение тепловыделения на лежалых цементах, что, в первую очередь, связано с гидратацией минерала C_3A , выделяющего наибольшее количество тепла.

§ 51. ГОСТы и СНиПы на бетонную смесь

По нормативным документам бетонные смеси классифицируют на товарные — полуфабрикаты и используемые на заводах для изготовления бетонных и железобетонных изделий. Такое разделение объясняется разной продолжительностью периода между приготовлением и уплотнением товарных и заводских смесей. К товарным относят и смеси, приготавливаемые на строительных площадках для производства монолитного бетона (железобетона). Такие смеси можно выпускать с водой и без нее (сухие). Последние перемешивают с водой на месте работ в стационарных смесителях или при транспортировании к месту укладки в передвижных смесителях.

В ГОСТах особое внимание обращено на оснащенность заводов складскими помещениями, оборудованием, устройствами и машинами, позволяющими при высокой производительности с наименьшими затратами труда и в любое время года приготавливать смеси самого различного ассортимента и высокого качества. Каждый состав смеси должен выпускаться по техническим условиям заказчика, согласованным с заводом-изготовителем. В технических условиях указаны требования не только на материалы и смесь, но и на бетон (показатели комплексной марки бетона), в том числе показатели прочности в разные сроки твердения. В ГОСТах приведены требования к продолжительности транспортирования смеси с учетом температуры воздуха.

Для оценки качества смеси заводы-изготовители имеют контрольные образцы бетона. Смесь сопровождают паспортом, отражающим сведения для проверки ее качества: номер заказа, адрес завода, его наименование, марка бетонной смеси и ее температура, максимальная крупность заполнителя и др. Поступившую смесь измеряют и взвешивают. Для учета ее уплотнения при транспортировании между заказчиком и потребителем должно быть заключено соглашение о коэффициенте уплотнения. Рекомендуются следующие коэффициенты уплотнения: для жесткой смеси — 0,92, пластичной — 0,98.

§ 52. Классификация бетона

Возможны различные подходы к классификации бетонов (растворов). Однако предварительно следует высказать ряд общих соображений, которые позволят использовать с наибольшим успехом любую из существующих классификаций.

При классификации бетонов необходимо учитывать: 1) показатели качества, стоимости и сроков выполнения работ (включая быстроту, простоту и эффективность их производства); 2) виды материалов, их характеристики (включая и виды железобетона); 3) приемы выполнения работ и их особенности (включая применение различных добавок и приемы армирования, монолитность и сборность конструкций).

В классификациях в большей или меньшей степени детализации включена относительно небольшая часть свойств бетона: объемная масса, прочность на различные виды деформирования (изгиб, многократное воздействие нагрузок, в том числе знакопеременных) и на разные сроки твердения, морозостойкость, водонепроницаемость, ползучесть, тепловыделение, химическую стойкость при работе в агрессивных средах, огнестойкость, звуконепроницаемость. Указанные свойства бетона должны учитываться с надлежащей точностью, так как их правильный выбор, полное соответствие требованиям проекта и существующим нормам в конечном счете обеспечивают долговечную и надежную работу конструкций (сооружений).

Классификационные признаки бетона систематически уточняются и расширяются, чему, с одной стороны, способствует углубление знаний в области этого материала, интереснейшего по техническим и производственным возможностям, с другой — резкое расширение области его применения.

Бетон и железобетон с одинаковым успехом используют в дорожном, железнодорожном, мостовом, аэродромном, тоннельном, шахтном, фортификационном, гидротехническом, жилищно-коммунальном, промышленном, сельскохозяйственном и других видах строительства. Многолетняя эксплуатация бетонных (железобетонных) конструкций (сооружений), разнообразных по условиям работы, указывает на весьма большие возможности бетона. Научно-экспериментальные исследования в области цемента и бетона подтверждают сказанное.

Развитию более совершенных представлений в указанных областях знаний способствовало бурное развитие естественных наук. При этом следует отметить, что совершенствование и углубление знаний в области бетона в ряде случаев проходило с определенными ошибками, что связано не только со сложностью самого изучаемого вопроса, но и с его спецификой. Так, крупный ученый в области вяжущих материалов Михаэлис показал, что при исполь-

зовании гидравлических добавок можно повысить стойкость работы бетона на портландцементе в мягких агрессивных водах (этим обоснована стойкая работа гидротехнических сооружений в Риме). Однако это возможно лишь для случая, когда бетон не подвергается многократному попеременному воздействию воды и мороза. Следовательно, область применения гидравлических добавок ограничена довольно узкими пределами, о чем стало известно значительно позже и привело в ряде случаев к неудачам.

Однако это не умаляет целесообразности широкого применения пуццолановых портландцементов там, где это необходимо. И в случае, указанном Михаэлисом, применение пуццолановых цементов дает высокие результаты при выполнении ряда технических требований, в частности, при обеспечении длительного ухода за твердеющим бетоном. Уход за бетонами, приготовленными на пуццолановых цементах, продолжительнее, чем за бетонами на портландцементе. Вопросам надежной работы бетона, например, в морских гидротехнических сооружениях посвящено значительное число монографий [2, 22, 24, 38, 47, 52, 67, 70, 80].

Поскольку растворимость извести во много раз выше, чем $\text{Ca}(\text{OH})_2$ в присутствии пуццолановой (гидравлической) добавки, то можно считать, что бетоны на таких цементах будут надежно работать в морских сооружениях, так как свободная известь вступает во взаимодействие с CO_2 и будет карбонизирована раньше, чем выщелочена. А. А. Байков же считает, что в гидротехническом строительстве не следует применять портландцемент, так как даже из плотных бетонов возможно выщелачивание извести. По теории В. Н. Юнга [80] приготовление плотных бетонов на высококремнеземистых портландцементе обеспечивает долговечную работу гидротехнических сооружений.

Многолетняя эксплуатация гидротехнических сооружений, возведенных на портландцементе с нормированным минералогическим составом, показывает, что бетон высокой плотности при его высокой морозостойкости одновременно стоек и к выщелачивающему действию воды. Утверждения о целесообразности широкого использования пуццолановых цементов, разработанных в итоге многолетних исследований советскими учеными, справедливы. Область применения таких цементов значительна. Следовательно, существовавшая в то время классификация бетонов не исключала ошибок в использовании бетона.

Широко известно, что подбор состава бетона был значительно облегчен и усовершенствован благодаря выявленной в итоге многолетних работ зависимости $R_b = f(B/C)$. Однако использование этой зависимости в практической деятельности без учета важности сохранения не только числового значения, но и оптимизации каждого ее члена приводит к существенным ошибкам. Так, неправильно утверждение специалистов, что по значению B/C можно оценивать другие свойства бетона, например морозостойкость, ползучесть. Неверно утверждать, что указанная зависимость справедлива для любого состава бетона по прошествии некоторого пе-

риода (вылеживания смеси), многократного повторного вибрирования с правильно выбранными интервалами, твердения бетона под пригрузом и т. д. Следовательно, эта зависимость не может быть названа законом водоцементного фактора и является его составным звеном.

Мнение о высокой ползучести и невысокой морозостойкости бетона на шлакопортландцементе также является результатом недостаточно глубокого анализа природы бетонов на различных видах шлакопортландцемента и отсутствия строгих теоретических разработок природы этих свойств. Действительно, опыты, на которых базируются выводы о невысокой морозостойкости бетонов и высокой ползучести в случае применения таких цемента, позволяют это констатировать. Другие опыты показывают, что причиной столь резкого различия в одних и тех же видах испытания является коренное различие в исходных свойствах применяемых шлакопортландцементов. Это, однако, не учитывалось лицами, утверждавшими, что шлакопортландцемент непригоден для приготовления бетонов, например, подвергающихся многократному замораживанию и оттаиванию. Сказанное о составлении классификаций касается любого материала.

Приведенная дифференциация бетона для отдельных наиболее типичных случаев воздействия внешней среды может быть в ряде случаев иной, так как возможно различное сочетание отдельных воздействий. В этом случае бетон назначают с учетом наиболее сильного влияния внешней среды.

В табл. VIII.1 приведена классификация тяжелого бетона по условию долговечной работы. Указанная принципиальная классификация развивается на ряде частных ее дополняющих классификаций (см. § 66). Так, при выборе материалов для бетона, работающего в условиях химической агрессии, должны быть детально классифицированы виды агрессии, а также разнообразные случаи, в которых будет эксплуатироваться конструкция. Такая классификация утверждена нормативным документом СН 249—63 «Инструкция по проектированию. Признаки и нормы агрессивности воды среды для железобетонных и бетонных конструкций».

Процесс формирования структуры цементного камня — связи многочисленных мелких (песка) и крупных (гравия и щебня) зерен заполнителя в бетон — химический процесс со всеми его особенностями. По этой причине и классификация бетонов имеет свой особый характер. Неправильно организованный процесс нельзя изменить, следовательно, в этом случае качество бетона не будет отвечать требованиям проекта.

§ 53. Комплексная марка бетона

Комплексная марка учитывает все условия работы бетона. Первая попытка расширенного представления о марке бетона была сделана автором учебника еще в 1934 г. на строительстве канала им. Москвы [22]. Необходимость расширения представления о мар-

Таблица VIII.1

Условия внешней среды, требующие применения материалов нормированного качества и деления бетона по зонам	Марка бетона (раствора) по прочности	Характеристика материалов при минимально возможном расходе цемента			Комплексная марка бетона (раствора) в конструкции или в зонах сооружения при воздействии		
		цемента	песка	крупного заполнителя	химическом	физическом	механическом
Агрессивные условия отсутствуют Атмосферные реагенты (движение воздуха, осадки, изменение температуры и т. д.) Непрерывное давление воды с различным градиентом напора Непрерывное воздействие водной среды различного солевого состава и воздушной среды различной агрессивности при повышенной температуре Непрерывное воздействие водной среды различного солевого состава при изменении температуры воздуха от любых положительных до любых отрицательных температур Истирание бетона (раствора) в разных климатических условиях и воздействии химических реагентов при борьбе с гололедом	По СНиП II-V.1—62* (2.1* и табл. 1*)	По классификационной таблице в полном соответствии с ГОСТом на цемент	В полном соответствии с ГОСТом на песок	В полном соответствии с ГОСТом на крупный заполнитель	—	—	R_6
					X	A+B+M	R_6
					X	B	R_6
					X	B	R_6
					X	B+M	R_6
					X	B+И+M	R_6

Примечание. Для любых условий службы сооружений бетон должен проектироваться по аналогии с проектированием морозостойких бетонов. R_6 — марка по прочности; М — марка по морозостойкости; X — марка по химической стойкости; А — марка по атмосферной стойкости; В — марка по водонепроницаемости; И — марка по истираемости.

ке бетона связана с систематическим увеличением использования бетона, совершенствованием расчета и проектирования железобетонных конструкций.

Образование в текстуре бетона структурного компонента — цементного камня, протекает неодинаково, что зависит от особенностей цемента и его расхода, качества и количества воды затворения и воды-среды, температуры и относительной влажности воздуха, скорости процесса твердения и ряда других условий. Упрочнение бетона в оптимальных условиях является длительным процессом, резко улучшающим структурные показатели цементного камня, поэтому эти условия и сказанное о различиях в начальной фазе получения структурного компонента в бетоне должны учитываться при его проектировании. В итоге такого учета комплекса условий назначаются компоненты бетона и условия его производства, т. е. проектируется комплексная марка.

Основными условиями проектирования комплексной марки является надежная работа бетона на заданный срок эксплуатации конструкции (сооружения), т. е. ее долговечность. Это положение описывается следующей закономерностью:

$$R_T = kR_n,$$

где R_T — предел прочности бетона, эксплуатирующегося T лет в любых условиях внешней среды; k — коэффициент, больший 1, связывающий прочность бетона через T лет с прочностью бетона после n , а в ряде случаев после 28 сут.; R_n — предел прочности бетона на любой срок, меньшей T лет, а в частности на 28 сут.

Отступление от указанной зависимости, т. е. назначения бетона не по комплексной марке, является признаком неправильного учета условий работы материала. Комплексная марка бетона служит основным критерием его долговечности, фиксирующим наше внимание на особенностях бетона как продукта химической технологии. По этой причине показатель механической прочности бетона нельзя отрывать: 1) от условий его достижения в проектный срок, за который не происходит деструкций в формирующемся цементном камне; 2) условий дальнейшего формирования цементного камня из микробетона Юнга без нарушения стабильности его фазового состава и текстуры бетона.

Главная задача — получение проектной прочности при выполнении ранее указанных условий. Следовательно, определению показателя прочности должно предшествовать детальное рассмотрение условий ее формирования при различных физических и химических воздействиях внешней среды. Эти условия весьма разнообразны. Комплексная марка — это проектная марка, систематически растущая по числовому значению в любых условиях работы бетона, который не требует при эксплуатации никаких условий, так как процессы деструкции в нем не могут протекать в силу особенностей запроектированного состава. Тогда комплекс требований к такому составу можно записать в виде суммы $\Phi + X + П(R)$ [где

$P(R)$ — предел прочности бетона на деформации в условиях разнообразного физического Φ и химического X воздействий внешней среды и процессов формирования структуры цементного камня].

Заметим, что физические и химические условия, воздействующие на бетон, в ряде случаев при проектировании комплексной марки бетона вызывают необходимость применения таких материалов и их соотношения, когда предел прочности бетона будет выше заданной марки прочности. Только при отсутствии агрессивных воздействий внешней среды и возможности возникновения деструкций в текстуре бетона в комплексной марке задается один показатель — прочность. В этом случае возможен подбор состава бетона на любых материалах, обеспечивающих проектную прочность.

§ 54. Прочность бетона

Как следует из анализа эксплуатации бетонных и железобетонных конструкций, ранее сказанное о процессах твердения цемента и комплексной марке позволяет утверждать, что прочность бетона является понятием, не ограничивающимся широко известным представлением о сопротивляемости материала статическим и динамическим внешним силам разных видов, т. е. свойство материала не разрушаться из-за возникающих при этом напряжений. Статические и динамические внешние силы достаточно хорошо можно учесть и с помощью несложных экспериментов определить их воздействие на лабораторных моделях, а также непосредственно в конструкциях; воздействие агрессивных сред на материал не поддается столь же очевидному учету. Тем более усложняется представление о прочности материала и конструкций при совокупном влиянии статических, динамических внешних сил и агрессивных сред. Нельзя забывать, что разрушение материала от напряжений, которые возникают при воздействии внешних сил, относительно точно учитывается путем применения теоретических концепций, связанных с понятием предела прочности материала.

Многочисленные исследования показывают, что привлечение локальных сведений, полученных в лабораторных условиях на сравнительно небольших образцах, и механические расчетные усилия не дают полноценной информации. Одним из методических приемов можно считать выбор таких составов бетона, которые будут стойкими в сооружениях. В этом случае определение прочности бетона значительно упрощается и с надлежащей точностью фиксируется лабораторными испытаниями и расчетом.

Для выяснения поведения бетона в агрессивных средах существуют различные методы испытания. Однако опыт эксплуатации конструкций (сооружений) показывает, что необходимо моделировать самые разнообразные условия работы бетона. Методы и испытания можно совершенствовать только на основе раскрытия закономерностей взаимодействия бетона с окружающей средой, понимания процессов, происходящих в нем, умения выделить главные

факторы, определяющие заданный срок сохранения бетоном конструкций (сооружений) прочности в каждой их зоне, специфической по условиям работы. Здесь надо учесть, что под сроками надежной работы понимается период времени, исчисляемый не материальным, а моральным старением конструкций (сооружений)*.

На данном уровне исследований нужно для всех видов испытания вводить один и тот же критерий — сроки разрушения образцов, а не только тенденцию к снижению их прочности после испытания. Это поможет лучше понять механизм действия разрушающих агентов и от лабораторных испытаний перейти к определению сроков надежной эксплуатации бетона в производственных объектах. Так, морозостойкость фиксируется по снижению прочности против эталона без определения времени, требующегося для полного разрушения. Учитывая значительную трудоемкость и продолжительность испытаний бетонов на воздействие агрессивных сред, некоторое удлинение сроков их испытания за счет доведения образцов до полного разрушения фактически оправдано надежностью рекомендуемых составов бетона.

Особое значение приобретает рассматриваемый вопрос при изготовлении сборного и монолитного массивного бетона и железобетона. В этом случае как сроки получения бетона заданной прочности, так и число марок бетона по прочности на различных стадиях его использования весьма различны и составляют от нескольких часов до одного года.

Действительно, для распалубки конструкции назначается одна марка бетона, затем для ведения строительного процесса другая и, наконец, для осуществления эксплуатационных задач — третья. По этой причине следует рассмотреть вопросы, связанные с условными понятиями: низкая и высокая прочность, медленно- и быстротвердеющие цементы (бетоны, растворы). Но это нельзя рассматривать вне условий использования любых вяжущих. Действительно, сравнивая цементы с разной характеристикой их активности, легко определить, какой из них имеет более высокую прочность, или анализируя кинетику роста прочности цементов с одинаковой или близкой активностью, сказать, какой из них более быстро упрочняется. По указанным признакам цементы и были стандартизированы.

Целесообразно наряду с анализом особенностей той или другой стандартизации рассмотреть указанные понятия в более широком плане, т. е. условия применения цемента в строительстве, где главным показателем будет технико-экономический критерий, соответствие качества цемента требованиям проекта, а не только показатели цементов по стандартной прочности и кинетике ее изменения во времени.

По ГОСТ 10178—62 цементы в зависимости от вида разделены

* Эти сроки исчисляются сотнями, а не десятками лет.

на следующие марки*: 1) шлако- и пуццолановый портландцементы — 200, 300, 400, 500; 2) шлаковый магнезиальный портландцемент — 200, 300, 400; 3) сульфатостойкий пуццолановый портландцемент — 200, 300, 400; 4) сульфатостойкий портландцемент и портландцемент с умеренной экзотермией — 300, 400; 5) портландцемент, пластифицированный и гидрофобный портландцементы — 300, 400, 500, 600.

Указанное перечисление марок подтверждает положение о невозможности оценивать качество цемента только сравнительной марочной прочностью. Однако раньше широко пользовались этим неверным приемом оценки качества цемента. В ряде случаев такой способ оценки качества цемента используется и теперь. По различным стандартным характеристикам цементная промышленность выпускает около 90 видов марок цемента. Естественно, возникает вопрос, нужно ли столько разновидностей цемента. Ответить на этот вопрос можно лишь при осведомленности об условиях использования цемента в строительстве и свойствах цемента.

Перечисленные в ГОСТе виды и марки цемента не дают строителю необходимых сведений о свойствах цемента. Исчерпывающая информация о свойствах цемента может быть сосредоточена только в технических документах — каталогах**. Требования к качеству цемента связаны со всеми стадиями проектирования сооружений, начиная с изысканий, связанных с выбором места строительства, и кончая стадией проектирования организации работ и проектирования бетона, составляющих часть процесса расчета и проектирования конструкций (сооружений). По этой причине, например, недопустимо применение высокопрочного портландцемента в крупных массивах, как и портландцемента М300 в высокопрочных бетонах, что является основным положением в соблюдении принципа соответствия материала условиям его назначения. Следовательно, только с позиций полного соответствия цемента требованиям, предъявляемым к его использованию, строитель должен оценивать понятия низкой и высокой прочности, медленного и быстрого твердения. Однако сказанное об оптимальном соответствии материалов условиям производства работ и эксплуатации бетона (железобетона), как следует из содержания § 5, 6, 7, 47, 48, и оценка качества продукции цементного заводам по затратам труда не соответствует стоимости цемента с указанными различиями.

Действительно, с одной стороны, для получения цементов высоких и низких марок нужны различные затраты материальных ресурсов, а с другой — значительное количество бетона в строительстве, в частности в конструкциях, не подвергающихся агрессивным воздействиям, целесообразно изготавливать на цементах с большей относительной прочностью, обеспечивающих кинетику твердения

* Интересно отметить, что в 1925 г. комиссия при научно-техническом комитете НКПС разработала нормы на цемент, минимальная прочность которого в растворе 1 : 3 через 28 сут. составляла не менее 140 кг/см² (10⁻¹ МПа).

** В рассматриваемом случае — каталог или список свойств цементов каждого цементного завода с указанием его названия и состава.

до заданной марочной прочности бетона. Следует также иметь в виду, что к цементам высоких марок всегда целесообразно добавлять мелкомолотые минеральные добавки, что позволяет из одной тонны клинкера производить значительно больше цемента соответствующего вида и марки (§ 5—7).

Итак, понятие о цементах, связанное с представлением об их качестве, например, только по сравнительной оценке прочности, не должно использоваться в практике строительных работ, так как оно не отвечает широкому представлению о качестве цемента, которое всегда многообразно и обязательно связано с условиями приготовления и использования цемента в строительстве. Строитель, как правило, всегда связывает понятие прочности с представлением о стойкой работе конструкции (сооружения), с быстротой получения бетона проектной марки, а во многих случаях и с получением возможно быстрее необходимых по ходу работ промежуточных марок бетона, обеспечивающих возможность снятия опалубки, передачи собственной массы конструкции на материал, перевозки элементов, деталей, изделий и конструкций из сборного бетона (железобетона).

Рассмотрим детальнее ряд вопросов, возникших при изложении этой задачи:

1. Основные причины приготовления разнообразных видо-марок цемента. В табл. VIII.2 приведены показатели прочности бетонов при сжатии, которые применялись при производстве бетонных работ. Указанные даты использования тех или других марок бетона не связаны со сроками введения этих марок.

В соответствии с нормативными документами появились рекомендации, необходимые для выполнения работ: 1) в 1934 г. при использовании общих нормативных рекомендаций по назначению марок, например, на строительстве канала им. Москвы были введены для применяемых марок бетона по прочности индексы, в которых формулировались дополнительные требования к качеству бетона (+М — по морозостойкости, +В — по водонепроницаемости); 2) в 1950 г. для изготовления предварительно напряженного железобетона рекомендовано область применяемых марок ограничить М300—600; 3) в 1957 г. по СН 10—57 область использования бетона ограничивалась М200—600, более низкие М100 и 150 разрешалось применять при специальном обосновании; в 1970 г. (СНиП II-B.1—62)* дан ряд указаний, а именно: как правило, не допускаются марки бетона ниже М150 при проектировании железобетонных конструкций; при напрягаемой арматуре не допускается бетон ниже М200; для конструкций, подлежащих расчету на выносливость, не рекомендуется бетон ниже М200; для бетонных конструкций не следует применять бетон выше М300; для конструкций, работающих в условиях попеременного замораживания и оттаива-

* Так как по мере развития легкого бетона в технических документах появились указания о проектных марках и для этого бетона, в таблице оговаривается, что указанные марки распространяются и на тяжелый бетон.

Показатели предела прочности тяжелых бетонов* при сжатии ($R_{сж}$), кг/см² (10^{-1} МПа)

1905 * г.	1905—1910 * г.	1920— 1930 г.	1934 г.	1938 г.	1950 г.	1958 г.	1963 г.	1970 ** г.
Не менее 150 (пластичные смеси для железобетона)	67—167 (1:10)	45	45	50	50	100	100	100
46—311 (пластичные смеси)	85—237 (1:8)	55	90	70	75	150	150	150
50—400 (жесткие смеси)	108:222 (1:6)	90	110	90	100	200	200	200
	106:310 (1:5)	110	130	110	150	300	300	300
	126:382 (1:4)	130	150	140	200	400	400	400
	170:366 (1:3)	170	170	170	250	500	500	500
	250:419 (1:2,5)	210	210	200	300	600	600	600
			250	250	400			
			300	300	500			
			350	350	600			

* В графах показаны номинальные составы бетона и пределы колебания марок для бетона, изготовленного на смесях различной пластичности-жесткости. За период 1905—1910 гг. показатели прочности относятся к образцам размером 30×30×30 см, следовательно, для сравнения с прочностью стандартных образцов их показатели надо увеличить на 10%.

** При соответствующем обосновании разрешается применять бетоны более высоких марок, если их расчетные сопротивления и другие характеристики будут соответствовать указаниям нормативных документов.

ния, требуется устанавливать не только марку по прочности, но и по морозостойкости. Существует ряд других требований, из которых одно имеет непосредственное отношение к особенностям роста прочности бетона — необходимость устанавливать проектные марки не только на 28 сут. твердения, но и на иные сроки, что должно быть специально обосновано. В нормах СССР от 1931 г. марки бетона назначались на сроки 28 сут. (для бетонов с меньшим содержанием воды — из жестких смесей) и 42 сут. (для бетонов с большим содержанием воды — из литых смесей). Автор преследовал цель показать причину возникновения большого числа видов марок цемента, а не информировать изучающего технологию бетона о существе и разнообразии различных норм. Из приведенных сведений следует, что систематически, из года в год, совершенствовались знания в области технологии бетонов и химии силикатов. Следовательно, проектировщики бетонных (железобетонных) конструкций, связанные с развитием науки о бетоне, формировали более точные требования к материалу — бетону и цементу.

По нормам 1931 г., применяемым в СССР, максимальная марка бетона составляла 210 кг/см² (10^{-1} МПа). В ряде стран нормировалось применение бетонов из жестких и литых смесей, а также из смесей, поддающихся трамбованию, и не указано об использовании пластичных смесей. Приведенные в табл. VIII.2 расходы цемента не связаны с активностью цемента, так же как нет дифференцирования составов бетона по условиям работы. Только в отдельных нормах дано указание о расходах цемента с учетом работы

бетона в сухих и влажных условиях. В нормах СССР 1931 г. указано о подборе состава бетона для сборного железобетона и сроках, связанных со спецификой их изготовления и монтажа. В табл. VIII.3 приведены сведения из СНиП II-B.1—62 (Бетонные и железобетонные конструкции. Нормы проектирования). Простое сравнение технических рекомендаций, содержащихся в табл. VIII.2 и VIII.3, позволяют отметить значительные различия в состоянии науки и технологии бетона.

Действительно, в последних нормах появились не только значительно более высокие марки бетона 500 и 600 кг/см² (10⁻¹ МПа) (в ряде случаев и марки по пределу прочности на растяжение, в частности, для дорожного бетона по ГОСТ 8424—72 и по пределу

Т а б л и ц а VIII.3

Проектные марки тяжелого бетона по прочности при сжатии после 28 сут. твердения, кг/см ² (10 ⁻¹ МПа)	Применение бетона	Примечания
100	В бетонных, а также в массивных железобетонных конструкциях с конструктивным армированием	Обязательна защита арматуры от коррозии
150	В железобетонных конструкциях различного назначения	Не следует применять в конструкциях, подлежащих расчету на выносливость
200	В железобетонных конструкциях, в том числе напряженных со стержневой арматурой периодического профиля без анкеров	Применяется для арматуры $d=10—18$ мм классов А-III, А-IIIB, А-IIIB, А-IV, А-IV
300	В железобетонных конструкциях, в том числе напряженных с проволочной арматурой	Применяется с высокопрочной гладкой арматурной проволокой (класса II) с анкерами и высокопрочной арматурной проволокой $d=5$ мм периодического профиля (класса Вр-II) без анкеров
400	В железобетонных конструкциях, в том числе напряженных	В особо агрессивных условиях работ при назначении специальных составов цемента
500 и 600	В высокопрочном железобетоне по расчету	

Примечания: 1. При назначении марки бетона по прочности обязательно проверяют условия работы конструкции (сооружения) для обеспечения ее надежной (долговечной) службы. Если требуется, определяют морозостойкость, химическую стойкость, водонепроницаемость, деформативность, истираемость, тепловыделение и др.

2. Надо иметь в виду, что для обеспечения требований п. 1 существуют различные виды цементов, которые должны применяться в соответствии с СН 249—63 «Нормы и технические условия для определения агрессивности воды-среды для железобетонных и бетонных конструкций» и аналогичные им технические условия для расчета других характеристик бетона».

3. Эталонный образец-куб ребром 20 см.

4. В ряде случаев устанавливают марки бетона по растяжению и другим механическим свойствам.

прочности на растяжение при изгибе), но и комплекс требований, обеспечивающий: выносливость конструкций, находящихся под воздействием многократно повторяющейся подвижной или пульсирующей нагрузки (например, железобетонных шпал), строго ограниченный предел деформирования конструкций, обеспечивающий надежность их эксплуатации, а также трещиностойкость, морозостойкость, химическую стойкость и другие свойства, без наличия которых недопустимо изготовление бетона. Развитие нормативных требований к бетону непосредственно связано не только с совершенствованием знаний в данной области, но и в увеличении применения железобетона, исключительно долговечного и универсального материала.

Дальнейшее совершенствование указанной классификации, которая должна базироваться на классификации проектируемых конструкций, с учетом различных факторов их эксплуатации, позволит не только сократить число видов и марок цемента, но и на более глубокой научной основе их изучения должно помочь дальнейшему совершенствованию свойств цементов.

Взгляды строителей на технические требования к цементу формировались на отечественном и зарубежном опыте использования цемента в строительстве. Критическое отношение к отдельным видам и маркам цемента выразилось в разработке большого числа ведомственных технических условий. Так, в 1935 г. появились технические требования к пуццолановым цементам, пуццоланизируемым непосредственно на строительных площадках, что было связано с недостаточным количеством цемента в стране, в частности именно пуццоланового цемента, и одновременным производством работ на строительстве московского метрополитена и гидротехнических сооружений канала им. Москвы. Вслед за этим были разработаны требования на низкомарочные многокомпонентные цементы (в частности, на песчано-пуццолановый портландцемент для гидротехнического строительства), магнезиальный портландцемент, цемент с подобранным минералогическим составом для гидротехнического массивного бетона, дорожный и сульфатостойкий портландцемент, пластифицированные и гидрофобные цементы и многие другие сорта, виды и марки цементов.

В табл. X.5 показано назначение вида цемента с учетом внешних климатических условий. Данные таблицы разработаны автором учебника на основе предложенного им на строительстве канала им. Москвы принципа деления сооружений (конструкций) по зонам их работы и назначении в соответствии с этим зональной марки бетона. Из таблиц следует, что нужно изготавливать цементы с относительно невысокой и высокой прочностью. Важно знать, какие и сколько цементов надо изготавливать.

2. Цементы с относительно невысокой прочностью. Величина прочности цемента и скорость ее нарастания до стандартного срока в 28 сут. в основном зависит: от петрографического состава цемента (сюда входят минералогический состав цемента, особенности построения и взаимного расположения минералов); количества гипса;

Таблица VIII.4

Марка цемента	Стоимость 1 т цемента, руб.			Коэффициент эффективности цемента	Стоимость цемента в пересчете на М400, руб.
	оптовая цена по прейскуранту	внутренние перевозки и хранение	полная стоимость на стройке		
200	88	20	108	0,63	171
250	100	20	120	0,74	162
300	111	20	131	0,83	158
400	127	20	147	1,00	147
500	143	20	163	1,17	139
600	161	20	181	1,31	138

гранулометрии цемента; свежести поверхности его зерен и степени их агрегирования; наличия в цементе вполне определенного количества минеральных мелкомолотых добавок, вступающих и не вступающих в химическую связь с минералами цемента.

Влияние мелкомолотых минеральных добавок на прочность цемента необходимо связывать со взаимной гранулометрией цемента и добавок, а не только с их количеством. Сказанное о причинах получения цементов с более низкими прочностями, в первую очередь, связано с качеством сырья и топлива, особенностями оборудования заводов. Основным направлением в производстве цемента является получение цементного клинкера возможно более высоких марок. На хорошо оснащенных цементных заводах большой мощности, оборудованных новейшими агрегатами, при наличии сырья требуемого качества разница в себестоимости цементов низкой и высокой марок весьма незначительна (табл. VII.4). (З. И. Логинов. Цементная промышленность СССР и перспективы ее развития. Госпланиздат, 1960.)

При прочих равных условиях расход цемента высокой марки будет меньшим, чем цемента низкой марки. По этой причине стоимость бетона также снижается. Следует учитывать, что применение низкомарочных цементов вызывает значительное увеличение затрат на дополнительные перевозки. Однако ряд конструкций требует применения цемента с низким тепловыделением, что аналогично применению цемента с относительно меньшей прочностью. Как известно, в чисто клинкерном цементе при прочих равных условиях высокая прочность связана с большим содержанием минерала алита и меньшим минерала белита, более тонким помолом и наличием оптимального количества гипса. Изменение предела прочности цемента в зависимости от наличия мелкомолотых добавок трепела (гидравлической добавки) и кварцевого песка показано на рис. VIII.1 и в табл. VIII.5. Для каждого цементного завода известны возможности выпуска оптимальной наиболее высокой марки цемента. Вне такой ориентировки неверно было бы устанавливать общую марку для всей промышленности.

Пути получения цементов различных видов и свойств, после при-

готовления клинкера заданного состава, должны обеспечиваться организацией локальных помольных установок. В этом случае резко снижается потеря цемента от распыла, доходящего до 10%, при транспортировании с цементного завода на бетоносмесительную установку, создается исключительная гибкость в работе на цементах необходимых свойств, лучше сохраняется активность цемента, перевозимого в виде клинкера, упрощаются условия его перевозки на любом виде транспорта без защиты от атмосферных осадков, исключительно просто решается хранение клинкера на любой срок в открытых складах, улучшается степень измельчения цемента при применении мокрого помола, появляется возможность широко использовать местные минеральные материалы (горные породы и

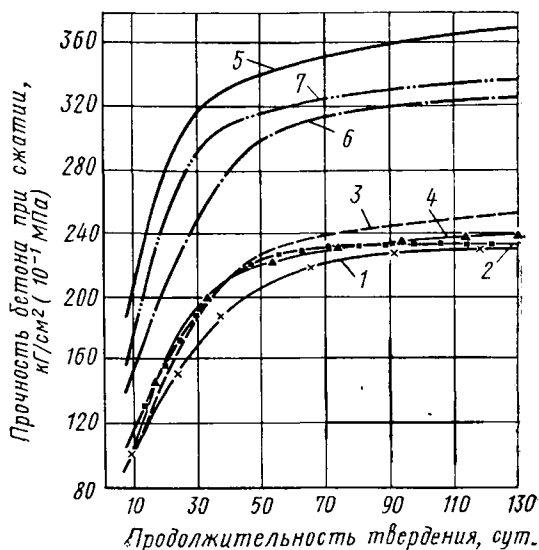


Рис. VIII.1. График изменения прочности гидротехнических цементов (цифрами обозначены серии)

Т а б л и ц а VIII.5

№ серии (см. рис. VIII.1)	Состав смешанного цемента, %			Содержание портланд- цемента в 1 м³ бетона, кг
	цемент	трепел	молотый песок	
1	60	15	25	180
2	60	20	20	180
3	60	25	15	180
4	60	—	—	180
5	100	—	—	300
6	80	20	—	240
7	80	—	20	240

побочные продукты различного производства), повышается производительность помольных установок по сравнению с технологией сухого помола.

В этом случае целесообразно использовать клинкер необходимого состава, позволяющий получать при помоле без добавок цемент наиболее высокой прочности из возможных при существующих на заводах технологиях. Сказанное подтверждается опытом

приготовления цемента по сухой технологии помола с минеральными добавками, обеспечивающими более низкую экзотермию, высокую химическую стойкость.

Указанное перспективное направление в технологии приготовления цемента различных свойств обеспечивает высокие технико-экономические показатели применения цемента. Существующий порядок отгрузки горячих цемента без их предварительного выдерживания в силосах цементных заводов усложняет работу на

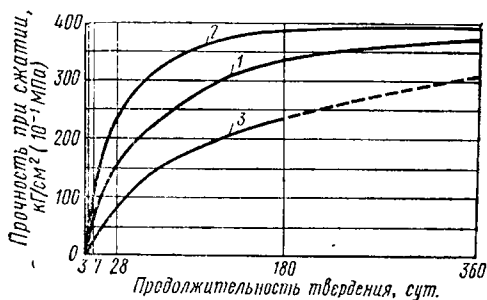


Рис. VIII.2. Зависимость прочности бетона от продолжительности твердения для растворов пластичной консистенции состава 1 : 3 на цементах:

1 — белитовом (24% C_3S , 50% C_2S , 8% C_3A , 14% C_4AF); 2 — алитовом (57% C_3S , 19% C_2S , 6% C_3A , 15% C_4AF); 3 — грубой фракции (около 55% C_3S , 20% C_2S , 6% C_3A , 19% C_4AF)

строительстве и ведет к снижению активности цемента. Для снижения температуры цемента заводы постепенно оборудуются соответствующими приспособлениями. Однако на цементных заводах нецелесообразно устраивать промежуточные емкости перед отгрузкой цемента на строительные предприятия. Следовательно, необходимый объем емкостей под поступающий цемент должен быть построен на предприятиях с учетом получения цемента разных видов и марок (рис. VIII.2).

3. Цементы с высокой прочностью. Резкий рост выпуска сборного железобетона неразрывно связан с производством цемента, быстро твердеющих в любых условиях (при нормальной температуре внешней среды и при повышенной температуре, например, при пропаривании). При этом важно за минимальный срок получить бетон не только необходимой прочности, но и с другими заданными в проекте техническими свойствами. Надо помнить, что ускоренные методы твердения бетона не должны вызывать снижения проектных свойств. Последнее обстоятельство во многих случаях недостаточно учитывается, так как существует взгляд, будто многие свойства бетона можно определить по показателю прочности. Этот взгляд противоречит теоретическим положениям из области образования структур цементного камня и многочисленным опытам с бетоном [12, 16, 61, 62, 71, 73, 74 и др.].

Понятие быстротвердеющий связано с получением цемента высокой прочности в короткие сроки твердения. Для оценки качества цемента на 28 сут. эти понятия неразделимы, если придерживаться стандартных сроков оценки прочности. Если же эта оценка связана с длительными сроками твердения, то понятие о цементах низкой прочности (приготовленных без добавок с более

крупными зернами или с большим содержанием минерала C_2S при примерно равных соотношениях воды и цемента) требуется изменить, ибо все портландцементы окажутся близкими по прочности. По этой причине высокопрочные цементы — это быстротвердеющие цементы.

Таблица VIII.6

s, см²/г	Предел прочности при сжатии, кг/см² (10 ⁻¹ МПа)									
	Трамбованные образцы					Пластичные образцы				
	Продолжительность твердения, сут.									
	1	3	7	28	90	1	3	7	28	90
5850	483	547	666	785	1007	267	428	505	639	—
7010	394	599	681	929	—	—	319	477	695	793

В последнее время появилось понятие особо быстротвердеющие цементы (ОБТЦ). Оно связано со сравнительной оценкой прочности цементов в первые сроки твердения через 1—3 сут. после затворения бетонных (растворных) смесей. В табл. VIII.6, а ранее в табл. VII.4 приведены данные, показывающие скорость твердения ряда цементов. При этом ни один из видов портландцемента по скорости нарастания прочности не может считаться равноценным глиноземистому цементу. Наличие в стандартах различных стран мира сроков испытания прочности через 24 и 72 ч твердения, как и для глиноземистых цементов, — показатель сложности получения быстротвердеющих цементов высокой прочности на базе портландцементного клинкера.

Технико-экономический анализ сборного железобетона показывает, что его значительное удорожание по сравнению с монолитным железобетоном связано с необходимостью применения значительного количества металлических форм и тепловой обработки, не только снижающей качество бетона, но и вызывающей перерасход цемента. Следовательно, быстротвердеющий портландцемент позволяет отказаться от пропаривания сборного железобетона, готовить бетон с теми же расходами цемента, что и при монолитном железобетоне, и увеличить оборачиваемость форм. Однако портландцементы имеют свои характерные особенности твердения (см. § 4,8), что создает препятствия для более быстрого упрочнения цементного камня.

Высокую прочность бетон должен набирать за первые сутки твердения цемента с достаточно большим содержанием воды ввиду отсутствия средств для уплотнения жестких смесей. А как следует из § 11, за указанный срок в реакцию гидролиза и гидратации вступает относительно незначительная часть цемента. Это общеизвестное положение в равной степени относится ко всем портландцементам, что видно из табл. VIII.6. В стандартных условиях це-

менты любых марок (вплоть до марки 900) твердеют и медленно и неполноценно. Отношение прочности в возрасте 1 или 3 сут. к прочности в возрасте 28 сут. хотя и колеблется в довольно значительных пределах — от 0,15 до 0,55, однако не может удовлетворить специалиста, так как для отпуска изделий требуются большие значения этих отношений — от 0,7 до 1. Из сравнения роста прочности бетона на цементе повышенного качества с ростом прочности бетона при пропаривании за меньший период времени на цементе с меньшей прочностью видно, что еще не решена задача приготовления большого количества сборного железобетона без ускорения твердения приемами тепловлажностной обработки. Однако при констатации возможностей ускорения твердения бетона этим методом нельзя игнорировать факт снижения качества бетона и недоиспользования той прочности, которая получается в конечном результате при длительном твердении у бетонов в нормальных условиях твердения. По-видимому, качество быстротвердеющих цементов нужно оценивать по двум характеристикам при двух режимах твердения — нормальном и ускоренном: по коэффициенту

$$k_1 = R_1/R_{28} \text{ или } k_2 = R_3/R_{28},$$

а также $k_{n1} = R_{np}/R_{28}$

и показателю его морозостойкости после пропаривания

$$k_{n2} = R_{np}/R_n,$$

где R_1 , R_3 , R_{28} — соответственно пределы прочности бетона при сжатии через 1, 3 и 28 сут.; R_{np} — предел прочности бетона при сжатии после пропаривания; R_n — после твердения в нормальных условиях не меньше 1 года.

Характеристика морозостойкости после пропаривания позволит правильно оценить особенность деструктивных процессов, вызванных ускоренным режимом твердения. Из сравнения ряда значений коэффициента k видно, как быстро твердеет цемент в нормальных условиях, при пропаривании и длительное время после пропаривания в разных составах бетона.

Быстротвердеющие цементы не позволяют решать вопрос о быстром наборе прочности для большинства марок бетона, применяемого для изготовления сборного железобетона, а пропаривание снижает качество бетона и, кроме усложнения работ, вызывает значительный перерасход цемента, поэтому необходимо рассмотреть и другие виды цемента, с помощью которых можно улучшить технологию изготовления сборного железобетона с ускорением твердения. Естественно, в этой технологии фактором, определяющим возможность ее успешного применения, являются свойства цемента твердеть при повышенных температурах без той деструкции, которая появляется при организации структур цементного камня на портландцементных.

Для осуществления этого положения надо определить причины деструкции. Считается, что деструкцию в цементном камне вызывают испарение воды, различное расширение каменных материа-

лов и формирующегося цементного камня, расширение в формирующемся цементном камне паровоздушной смеси и особенности формирования в нем извести, выделяющейся при гидролизе и гидратации из минерала алита. Перечисленные причины заслуживают проверки и оценки степени их влияния на формирование структуры цементного камня.

Опыт показывает, что при пропаривании бетона на шлакопортландцементе высокого качества (например, М400 и выше), прочность бетона систематически растет и после пропаривания она может сравниться с прочностью бетона того же состава, твердеющего длительное время при высокой (100%) относительной влажности. Из этого следует, что не все из ранее перечисленных причин вызывают деструкцию цементного камня в бетонах на портландцементе. На термограмме (см. рис. 1.6) показано, как влияет на состав цементного камня присутствие минералов порошка гранулированного доменного шлака. Известно, что растворимость извести, выделяющейся при гидролизе и гидратации портландцемента из минерала C_3S при реакции $3CaO \cdot SiO_2 + aq = nCaO \cdot SiO_2 \cdot mH_2O + Ca(OH)_2$ (см. § 8) уменьшается с повышением температуры воды. В то же время количество выделяющейся извести увеличивается с повышением температуры воды (бетона) и длительности пропаривания (или твердения бетона при повышенной температуре).

Поэтому можно считать, что по мере пропаривания бетона из воды, химически не связанной с минералами портландцемента из-за пересыщения известкового раствора, кристаллическая известь будет постепенно выпадать в осадок. Другой опыт показывает, что при насыщении свежесформованных бетонных образцов водой под вакуумом и при их последующем пропаривании прочность не уменьшается по сравнению с образцами, содержащими то количество воды, которое задано при приготовлении. Следовательно, ранее сказанное о влиянии испаряющейся воды, как и различия в степени изменения объема при нагревании каменных материалов и цементного камня, не является основной причиной снижения прочности и других свойств пропаренных бетонов. Анализ большого количества опытов, проведенных в разное время на разных цементах, позволяет высказать мнение, что решающими факторами в процессе деструкции твердеющего бетона следует считать воздух, находящийся в свежесформованном бетоне, и кристаллизацию извести.

В табл. VIII.7—VIII.9 приведены показатели прочности бетонов различных составов на одном и том же портландцементе и шлакопортландцементе (кроме табл. VIII.9), твердеющих в условиях пропаривания. Это позволяет сделать вывод, что нельзя говорить о медленно- или быстротвердеющих цементах, если анализировать это качество только по стандартной методике.

Следовательно, стандартные методы испытания должны соответствовать технологии производства, которая сама должна в максимальной степени использовать свойства таких цементах. Однако стандарты до сих пор составляются на основе иных принципов, которые в случае применения цемента только для твердения при

Таблица VIII.7

Содержание в 1 м ³ бетона, кг		Предел прочности образцов, кг/см ² (10 ⁻¹ МПа)							Отношение $\frac{R_{1пр}^*}{R_{28н.т}}$
		Нормальное твердение, сут.			Пропаривание				
					ч	сут.			
цемента	воды	3	7	28	1-2	3	7	28	
460	135	403	550	565	528	—	—	525	0,93
450	160	—	—	483	417	—	—	517	0,86
450	170	—	—	427	343	—	—	570	0,81
450	190	278	351	375	268	339	339	390	0,71

* Здесь $R_{1пр}$ — предел прочности образцов через 1 сут. после пропаривания; $R_{28н.т}$ — то же, через 28 сут. нормального твердения.

Примечание. В опытах применен портландцемент М500 (по ГОСТ 970—61).

стандартных температурах и ниже их позволяют оценивать качество цемента, а для повышенных температур не отвечают своему назначению. По этой причине у строителей создаются неверные представления о действительном качестве цемента, поэтому следует создать на этот цемент ГОСТ, учитывающий условия ускоренного твердения цемента.

Таблица VIII.8

Содержание в 1 м³ бетона, кг		Пластичность- жесткость смесей		Режим пропаривания *		Предел прочности при сжатии, кг/см² (10 ⁻¹ МПа), при продолжительности твердения после пропаривания, сут.			
цемента	воды			продолжи- тельность, ч	темпера- тура, °С	1	3	7	28
275	160	4	36	0+2+6+0	100	129	175	163	200
380	152	12		0+2+5+0	100	284	313	358	427
300	152			2+3+6+4	90	160	179	208	256
475	160		2+3+6+4	90	336	375	388	486	

* Первая цифра — продолжительность выдержки до пропаривания, вторая — продолжительность подъема температуры, третья — период изотермического прогрева, четвертая — период снижения температуры.

Примечание. Испытывались бетонные образцы-кубы с ребром 10 см на шлакопортландцементе с 70% тонкомолотого гранулированного шлака.

Надо отметить, что показателями оптимальных условий твердения и при применении пропаривания бетонов на шлакопортландцементе также служат не только прочности образцов, но и любые технические свойства: ползучесть, виброползучесть, морозостойкость, водонепроницаемость, усадка и др. Как прочность, так и другие свойства бетона становятся значительно выше *. Существуют

* Понятие повышения свойств означает повышение морозостойкости и возможность регулирования в необходимом направлении и числом значений ползучести, водонепроницаемости, виброползучести и т. д.

Таблица VIII.9

Содержание в 1 м ³ бетона, кг				В/Ц	Пластич- ность-жест- кость		Предел прочности при сжатии, кг/см ² (10 ⁻¹ МПа)					
цемента	песка	щебня	Нормальное твердение, сут.				Режим пропаривания					
							2+3+6+4		0+3+5+2			
							после про- паривания	28 сут.	после про- паривания	28 сут.		
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
300(1)	190	720	1226	0,64	72	—	—	204	160	256	113	228
300(2)	190	720	1226	0,64	8	—	53	268	161	304	131	183
405(1)	165	604	1226	0,41	—	45	—	358	270	358	236	338
405(2)	165	604	1226	0,41	—	55	109	462	310	445	224	304

П р и м е ч а н и я: 1. Температура изотермического прогрева 95° С. 2. Выдержка до пропаривания при изотермическом прогреве в течение 5 ч отсутствовала, а при 6 — равна 2 ч. 3. В опытах использованы цемент 1 и 2.

диаметрально противоположные представления о шлакопортландцементе — одни его относят к медленно твердеющему вяжущему с относительно невысокой прочностью, что не позволяет получить бетон высокой морозостойкости и низкой ползучести, другие его считают быстротвердеющим высокопрочным вяжущим, с помощью которого можно изготовить бетон высокой морозостойкости и низкой ползучести. В любой исследовательской работе должна быть полная информация о качестве материалов, применяемых в исследовании. Исследования, которые определили шлакопортландцемент как малоактивный материал, не дают исчерпывающих данных о его качестве, поэтому нельзя считать эти исследования убедительными для вынесения объективных суждений о шлакопортландцементе. Ссылка на марку использованного цемента в определенной мере позволяет считать его цементом с низкой активностью. Следовательно, гранулированный молотый шлак с недостаточной тонкостью измельчения не обеспечит надлежащей активизации как компонент шлакопортландцемента (§ 13).

Правильнее шлакопортландцементы разделять на две группы: собственно шлакопортландцементы, когда проявляется активное участие в процессах гидратации шлака, и смешанные цементы, когда этот процесс проходит в незначительной части шлака. Большая его часть остается в цементном камне в виде наполнителя. Следовательно, не количество шлака определяет прочность бетона, так же как и скорость его твердения, а его качество. Понятие о качестве нельзя ограничивать, как об этом было сказано в § 6, показателем его минералогического и петрографического составов. Многочисленные работы в области изучения шлакопортландцементов подтвердили сказанное о том, что высокая дисперсность цемента и количество шлака в шлакопортландцементе позволяют делить цементы на указанные две группы, что хорошо видно из табл. VIII.10.

Состав цемента	s, см ² /г	Состав бетона ***, кг/м ³				С. с. б., %	Режим пропаривания		Испытание на морозо- стойкость, циклы	Внешнее состояние, баллов **
		цемент	вода	песок	щебень		продолжительность, ч	температура, °C		
Шлакопортланд- цемент:										
30% клинкера Ба- лаклейского заво- да и 70% шлака Алмазьянского за- вода	4000	405	145	604	1226	0,25	4+3+6+4*** и далее стан- дартное тверде- ние около 280 сут.	90	>1881	7—8
То же	4000	405	145	604	1226	0,25	Стандартное твердение около 280 сут.	—	>601	4—5
Быстротвердеющий шлакопортландцемент:	4000	400	149	600	1300	0,25	4+3+6+4*** и далее стан- дартное тверде- ние около 280 сут.	90	239*	3
70% клинкера Ба- лаклейского заво- да и 30% шлака Алмазьянского за- вода										
То же	4000	400	149	600	1300	0,25	Стандартное твердение около 280 сут.	—	>1861	7

* Сняты с испытания в условиях Кольского залива.

** По 10-балльной шкале.

*** Образцы размером 10×10×10 см

§ 55. Технические свойства бетона

Технические свойства бетона изучены с различной степенью полноты. Некоторые свойства нормированы и оцениваются по шкале марок (см. § 67). Так, водонепроницаемость бетона характеризуется по ГОСТу четырьмя марками: В-2, В-4, В-6, В-8. Другие свойства не имеют обоснованных стандартных методов испытания: усадки, ползучести, химической стойкости и т. д. Для определения качества бетона исключительно важное значение имеет свежесть цемента. Рассмотрим это положение.

Неучет состояния цемента может привести к получению бетона со случайными свойствами. Использование материалов с отклонениями от нормативных требований может не только значительно снизить качество бетона, но и в некоторых случаях привести к катастрофическим последствиям. В последний период широко применяется метод ускоренного твердения бетона и производство бетонных работ при отрицательных температурах с введением в смесь

разнообразных ПАВ и электролитов. Использование цемента с корродированной поверхностью не только резко снижает эффект их действия, но при определенных условиях может затормозить процесс твердения на длительный срок, снизить морозостойкость и другие свойства бетона. Тепловлажностная обработка бетонов на лежалых цементах не устраняет дефект. В бетонах, прошедших такую обработку, резко снижается морозостойкость, повышается водонепроницаемость, усадка, изменяется ползучесть. Поэтому цемент должен быть свежим, что достигается его применением в дело вслед за помолом или путем защиты поверхности его зерен (например, путем введения гидрофобизирующих добавок при помоле клинкера, см. § 47).

Сложность определения свойств бетона заключается в том, что он с течением времени упрочняется, поэтому с надлежащей точностью нельзя оценить воздействие на него агрессивных сред. Это обстоятельство нашло свое отражение во многих работах при изучении морозостойкости бетонов (растворов), когда при последующих циклах замораживания и оттаивания образцы даже сравнительно невысокой морозостойкости показывали большую прочность. Сказанное всегда надо учитывать при изучении любых свойств бетона (раствора).

Свойства бетона тесно связаны, однако эта связь сложная. Следует предположить наличие закономерной причинной связи, основанной на многообразии процесса образования технического камня (цементного камня, раствора, бетона). Для примера можно указать на связь между морозостойкостью и водонепроницаемостью: бетоны с неограниченно высокой морозостойкостью обладают высокой водонепроницаемостью, но не все бетоны с высокой водонепроницаемостью будут иметь высокую морозостойкость. Такой связи разных свойств столько, сколько существует комбинаций из них (см. § 65).

При одном и том же численном составе компонентов, на цементах одной марки по прочности и одном петрографическом составе заполнителей свойства бетона будут неодинаковыми. По этой причине состав бетона принято подбирать по массе составляющих его частей и сопровождать его точными характеристиками последних. Опыт показывает, что целесообразно производить две записи состава бетона: одну обычную запись исходных материалов до смешивания и уплотнения, другую — дифференцированную запись компонентов бетона после его твердения — образования текстуры. Точность в определении дифференцированного состава бетона — ключ для определения его технических свойств.

Формула записи состава бетона по составляющим его материалам: цемент + вода + песок + гравий (щебень) на определенной стадии его упрочнения будет иной: цементное тесто + цементный камень + свободная вода + диспергированный контракционный воздух + недиспергированный воздух + песок + гравий (щебень). Это означает, что после приготовления бетонной смеси одна часть воды задерживается в цементном тесте, а другая (что связано с качест-

вом цемента и рассмотрено в § 9) отделяется от него и остается физически свободной. При длительном формировании цементного камня в ходе процесса контракции воздух, находящийся в цементном тесте как пятый компонент бетонной смеси, диспергируется и попадает в образующиеся контракционные полости (см. § 11); оставшаяся не связанная этим процессом часть воздуха распределяется в текстуре бетона. Количество свободной воды и свободного воздуха в разных составах бетона различно, что зависит от природы материалов и состава бетона.

Чем больше воздуха попадает в процесс его диспергирования в связи с контракцией цемента, тем выше морозостойкость и ряд других свойств. Также можно утверждать, что количество свободной воды должно быть минимальным и она из цементного теста должна выделяться в текстуру бетона. Идеальный случай высококачественного бетона — это отсутствие свободной несвязанной воды и воздуха в текстуре бетона, а следовательно, и в структуре цементного камня. Подбор бетона с высокими техническими свойствами в первую очередь связан с указанными положениями. Количественные показатели такой оценки качества бетона требуют дальнейшей систематической работы. Отметим, что количество свободной воды в смеси определяет особенности ее формирования (см. § 42, 45).

§ 56. Определение количества воды в бетоне

Ранее было сказано, что вода обеспечивает процесс твердения цемента и создает условия, когда из рыхлой смеси при существующих приемах ее уплотнения удастся приготовить условно плотный бетон. Понятие условно плотного бетона вводится по той причине, что бетон — псевдотвердое тело. Это легко подтвердить расчетами. Однако если количество химически связанной воды даже для цементов с разным химико-минералогическим составом достаточно типично для разных составов бетона, то количество воды, приходящейся на чисто технологические цели, исключительно разнообразно. Это вызывается очень большим различием в конструкциях (сооружениях), применяемых в строительном производстве, а следовательно, и разнообразии смесей для бетона последних.

Следует помнить, что та часть воды, которая определяется технологическими требованиями к получению бетонных (растворных) смесей необходимой пластичности-жесткости, прямым образом влияет не только на технические свойства бетона (раствора), но и на качество контакта между бетоном и арматурой в железобетоне. Нормативные величины сцепления (контакта) бетона (раствора) и арматуры фактически относятся лишь к частичному сцеплению поверхности арматуры.

При соблюдении ряда условий, в первую очередь, вызывающих уменьшение в бетоне содержания свободной воды, возрастает сцепление арматуры с бетоном, что следует из опытов по определению морозостойкости, водонепроницаемости и других свойств железобетона. Эти показатели становятся значительно выше. Сказанное

о снижении содержания свободной воды в текстуре бетона предполагает сравнение бетонов на таких цементах, в которых количество связанной воды в цементном камне-тесте не увеличивается, например, путем применения пуццолановых цементах. Так, при содержании в пуццолановом цементе даже 20% трепела от цементного теста отделяется воды в 3 раза меньше при В/Ц-0,4 и примерно в 2 раза меньше при В/Ц-0,6 (по сравнению с исходным портландцементом).

Приемы, обеспечивающие получение бетона с минимально возможным содержанием свободной воды, являются комплексными и рассматриваются в § 13, 20, 23, 29, 47, 73, 77. Неверно рассматривать этот вопрос вне процесса конструирования. Опыт показывает, что при конструировании распределение арматуры в железобетоне не должно ограничиваться только расчетом конструкций. Арматуру нужно размещать так, как это требует расчет, но при обязательном учете технологических вопросов производства железобетона. Надо заметить, что наличие в текстуре бетона различного количества свободной воды непосредственно сказывается при его твердении не в оптимальных влажностных условиях. Большее снижение технических свойств будет у бетона (железобетона), в котором больше свободной воды.

§ 57. Сущность процесса твердения бетона

Твердение бетона связано с гидролизом и гидратацией минералов, составляющих вяжущее, что бывает в том случае, если они реагируют с водой. Такие изменения можно назвать коррозионными (см. § 8). Указанные процессы (см. § 62—65) могут протекать не только на этапах «склеивания» сыпучих каменных материалов после уплотнения, но и в период эксплуатации, когда из бетонной смеси сформованы конструкции (сооружения). Следовательно, при выборе вяжущих учитывают не только возможность их реакции с водой затворения, но и недопустимость дальнейшего развития реакции воды-среды с новообразованиями — цементным камнем.

Однако стойкость цементного камня, состоящего из гидратированных соединений, нельзя сохранять только за счет выбора минералогического состава вяжущего, так как (см. табл. I.15) при длительном воздействии избыточной воды-среды все соединения постепенно корродируют, что приводит к разрушению бетона (раствора). По этой причине нельзя допускать непосредственного контакта воды-среды с массой цементного камня. Следовательно, выбор химико-минералогического состава цемента необходимо дополнить требованиями, позволяющими получить бетон (раствор), цементный камень которого имел бы минимальный контакт с водой, а в ряде случаев создать дополнительную защиту внешних поверхностей сооружений (например, путем устройства защитных покрытий).

Итак, рассмотрение твердения бетона (раствора) не следует ограничивать изучением собственно процессов гидролиза и гидратации, которые протекают даже при хранении цемента на воздухе, так как в нем имеется влага. Такие условия гидролиза и гидратации приводят только к порче цемента — снижению его вяжущих свойств.

Для использования вяжущих свойств с наибольшим эффектом надо применять: цементы с высокими строительно-техническими свойствами; бетонные смеси с минимально возможным количеством воды, допускающим их формование до такой степени сближения зерен цемента, которая обеспечивает последующее формирование новообразований с пассивными капиллярами и, следовательно, систематическую сработку микробетона Юнга и др. Сказанное о комплексе показателей, имеющих технический смысл при оценке твердения бетона, связано с созданием оптимальных условий для получения искусственных технических камней, для омоноличивания рыхлых каменных материалов, тщательно упакованных при уплотнении бетонных (растворных) смесей, у которых были заранее определены и подобраны зерновые составы.

Многочисленными опытами и анализом работы сооружений и конструкций показано, что высокие плотности цементного камня и текстуры бетона имеют решающее значение для его долговечности. Под плотной текстурой нужно понимать такое состояние, когда все межзерновое пространство материала заполнено не воздухом, а водой, обеспечивающей длительный процесс гидролиза и гидратации цемента, зерна которого в минимально возможной степени раздвинуты пленками воды. В зависимости от тонкости помола цемента, его свежести, зернового и химико-минералогического составов, наличия в нем минеральных и других добавок этот процесс протекает годами (см. § 11). Отсутствие воды в межзерновых пространствах, незаполненных цементным тестом, создает неблагоприятные условия для структурообразования цементного камня, резко снижает его технические свойства. Из этого не следует делать вывод, что по указанной причине в бетонную смесь нужно вводить возможно больше воды.

Как известно, вода, введенная сверх оптимального количества для обеспечения гидролиза и гидратации на контактах цементных зерен при их максимально возможном сближении, приводит к снижению прочности и других технических свойств. Стремление получить бетон с минимальным содержанием воды должно быть всегда в поле зрения строителей; это, в частности решается при приготовлении бетонных смесей на бетоносмесительных установках принудительного перемешивания, при предварительном приготовлении цементного теста и вибрировании бетонных смесей (см. раздел третий).

Акад. А. А. Байков указывал на сложность процесса твердения цемента, представляющего комплекс химических, физических и механических факторов. Сказанное относится к твердению бетона, которое, если не соблюдать ранее изложенные положения о важности получения бетона только плотных текстур, покажет, что процесс твердения цемента не обеспечил получение бетона высоких свойств.

Твердение бетона нельзя рассматривать на основе только химических процессов между цементом и водой, протекающих в лабораторных условиях, отвлекаясь от материала, в котором они будут происходить, и от их условий, которые исключительно разнообразны и нестабильны. Ошибки в производстве работ связаны именно с учетом указанного различия в результатах химического процесса твердения цемента, когда при одних и тех же новообразованиях и одном и том же их количестве получаются бетоны с разными свойствами.

Твердение бетона невозможно без химического процесса между цементом и водой, однако результаты твердения зависят не только от этого. Рассмотрим ряд закономерностей процесса твердения бетона:

$$R_6 = f(B/U); R_6 = f(B/U, R_u) \text{ и } R_6 = f'(B/U, R_u, \tau, p),$$

где V/C — водоцементное отношение (водоцементный фактор); R_c — активность цемента, кг/см^2 (10^{-1} МПа); т. р — технология бетонных работ.

Следовательно, зависимость предела прочности бетона при сжатии от V/C действительна в строго ограниченных условиях (в нашем случае при одном и том же качестве цемента и других материалов одинаковой технологии бетонных работ). Это легко установить прямыми испытаниями. В частности, при испытании контрольных образцов бетона на сжатие могут быть ошибки, если не учитывается: ровность поверхности образцов (границы, прилегающие к плитам пресса должны быть строго параллельны), скорость приложения нагрузки, центрирование образца и недеформируемость опорных стальных плит пресса*. При недостаточной толщине таких плит происходит их деформирование и снижение показателей прочности у испытываемых образцов.

Технике испытания прочности бетона посвящен ряд исследований [23, 27, 30, 50, 62]. Несоблюдение требований испытания приводит к серьезным ошибкам как при проектировании составов бетона, так и при оценке прочности сооружений или их частей (конструкций, деталей и элементов из бетона и железобетона). Указанные закономерности, определяющие прочность бетона на какой-либо срок твердения, являются частным случаем более широкой математической зависимости прочности бетона от различных факторов и используются при неперменном условии параллельных приготовлений опытных составов смеси и бетона для каждого случая расчета. Действительно, прочность бетона на любой срок твердения зависит от многих переменных факторов:

$$R_0 = f(M; s; Z; B_{\text{связ}}; B_{\text{своб}}; x; t; P; \text{к. м}; \text{т. р}),$$

где M — минералогический состав исходного цемента и структура его зерен; s — удельная поверхность реагирующих частиц исходного цемента, $\text{см}^2/\text{г}$; Z — зерновой состав цемента (кривая распределения зернового состава); $B_{\text{связ}}$ — количество воды, вступающей в химическую связь с цементом, % от массы цемента; $B_{\text{своб}}$ — количество несвязанной воды, в том числе отделившейся от теста в текстуру бетона, % от массы цемента; x — неорганические и органические добавки, действующие на изменение физико-химических условий твердения цемента, % добавок от массы цемента; t — температура воздуха — среды, при которой протекает процесс твердения цемента, $^{\circ}\text{C}$; P — давление (выше нормального) воздуха — среды, в которой твердеет бетон (раствор), ат (МПа); к. м — количество и качество каменных заполнителей с их специфическими характеристиками (прочностью, зерновым и минералогическим составами, влагоемкостью и т. д.); т. р. — технология бетонных работ.

* По ГОСТ 10180—67 скорость приложения нагрузки должна составлять 2—3 кг/см^2 в 1 с (10^{-1} МПа).

Как следует из приведенной записи, подавляющее число характеристик связано с качеством и условиями твердения цемента. В частности, при производстве работ особое внимание уделяется условиям формирования смесей, в том числе времени от момента ее приготовления до начала уплотнения. Вылеживание ряда смесей не только снижает их пластичность, но и значительно повышает прочность из-за изменения межзернового состава в формирующемся цементном тесте. Следовательно, в зависимости $R_6 = f(V/C)$ всегда должны учитываться сроки твердения бетона, а также сроки от конца приготовления смеси до ее формирования в образец (конструкцию).

Таблица IX.1

В/Ц	Продолжительность вылеживания смеси, ч	Пластичность-жест- кость смеси		Предел прочности при сжатии после 3 сут. твердения	
		см	с	$\frac{\text{кг}}{\text{см}^2}$ (10^{-1} МПа)	%
1,0	Сразу после перемешивания	18,5	—	30,0	100
	3,5	6,5	—	40,5	136
	8,5	—	15	66,0	223
0,8	Сразу после перемешивания	17,5	—	50,0	100
	4,0	14,0	—	60,0	120
	10,0	11,0	—	87,0	174
0,6	Сразу после перемешивания	18,5	—	91,0	100
	8,0	11,0	—	129,0	143
	24,0	—	60	154,0	170

Результаты опытов (табл. IX.1), многократно повторенные с различными материалами, подтверждают, что в случае вылеживания смесей нельзя пользоваться зависимостью $R_6 = f(V/C)$, без коррективов к показателям прочности бетона. Действительно, бетон с В/Ц при 8,5 ч вылеживания смеси без испарения воды обладает большей прочностью, чем бетон с В/Ц=0,8, если образцы были сформованы вслед за приготовлением смеси. Указанная причина во многих случаях приводит к расхождению в показателях прочности контрольных кубов, сформованных при производстве работ, и кубов, сформованных при подборе состава бетона.

Для лучшего понимания сказанного рассмотрим, как вода распределяется в бетоне. Зерна цемента различны по размерам и минералогическому составу. Известно, что изготавливается большое число цементов различного вида (портландцементы с минеральными добавками, пуццолановые портландцементы и другие вяжущие, зерна которых обладают различной активностью к воде).

Следовательно, распределение воды в цементном тесте различно [55]. Учитывая это, значение V/C для полиминеральных зерен полидисперсного цемента можно записать так:

$$V/C = \frac{\left(\frac{B_1}{m_1}\right) m_1 + \left(\frac{B_2}{m_2}\right) m_2 + \dots + \left(\frac{B_n}{m_n}\right) m_n + B_0}{m_1 + m_2 + \dots + m_n},$$

$$V/C = \frac{B_0 + \sum_{i=1}^n \left(\frac{B_i}{m_i}\right) m_i}{\sum_{i=1}^n m_i},$$

где $B_1, B_2, \dots, B_n$ — количество воды, сорбируемое поверхностью зерен различных минералов, в том числе гидравлических добавок, шлаков и др.; $m_1, m_2, \dots, m_n$ — масса зерен различных минералов, в том числе минералов гидравлических добавок, шлаков и др.*; B_0 — несвязанная вода, которая распределяется между зернами цемента и добавок.

Реакция с водой начинается с поверхностных слоев зерен цемента (в том числе и с поверхности трещин в зернах). По мере течения процесса исходные зерна цемента, вступившего в реакцию с водой, систематически изменяются в размерах. Сказанное можно записать в следующем виде:

$$B_i/m_i = \varphi_i = \varphi(s_i; x_i; t),$$

где B_i — количество воды, связанное с массой конкретного минерала m_i ; s_i — исходная удельная поверхность i -го компонента цемента, $\text{см}^2/\text{г}$; x_i — химическая активность различных минералов; t — время, прошедшее от начала затворения цемента.

В итоге выражение для водоцементного отношения можно записать так:

$$V/C = \frac{B_0(t) + \sum_{i=1}^n \varphi(s_i; x_i; t) m_i}{\sum_{i=1}^n m_i}.$$

Это достаточно сложное выражение может быть рассчитано с помощью ЭВМ. При сравнении приведенного выражения, учитывающего количество воды, приходящееся в каждый отрезок времени на поверхность отдельных полиминеральных зерен цемента, и водоцементного отношения, используемого в лабораторной и производственной деятельности, можно заметить, что в формулах не учитывается различие в размерах зерен цемента, дефектность их структур, различие в скорости процесса гидролиза и гидратации,

* Оптимальные условия твердения различных цементов различны, что усложняет назначение оптимальных значений V/C .

возникающего по многочисленным причинам, условия технологии работ. Чтобы использовать зависимость водоцементного отношения от указанных факторов, необходимо их числовые значения получить в лаборатории. Для этого нужно разработать достаточно простые по осуществлению лабораторные методики. Наиболее трудоемко определение воды, приходящейся на поверхность отдельных полиминеральных зерен цемента при твердении за время t . Для такого определения можно применять термографический анализ, используя дериватограф.

Количество химически связанной воды будет определяться при анализе воды и полученных новообразований. Количество несвязанной воды находят из разности между количествами воды затворения и связанной воды в процессе гидролиза и гидратации цемента. Указанный пример распределения воды в бетоне можно иллюстрировать опытами по ее связыванию зернами цемента различного размера. Так, если зерна цемента мельче 30 мкм могут удерживать в своей массе количество воды, соответствующее $В/Ц > 0,8$, то более крупные зерна удерживают значительно меньше воды, что определяется по значениям $В/Ц < 0,25$. Такое распределение воды в бетонах (растворах) подсказывает нам причины значительной неоднородности строительно-технических свойств. Указанные зависимости, в первую очередь, необходимо использовать при разработке путей повышения технических свойств бетона и на этой основе его долговечности в сооружениях (конструкциях).

На рис. IX.1 показаны особенности твердения бетона по перечисленным причинам. В частности, известно, что цементы разных заводов с составами, близкими по дисперсности, но различной минералогии после длительных сроков твердения приобретают одинаковую прочность. Те же цементы или цементы одного минералогического состава и одной дисперсности при различных значениях $В/Ц$ (различной раздвижки их зерен или флокул из них) никогда не приобретают одинаковую прочность и равные технические свойства.

Рассмотрим понятие — нормальные условия твердения цемента. Как видно из § 8, 58, 59 и 60, различие в условиях твердения

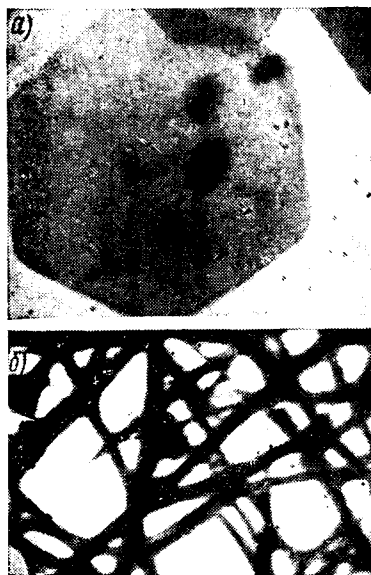


Рис. IX.1. Электронно-микроскопические снимки гидратированного трехкальциевого алюмината C_3AH_6 : а — кристаллы C_3AH_6 при гидратации C_3A в воде; б — кристаллы C_3AH_6 при гидратации в растворе с. с. с концентрацией 0,5% через 1 ч

изменяет скорость гидролиза и гидратации минералов цемента и условия формирования новообразований из них. По этой причине стандартными считают условия, когда относительная влажность среды, в которой твердеет цемент, составляет 100%, а температура воздуха — $20 \pm 3^\circ \text{C}$ (ГОСТ 310—60). Данные условия не являются оптимальными для всех минералов (см. § 44). По этой причине прочность некоторых бетонов при несовершенном уходе оказывается выше прочности бетонов тех же составов, твердевших при тщательном уходе. Однако долговечность бетонов с высокой прочностью будет меньшей. Понятие «нормальные условия твердения» достаточно условно и необходимо для сравнительной оценки цементов.

На практике нормальными следует считать такие условия, при которых на цементе конкретного состава при его минимально допустимом расходе на кубический метр бетона можно получить больший эффект. В частности, критерием такого нормального режима твердения следует считать предел прочности с 1 кг цемента при наибольшей долговечности бетона (раствора). Например, для шлакопортландцемента с высоким содержанием гранулированного мелкомолотого шлака нормальным режимом будет пропаривание при 100°C и 100% относительной влажности воздуха.

Рассмотрим связь прочности бетона (раствора) с другими техническими характеристиками. Иногда считают, что водонепроницаемость, морозостойкость и другие свойства находятся в прямой зависимости с прочностью бетона. Однако это частный случай, а не закономерность. Действительно, причины, обеспечивающие прочность бетона, связаны с совокупностью условий, не вскрываемых приемами испытания образцов, например при сжатии. Так, наличие в бетоне большего или меньшего числа пассивных капилляров, являющихся решающим фактором в его морозостойкости, никак не может быть вскрыто проверкой прочности бетона существующими методами. Несомненно, различие в капиллярах в какой-то мере отражается на показателях прочности.

Другие характеристики текстуры бетона превалируют над различием в структуре капилляров и поэтому не улавливаются достаточно грубыми приемами испытания прочности бетона. При исключении таких разнородных факторов прочность бетона коррелирует с его морозостойкостью. В этом случае различие в капиллярах четко улавливается по изменению прочности бетона. Однако из сказанного не следует, что, сравнивая морозостойкость бетонов разного состава по показателю морозостойкости, можно судить о большей или меньшей их прочности (см. § 64). Это также относится к любым свойствам (в частности, к ползучести бетона, химической стойкости и т. д.).

Оценка свойств бетона по показателю прочности, как правило, не возможна без привлечения других сведений (качества материалов, анализа состава смеси и бетона по ряду показателей, анализа условий производства работ). Примером такого приема оценки свойств бетона по многозначной, а не однозначной зависимости

могут служить рекомендации по оценке морозостойкости и коррозионной стойкости, приведенные в табличной форме. Смысл сказанного вытекает из широких понятий структуры компонентов, составляющих текстуру бетона. В частности, определение ползучести, морозостойкости, водонепроницаемости выявляет дифференциальное качество структурных компонентов в микрообъемах, в то время как определение прочности не позволяет улавливать эти особенности структур компонентов текстуры бетона.

§ 58. Влияние влажности воздуха на процессы твердения бетона

Твердение цемента в бетонах (растворах) в зависимости от относительной влажности воздуха протекает неодинаково. Учитывая продолжительность формирования структуры цементного камня, связывающего рыхлые каменные материалы в технический камень — бетон (раствор), нельзя ограничивать длительность обеспе-

Таблица IX.2

№ цемента	Наименование клинкера и цемента лабораторного помола	Конечные значения В/Ц при исходных значениях В/Ц								
		0,213	0,248	0,300	0,400	0,500	0,600	0,700	0,800	1,000
1	Клинкер завода «Комсомолец»; цемент без гипса и с. с. б.	0,192	0,214	0,246	0,295	0,315	0,324	—	—	—
2	Клинкер завода «Комсомолец»; цемент с 3% гипса без с. с. б.	0,194	0,218	0,249	0,286	0,311	0,334	—	—	—
3	Клинкер завода «Комсомолец»; цемент с 3% гипса и 0,2% с. с. б.	0,195	0,217	0,247	0,290	—	0,330	—	—	—
4	Клинкер завода «Большевик»; цемент без гипса и с. с. б.	—	—	0,266	0,316	0,359	0,407	0,430	0,485	0,535
5	Клинкер завода «Большевик»; цемент с 5% гипса без с. с. б.	—	—	0,256	0,301	0,356	0,374	0,399	0,406	0,428
6	Клинкер завода «Большевик»; цемент с 5% гипса и 0,3% с. с. б.	—	—	0,263	0,329	0,351	0,349	0,368	0,380	0,386
7	Клинкер Чернореченского завода; цемент без гипса и с. с. б.	—	0,248	0,273	0,354	0,423	0,485	0,519	0,563	0,622
8	Клинкер Чернореченского завода; цемент с 5% гипса без с. с. б.	—	—	0,261	0,314	0,365	0,410	0,452	0,464	0,480
9	Клинкер Чернореченского завода; цемент с 5% гипса и 0,3% с. с. б.	—	—	0,275	0,357	0,439	0,452	0,482	0,505	0,530

Таблица IX.3

№ цементата	Наименование клинкера и цемента лабораторного помола	Количество воды, отделимой от воды затвердения, %, при исходных значениях В/Ц									Расчетный минералогический состав клинкера, %			
											C ₃ S	C ₂ S	C ₄ A	C ₄ AF
		0,213	0,248	0,30	0,40	0,50	0,60	0,70	0,80	1,00				
1	Клинкер завода «Комсомолец»; цемент без гипса и с.с.б.	9,8	14,4	17,8	26,2	36,4	47,4	—	—	—	58	19	5	16
2	Клинкер завода «Комсомолец»; цемент с 3% гипса без с.с.б.	9,0	12,9	17,1	28,5	37,8	44,4	—	—	—	—	—	—	—
3	Клинкер завода «Комсомолец»; цемент с 3% гипса и 0,2% с.с.б.	8,4	12,6	18,0	27,4	—	—	—	—	—	—	—	—	—
4	Клинкер завода «Большевик»; цемент без гипса и с.с.б.	—	—	11,2	21,0	28,1	32,2	38,0	39,7	45,5	55	18	6	17
5	Клинкер завода «Большевик»; цемент с 5% гипса без с.с.б.	—	—	14,8	23,6	28,7	37,6	42,9	49,4	57,2	—	—	—	—
6	Клинкер завода «Большевик»; цемент с 5% гипса и 0,3% с.с.б.	—	—	14,2	17,7	29,7	42,0	47,3	52,5	61,4	—	—	—	—
7	Клинкер Чернореченского завода; цемент без гипса и с.с.б.	—	—	9,04	11,75	15,4	19,2	25,8	29,6	37,8	51	22	11	11
8	Клинкер Чернореченского завода; цемент с 5% гипса без с.с.б.	—	—	13,0	21,5	27,0	31,7	35,4	41,7	52,0	—	—	—	—
9	Клинкер Чернореченского завода; цемент с 5% гипса и 0,3% с.с.б.	—	—	8,8	10,0	12,3	25,0	30,6	37,0	47,0	—	—	—	—

Примечание. Опыт по определению водоудерживающей способности цемента проводились в лабораторной центрифуге без испарения воды из цементного теста через 30 мин после приготовления.

чения оптимальных условий твердения цемента, как это рекомендуется различными техническими указаниями.

Рассмотрим причины, вызывающие необходимость обеспечения длительных сроков твердения бетона при высокой влажности воздуха. Идеальные условия твердения бетона — это сохранение в нем всей воды, с которой он был приготовлен, в момент окончания уплотнения. Бетонные (растворные) смеси приготавливают с избытком воды против того количества, которое необходимо для об-

Таблица IX.4

Исходные условия опыта		Результаты опыта			
Содержание воды в тесте, %		Содержание воды, удержанной в тесте, %		Содержание воды, отделенной от теста, %	
без гипса	с гипсом	без гипса	с гипсом	без гипса	с гипсом
—	30	—	30,0	—	0
—	40	—	40,0	—	0
50	50	50,0	46,4	0	2,6
—	60	—	55,0	—	5,0
70	70	70,0	63,5	0	6,5
80	80	78,0	65,2	2,0	14,8
90	—	85,6	—	4,4	—
100	—	96,4	—	3,6	—
110	—	104,8	—	5,2	—
120	—	120,0	—	0	—
125	—	97,8	—	27,2	—
130	—	99,7	—	30,3	—
150	—	92,3	—	57,7	—
200	—	94,4	—	105,6	—

Примечание. Содержание воды рассчитано по отношению к массе синтетического полиминерального цемента C_3A . Соотношение гипса и минерала C_3A равно 1 : 1.

разования новых гидратированных соединений в зависимости от их водоудерживающей способности и необходимой для производства работ пластичности-жесткости смесей. Следовательно, в бетоне (растворе) всегда будет свободная вода, которая в силу разности давления паров воздуха в образцах или в конструкциях (сооружениях) будет переходить из жидкого состояния в парообразное и испаряться в окружающее пространство.

Уточним, что надо понимать под термином «водоудерживающая способность цемента» и каковы причины, обуславливающие эту особенность. Эта особенность в общем виде сводится к полиминеральности цемента, полидисперсности, наличию или отсутствию в нем мелкомолотых минеральных порошков (из кварцевого песка, карбонатных пород, гранулированного доменного шлака, молотой золы и др.), соотношению в цементе количества, реагирующего с водой (условно в первые сутки твердения) минерала C_3A и гипса, наличия электролитов и органических ПАВ. В табл. IX.2 и IX.3 приведены сведения, иллюстрирующие часть перечисленных факторов, вызывающих разную водоудерживающую способность.

Таблица IX.5

Время, прошедшее с момента приготовления теста до начала опыта, мин		Цемент без с. с. б.		Цемент с с. с. б.	
Опыт № 1	Опыт № 2	Количество отделившейся воды *, %	Количество связанной воды, % к массе цемента	Количество отделившейся воды *, %	Количество связанной воды, % к массе цемента
10	10	<u>14,0</u> 28,0	—	<u>13,2</u> 26,4	—
20	20	<u>14,2</u> 28,4	—	<u>14,6</u> 29,2	—
55	60	—	1,1	<u>13,9</u> 27,8	0,8
70	80	<u>11,9</u> 23,8	—	—	0,7
90	130	—	1,2	<u>14,9</u> 29,8	—
275	180	<u>7,0</u> 14,0	—	—	0,8
295	250	—	2,3	<u>11,8</u> 23,6	—
—	300	—	—	—	2,0
—	345	—	—	<u>7,5</u> 15,0	—

* В числителе — к массе цемента, в знаменателе — к массе воды.

П р и м е ч а н и е. Цемент — синтетический минерал C_3S ; количество пластифицирующей добавки — 0,3% с. с. б. от массы цемента; $B/C=0,50$.

Рассмотрим свойство цемента удерживать различное количество воды в связи с другими существенно важными свойствами бетонов (растворов): прочностью, деформативностью, физической стойкостью, например при многократном попеременном воздействии воды и мороза. Из указанных таблиц видно, что основной причиной водоудерживающей способности следует считать химико-минералогический состав цемента, наличие или отсутствие в нем минеральных порошков. Действительно, наиболее высокий процент воды после центрифугирования образцов из цементного теста остается в цементном тесте, изготовленном из клинкера Чернореченского завода, содержащего наиболее высокий процент минерала C_3A (в образцах на этом клинкере содержится примерно 11% минерала C_3A). Цемент из клинкера завода «Комсомолец», содержащий около 5% минерала C_3A , удерживает значительно меньше воды. Для подтверждения сказанного в табл. IX.4 и IX.5 приведены све-

дения о сравнительной водоудерживающей особенности мономинеральных синтетических цементах из минералов C_3A и C_3S .

Отмечается своеобразность изменения пластичности цементного теста на синтетическом мономинеральном цементе, изготовленном из минерала C_3A . Например, для этого цемента существует особое значение B/C , при котором вода не отделяется, несмотря на ее значительный избыток по сравнению с тем количеством, которое необходимо для получения пластичного цементного теста. Так, из табл. VIII.4 видно, что после $B/C > 0,7$ цементное тесто при центрифугировании начинает отделять воду. Введение гипса снижает водоудерживающую способность такого цементного теста. Отделение воды отмечено при $B/C > 0,4$, что объясняется разрушением коагуляционной структуры гидратированного трехкальцевого алюмината. Наблюдения за цементным тестом из минерала C_3A позволяют сказать, что его состояние при соотношениях воды и минерала, находящихся в пределах от 0,7 до 1,3, нельзя сравнивать с любым другим минералом по ряду особенностей, не типичных для последних. Указанные особенности в изменении состояния теста описаны в табл. IX.6.

Таблица IX.6

В/Ц или В/ C_3A цементного теста	Визуальные характеристики состояния теста
0,7	Вода не отделяется, цементное тесто имеет вид густой пасты
0,8	Вода частично отделяется, цементное тесто похоже на густую пасту
0,9	Вода частично отделяется от цементного теста и оно похоже на жидкую массу, допускающую розлив
1,1	Увеличивается водоотделение; оно наибольшее при $B/C_3A = 0,70—1,2$. Тесто при $B/C_3A = 1,0—1,10$ внешне похоже на тесто при $B/C_3A = 0,9$, но первое отличается следующими особенностями: 1) застывает при попытке разлива, однако при встряхивании вновь разжижается, т.е. обладает тиксотропностью; 2) теряет подвижность быстрее, чем тесто при $B/C_3A = 0,9$
1,2	Вода не отделяется, хотя тесто вначале имеет жидкий вид, но быстро густеет без следующего разжижения. При замешивании теста через 3—4 мин от начала затворения наблюдается скачкообразное увеличение пластичности теста — разжижение с исчезновением мелких шаровидных комков, сопровождающих процесс смешивания порошка с водой и сильный разогрев смеси. Образуется полноценная коагуляционная структура
1,25 и выше	Тесто жидкое, легко разливается. Его поведение аналогично поведению теста на цементах из силикатов кальция.

Эти опыты подтверждают положение о высокой водоудерживающей особенности минерала C_3A . Из этого не следует считать, что ранее сказанное о роли разных факторов и, в частности, иные особенности цемента не влияют на водоудержание. В несколько меньшей степени, чем минерал C_3A , на водоудержание влияет наличие в клинкере щелочных фаз, содержащих окислы Na_2O и K_2O , различного количества мелких фракций, например, меньше 10 мкм,

его петрографические особенности и количество гипса. Роль гипса и с. с. б. можно увидеть из табл. IX.8. Результаты опытов, приведенные в этой таблице, показывают, что в цементы с различным количеством минерала C_3A необходимо вводить неодинаковые количества гипса и с. с. б., которые в данном случае с полным основанием можно считать комплексной минерально-органической добавкой, регулирующей содержание и качество образующейся в цементном тесте коагуляционной структуры — гидратированного минерала.

Следует сказать, что любые структуры цементного камня, в которых не весь гидратированный алюминат связан с гипсом в гидросульфоалюминат любого вида (низко- и высокосульфатного), образуют в цементном камне на этой основе различные коагуляционные структуры. Увеличение водоудерживающей способности, основанное на связывании воды гидратирующимися и гидролизующимися минералами цемента, приводит к повышению стойкости структур таких формирующихся новообразований с образованием сильно разветвленной контракционной пористости в них*. Водоудержание, связанное с формированием коагуляционных структур, создает в структуре цементного камня дефекты, снижающие строительно-технические свойства цемента. Следовательно, водоудерживающая способность регулируется как в процессе приготовления цемента, стремясь получить цементы с низкой водопотребностью, так и в строительном производстве, доводя образование коагуляционных структур до минимума.

Анализируя табл. IX.2 и IX.3 по различию водоотделения цемента на разных клинкерах, можно видеть, сколь значительно влияет на это различие минерал C_3A , вскрытый к контакту с водой при помолке клинкера. Действительно, для цементов 1—3 введение гипса и с. с. б. влияет незначительно, что связано с наличием на зернах цемента относительно небольшого количества минерала C_3A , который можно назвать «действующим» на поверхности зерен. Для цементов 4—6, в которых также содержится немного минерала C_3A (6 против 5%) по отношению к цементам на основе клинкера завода «Комсомолец», действующее количество минерала C_3A несомненно выше, что сказывается на значительно большем удержании воды этими цементами, полученными на базе клинкера завода «Большевик». Для этих цементов только при $V/C \geq 0,5$ можно видеть эффект действия комплексной минеральной и поверхностно-активной органической добавок (гипса и с. с. б.) по увеличению водоотделения из цементного теста, характерному для механизма их действия — разрушения коагуляционной структуры гидратированного алюмината.

Для цемента на основе клинкера Чернореченского завода, содержащего 11% минерала C_3A , отделившейся воды соответственно будет меньше, чем для цементов на базе клинкера завода «Боль-

* Контракция — стяжка, уменьшение суммарного объема твердой и жидкой фаз (цемента и воды) в процессе гидролиза и гидратации цемента.

шевик»; однако и здесь важно иметь в виду сказанное о необходимости учета условности приведенных цифр, относящихся к содержанию в цементе действующего количества минералов и в частности C_3A . «Действующего» C_3A в любом цементе меньше расчетного, так как цементы, применяемые в опытах, всегда имеют во много раз меньшую удельную поверхность, чем цемент, на базе которого рассчитывается минералогический состав. Как известно, последний определяют микроскопом, для чего исследуемая проба дополнительно истирается в ступке, или по химическим соединениям, составляющим цемент, поэтому производят расчет минералогического состава цемента по существующей (условной) методике. Если сказанное о причинах различного водоотделения цемента (или его водоудержания) сравнить с их стандартной характеристикой, распылом конуса растворной смеси, проверяемой при испытании цементов в пластичных растворах по ГОСТ 310—60, то можно увидеть, как распыл зависит от причин, рассмотренных в этом параграфе *.

Портландцемент завода «Большевик» при стандартном испытании имеет пластичность растворной смеси, оцениваемую по распылу конуса: для М400—108 мм и нормальную густоту 27,3%; для М500—111 мм и 26,7%; для сульфатостойкого портландцемента, содержащего 5% минерала C_3A ,—соответственно 117 мм и 24,3%. Стандартные растворные смеси на портландцементах Чернореченского завода имеют: для М400 распыл 108 мм и нормальную густоту 25,3%, для М500—соответственно 107 мм и 25,5%, а для дорожного портландцемента М400—106 мм и 26,7%. Следовательно, одной из причин, вызывающих различную пластичность—растекаемость растворной смеси при прочих равных условиях, является содержание минерала C_3A .

Ранее сказанное о действующем минералогическом составе неразрывно связано с петрографической характеристикой клинкера. Исследователи, работающие над вопросами ускоренной оценки качества цемента по петрографии клинкера, широко используют особенности его строения [52, 58].

Анализ указанного здесь различия в водоудерживающей способности цементов и ее связи, например, со стандартной характеристикой пластичности растворных смесей (состава 1:3) на вольском песке, имеет исключительно важное значение для правильной оценки технических свойств цемента. При этом любой стандартный портландцемент, как правило, даже при определении нормальной густоты цементного теста (т. е. низких В/Ц-0,23—0,28) отделяет при постепенном структурообразовании большее или меньшее количество воды. При этом процессе цементный камень будет иметь более высокие технические свойства. Однако отделившаяся вода

* Анализ причин различия в пластичности (растекаемости) стандартных растворных смесей, а следовательно, и бетонных смесей, требует значительно большего числа первичных сведений, в частности, об особенностях сырья и его переработки по всем технологическим переделам. То же касается и широких сведений о цементе.

расположится у поверхности заполнителей, ухудшая их контакт с формирующимся цементным камнем, что наносит меньший ущерб текстуре бетона. Поэтому содержание воды в строительных смесях (растворных и бетонных) с высокой пластичностью должно быть минимальным и не должно приводить к отделению части воды от цементного теста в процесс его загустевания. Это условие легко выполнить, вводя в цемент гидравлические добавки, обладающие высокой молекулярной влагоемкостью (например, трепел), т. е. применяя пуццолановые цементы с такими гидравлическими добавками.

Для бетонов, используемых в конструкциях, подвергающихся многократному попеременному замораживанию и оттаиванию, эксплуатируемых в воздушных условиях, описанный прием использовать нельзя. Бетон на таких цементах обладает высокими техническими свойствами только при работе в воде или в стабильных влажных условиях (во влажных грунтах, например, при изготовлении фундаментов). Следовательно, при использовании цемента, у которых формирование цементного камня сопровождается выделением воды на поверхности зерен песка и щебня, бетон надо рассматривать состоящим из цементного камня*, свободной воды, воздушных пузырьков разной крупности и каменных заполнителей. Различные способы позволяют улучшать свойства цемента, связанные с водоотделением, значительно повышая качество бетона.

Особенности формирования структуры цементного камня из гидратирующегося минерала C_3A в первый период процесса отражаются и на формировании структур полиминеральных и полидисперсных цементах на базе портландцементного клинкера. Анализ сведений из табл. IX.6, касающихся состояния теста, и табл. IX.4 показывает, что гипс является своеобразным регулятором распределения воды в цементном тесте, и введение его в такое тесто способствует разрушению коагуляционных структур из гидратированного трехкальциевого алюмината. Действительно, если цементное тесто из минерала C_3A образует только при $B/C_3A \geq 0,7$ более или менее подвижную физико-химическую систему — тесто, то с гипсом такая же пластичность теста может быть получена уже при $B/(C_3A + \text{гипс}) \geq 0,3$. При более высоких значениях $B/(C_3A + \text{гипс})$ не образуется тесто, аналогичное тесту из минералов C_3A при $B/C_3A \approx 1,2$. Любое увеличение содержания воды в тесте систематически отражается на росте пластичности и водоотделения. Учет характера изменения водоотделения цементного теста из минерала C_3A находится в зависимости от времени, прошедшего с момента его получения и содержания в нем пластифицирующей добавки с. с. б., что видно из опытов с тестом при значении $B/C_3A = 1,3$. Результаты этих опытов отражены в табл. IX.7.

* Надо учитывать, что цементный камень нельзя рассматривать вне свободной воды, находящейся в бетоне. Наличие такой отделившейся воды является своеобразным буфером для воды, физически связанной с новообразованиями, систематически образующимися в процессе твердения цемента. Испарение такой воды из твердеющего бетона приводит к последующей миграции ее из внешних слоев этих новообразований.

Приведенные показатели свойств двух цементных паст на мономинеральном цементе из минерала C_3A показывают, что введение в цемент с. с. б. значительно уменьшает количество отделяемой воды, практически не влияя на количество химически связанной воды. Введение пластифицирующей добавки равноценно эффекту вододержания цементного теста без пластификатора после 390 мин его структурообразования. Показатели этих опытов следует использовать для дополнительного анализа особенностей структурообразования различных полиминеральных цементов (см. табл. IX.2 и IX.3). Цементы на высокоалюминатном клинкере при введении с. с. б. (начиная с определенных значений В/Ц) удерживают больше воды, чем тесто без пластифицирующей добавки (сравниваются цементы на клинкере Чернореченского завода № 8 и 9). При определенных соотношениях В/Ц создаются условия, способствующие образованию физико-химических систем из гидратирующего в них минерала C_3A , аналогичных системам, рассмотренным в опытах (табл. IX.7).

Большее или меньшее извлечение воды из цементного теста прямым образом связано с особенностями цементов пластифицироваться водой, т. е. возникновения на поверхности полиминеральных зерен таких новообразований, которые не создают коагуляционных структур, снижающих пластичность образующейся физико-химической системы, так как внутри ее задерживается много воды; она в этом случае уходит как смазка из контактной зоны между флокулами зерен цемента.

Таблица IX.7

Время от момента приготовления теста		Содержание воды, удержанной в тесте, %		Содержание воды, отделенной от теста, %		Содержание химически связанной воды, %	
без с. с. б.	с 0,3% с. с. б.	без с. с. б.	с 0,3% с. с. б.	без с. с. б.	с 0,3% с. с. б.	без с. с. б.	с 0,3% с. с. б.
10	10	91,2	108,5	38,8	21,5	—	—
20	20	94,7	109,6	35,3	20,4	—	—
40	55	—	—	—	—	31,4	29,8
60	60	95,6	112,8	34,3	17,2	—	—
100	95	—	—	—	—	31,1	31,1
120	120	95,6	115,3	34,4	14,7	—	—
150	150	—	—	—	—	32,7	31,5
250	250	102,0	115,8	28,0	14,2	—	—
280	280	—	—	—	—	33,1	32,1
390	390	107,0	119,8	23,0	11,0	—	—
420	420	—	—	—	—	35,3	32,9

Примечание. Содержание воды рассчитано по отношению к массе синтетического мономинерального цемента — трахальцевого алюмината.

Свойство зерен создавать на своей поверхности слои смазки из воды при минимальной водопотребности цемента и минимальном водоотделении можно назвать самопластифицируемостью или автопластифицируемостью. Природа минералов создает различный эф-

фekt самопластифицирования как в мономинеральных, так и в полиминеральных цементах, где на его проявления, в отличие от мономинеральных цементов, влияет их физико-химическая совокупность в зерне цемента. Это хорошо видно из сравнения табл. IX.4, IX.5 и IX.7 по водоотделению цементов из минералов C_3S и C_3A . Так, цементное тесто на минерале C_3S при $B/C=0,5$ удерживает 36% воды, а на минерале C_3A при $B/C=0,5$ — 50%. Введение пластификатора в цементное тесто на минерале C_3S обеспечивает длительный период отделения воды и в большем количестве, чем без с. с. б., а на минерале C_3A процесс водоудержания изменяется в обратной зависимости.

Сказанное о свойстве цементов удерживать воду в цементном тесте является одной из его важных особенностей, определяющей при прочих равных условиях его строительно-технические свойства. По характеру этого свойства можно судить о минералогическом составе цемента.

§ 59. Температурный фактор в твердении бетонов

Для процесса гидролиза и гидратации цемента очень важна температура, при которой протекает твердение. Изменение температуры воды изменяет растворимость различных соединений.

Учитывая полиминеральность и полидисперсность портландцемента, можно утверждать, что от условий твердения зависит и структура цементного камня. Указанные обстоятельства, влияющие на структуру цементного камня, связаны не только с процессом их образования, но и процессами, снижающими строительно-технические свойства, т. е. структурообразование нельзя рассматривать вне процесса деструкции цементного камня, который во многих случаях сопутствует образованию цементного камня. Оптимальным надо считать такой режим твердения цемента, при котором процессы деструкции сведены к минимуму. По указанным причинам виды и марки цемента (как на основе портландцементного клинкера, так и на иных основах — иных минеральных фазах) имеют резкое различие в оптимальных режимах твердения.

Исследуя твердение цемента, И. Езиоранский и Д. Заботкин (1863—1864) связали этот процесс с распадом при гидратации и гидролизе сложного известкового силиката кальция, приводящим к образованию: гидратированного соединения извести с кремнеземом, гидрата окиси кальция, простых гидратированных соединений извести с глиноземом. Акад. Д. С. Белянкин (создатель науки технической петрографии) и проф. В. В. Лапин в работе «Петрография технического камня» [5, стр. 481] отмечают, что изложенные выше основные положения теории твердения в своей основе близки к современным взглядам. В табл. IX.8 приведены различные теории твердения цемента с кратким их изложением.

Как видно из таблицы, теории твердения вяжущих весьма различны. Взгляды двух советских исследователей (П. А. Ребиндера и С. Д. Огорокова) по вопросам твердения сводятся к рассмотре-

Автор теории	Краткое содержание теории твердения вяжущего
Ле-Шателье (1882—1887)	<i>Кристаллизационная теория твердения.</i> Образование кристаллического сростка из кристалликов продуктов гидратации минералов цемента — новообразований, составляющих каркас технического камня
Михаэлис (1893)	<i>Коллоидная теория твердения.</i> Образование гидрогелей силикатов, алюминатов и ферритов кальция, а также кристаллических новообразований, которые имеют побочное значение и даже вредны для формирования ценных свойств цементного камня
А. А. Байков (1907—1925)	<i>Коллоидно-кристаллизационная теория твердения.</i> Образование кристаллических новообразований через процесс образования коллоидов
П. А. Ребиндер (примерно 1950 г)	<i>Коагуляционно-кристаллизационная теория твердения.</i> Первичная стадия процесса — переход ионов из решеток минералов полиминерального цемента в водную среду, их гидратация с последующей кристаллизацией устойчивых в этих условиях новообразований из перенасыщенных растворов — жидкой фазы цементного теста — цементного камня. Образование коагуляционной структуры, обладающей тиксотропными свойствами, с кристаллами гидратов — зародышами новой фазы. Вторичная стадия процесса, протекающая в два этапа, обеспечивает возникновение каркаса пространственной кристаллизационной структуры (структуры твердения). Первый этап — формирование структур из кристаллизационного каркаса, в котором возникают процессы межкуристаллического срастания; второй этап — рост кристаллов без возникновения новых межкуристаллических контактов. Этот процесс не только упрочняет образовавшуюся структуру, но и приводит к возникновению внутренних напряжений *
С. Д. Окроков (примерно 1940—1945 гг.)	<i>Твердение портландцемента как комплексный процесс.</i> Часть минералов вступает в реакцию с водой «через раствор», примером чего является гидратация минерала C_3A и образование гидросульфалюминатов кальция; другая часть минералов (силикаты кальция) гидратируется в результате топохимических реакций (коллоидно-химических) в соответствии с теорией А. А. Байкова
Бернал (1952)	<i>Схема простого механического переплетения кристаллов.</i> Эта схема похожа на схему твердения, предложенную Ле-Шателье. На базе данных электронно-микроскопических исследований считается, что затвердевший портландцемент имеет структуру, напоминающую войлок или сетчатое сплетение кристаллов гидросиликатов кальция. Имеет место взаимное прорастание кристаллов гидратных новообразований в процессе роста, когда у них одинаково ориентированы решетки. В этом случае упрочняется структура камня. По мере гидратации зерен цемента увеличивается число сцепившихся кристаллов и уменьшается объем междоузельного пространства, способствующий уплотнению системы и превращению ее в тело с большей монолитностью

Автор теории	Краткое содержание теории твердения вяжущего
Богг (1954)	<i>Схема упрочнения цементного камня на базе появления мельчайших сферических частиц. В этом случае, так же как и в положениях Бернала и Джеффри, используются исследования с применением электронного микроскопа. Считается, что образовавшиеся при гидратации минералов цемента сферические частицы обладают высокой поверхностной энергией, что влияет на сильное притягивание частиц друг к другу, срачивание их в агрегаты и образование плотно упакованного геля</i>

* Это положение рассматривается с позиций возникновения процесса деструкции образовавшихся структур.

П р и м е ч а н и е. В таблице рассмотрена только часть теорий твердения.

нию: а) только состава равновесных и неравновесных фаз в системах цементный минерал — вода без учета механизма возникновения новообразований; б) кинетики гидратации новообразований из минералов цемента; в) причин, порождающих прочность цементной связки цементного камня — механизма образования прочных структур при гидролизе и гидратации.

В настоящее время многолетние дискуссии по поводу кристалличности или коллоидности новообразований прекращены и в исследованиях. Новые более совершенные приемы исследований обеспечивают получение более надежной и разносторонней информации. Благодаря электронному микроскопу удалось показать, что любые гелеобразные структуры являются структурами кристаллическими, но со значительно большей дисперсностью (меньшими размерами кристаллов) или такие структуры являются продуктами коллоидной дисперсности. Следует уточнить представления, связанные с формированием цементного теста и цементного камня.

Цементное тесто в ходе физико-химического процесса твердения цемента меняет свое состояние по причине постепенного накопления гидратированных продуктов. Предел времени, в течение которого пластичное цементное тесто изменяет состояние, превращаясь в цементный камень с относительно малой механической прочностью (когда игла на приборе Вика под стандартной нагрузкой не проникает внутрь образца), условно назван периодом или сроком схватывания (см. § 9). Схватывание цемента не начинается и не кончается до начала его твердения, а протекает перед этими процессами со свойственным для минералов полиминерального цемента своеобразием в каждом зерне цемента, являясь начальной стадией твердения. Приведенные сведения о процессах гидролиза и гидратации зерен цементного порошка показывают, что образование многофазной структуры цементного камня — сложный процесс, позволяющий с полным основанием считать, что бетонные работы следует отнести к химической технологии.

Сказанное о схватывании цемента как бы противоречит наблюдаемому процессу схватывания и твердения цементного теста. Действительно, визуальнo и приборами четко фиксируется разделение процессов схватывания и твердения. После окончания схватывания теста мы как бы экспериментируем уже с другим телом — цементным камнем. Однако даже через достаточно продолжительный отрезок времени, исчисляемый годами, в цементном камне еще находится значительное количество негидратированного цемента (см. § 11). Это подтверждает, например, микроскопический анализ прозрачного шлифа из образцов бетона на портландцементе с 20% трепела, твердевшем под водой 15 и 36 лет.

Приведем применяемое в петрографических анализах описание такого образца. В основной массе наблюдается до 25% неразложившихся зерен клинкера, отдельные обломки которых достигают 250 мкм. Эти обломки состоят из белита (C_2S) и алюмоферрита (C_4AF), реже встречаются обломки, состоящие из алита и большого количества алюмоферритов. Во внутренних порах исследуемого образца нередко наблюдается образование кристаллов сульфoалюмината, часто в виде крупных иголок длиной до 150 мкм и диаметром до 6 мкм.

На поверхности образца обнаруживается корочка, состоящая из агрегатов мельчайших кристалликов карбоната кальция, частично окрашенных в буроватый цвет окислами железа. Наблюдается тонкозернистая слабо поляризующаяся масса, в которой встречаются отдельные участки с довольно высоким двупреломлением. Иногда вокруг зерен кварца наблюдается образование тонкозернистой массы с более высоким показателем светопреломления. В поляризованном свете обнаружена тонковолокнистая масса с еолнистым погасанием и средним показателем светопреломления 1,510. В пробе находилось большое количество тонкочешуйчатой массы с более высоким двупреломлением и со средним показателем светопреломления 1,517. Можно увидеть также тонкозернистые обломки карбонатов кальция и много обломков сульфoалюмината тонкоигольчатой формы. Длина кристаллов — до 60 мкм. Они значительно мельче, чем в порах.

Такие широко применяемые петрографические методы исследований позволяют четко фиксировать количество непрореагировавшего цемента и, в частности, на основании такого анализа судить о химико-минералогическом составе цемента, тонкости его помола, условиях твердения бетона (раствора). Например, анализ образцов бетона на портландцементе, твердевших на воздухе в естественных условиях 15 лет, показал, что в этих образцах находится уже не 15, а 40% неразложившихся зерен цемента, обломки которых достигают длины 240 мкм. При этом зерна алита (C_3S) даже не вступили в реакцию. Обломки состоят большей частью из алита и алюмоферритов и реже из белита с алюмоферритами. В основной массе встречаются кристаллы карбоната кальция. В другой пробе бетона на портландцементе, твердевшей 15 лет в естественных климатических условиях, также зафиксировано до 40% неразложив-

шегоса цемента, обломки минералов которого встречаются в агрегатах, достигающих размеров 260 мкм и состоящих из белита и алюмоферритов, реже из обломков алита с алюмоферритами.

Следует заметить, что пробы бетона, твердевшего в естественных климатических условиях, взяты из кубов размером $2 \times 2 \times 2$ м. Сказанное подчеркивает значимость учета исходного петрографического состава клинкера для кинетики твердения цемента (определения показателей прочности). Различия в размере кристаллов белита и алита, их расположение в структуре клинкера сказались на последующей гидратационной активности цемента при твердении в бетоне. Следовательно, определив даже через 15 лет наличие в цементе значительного количества зерен нереагировавших с водой и зная, что систематическое упрочнение бетона и повышение его технических свойств прямым образом связаны с непрерывным и постепенным замедляющимся с течением времени включением в процессы гидролиза и гидратации новых количеств цемента, можно утверждать, что сначала пройдет начальная фаза твердения — схватывание. Заметить этот процесс существующими приемами определения схватывания цементного теста в системе цементное тесто + воздух нельзя, так как схватывание протекает не в свежем цементном тесте, а в системе цементный камень + цементное тесто + свободная вода + воздух, и его наличие можно фиксировать по упрочнению цементного камня.

Схватывание, протекающее в относительно короткие сроки на первых этапах твердения, характеризуется превращением пластичного теста в цементный камень в силу отсутствия на поверхности зерен цемента оболочек из продуктов реакции воды с цементом. Не трудно увидеть, как цемент с высоким показателем п. п. п. (см. § 50), т. е. цемент, подвергшийся воздействию паров воды и углекислого газа воздуха в период хранения, при перемешивании с водой уже не позволяет получить пластичное тесто и не твердеет, так как его зерна покрыты продуктами реакции минералов цемента с водой. На поверхности каждого зерна цемента уже прошел процесс схватывания.

Следовательно, фиксируемое нами загустевание пластичного теста, в течение которого в химическую связь с цементом вступает весьма ограниченное количество воды затворения, зависит от того ее количества, при котором цементный камень приобретает проектные показатели прочности и другие свойства, отражает физическую картину сорбции воды поверхностью зерен полиминерального цемента. В табл. VII.21 и VII.24 показаны разные условия сорбции воды цементом тонкомолотым, грубомолотым, с добавками пластификатора (см. § 46 и рис. VII.6), моно- и биминеральным синтетическим. Эти сведения позволяют сделать следующий вывод: а) решающим в сорбции воды и любых электролитов является наличие или отсутствие минерала C_3A в порошках цемента; б) введение пластификатора с. с. б. (или с. д. б.), который частично блокируя поверхность зерен цемента, способствует повышению пластичности теста при тех же соотношениях воды и цемента и, в свою очередь,

подтверждает сказанное в п. а о решающей роли минерала C_3A^* ; в) опыты с резким увеличением водопотребности цемента при затворении его мелких фракций и сокращение сроков схватывания являются результатом наличия в таком мелкомолотом цементе большого количества минерала C_3A , что естественно, если учесть ранее сказанное о его фазовом составе (образовании из расплава при высоких температурах) и роли в промежуточном веществе, заполняющем пространство между кристаллическими образованиями силикатов кальция.

При гидратации алюминатов кальция даже при нормальных температурах и давлениях они образуют различные кристаллические гидроалюминаты (рис. IX.2). Однако сказанное о твердении цемента только тогда имеет практическое значение для производства бетонных работ, когда твердение отдельных зерен, т. е. процесс образования на их поверхности новообразований, меняющих свое физическое состояние от пластичных коллоидных до твердых прочных систем камневидного типа, проходит при максимально возможном их сближении, приводящем к омоноличиванию — связыванию таких зерен продуктами реакции. Примером может служить цемент с избыточным количеством воды, введенной в цементное тесто или бетон, в котором вода затворения не обеспечила плотную укладку заполнителя (песком, гравием, щебнем). Следовательно:

а) механическая прочность бетона (раствора) даже при оптимальных условиях протекания гидролиза и гидратации цемента зависит от степени сближения зерен — плотности их упаковки** или степени их раздвижки водой затворения и растет по мере углубления этих процессов;

* При отсутствии в цементе гипса пластификатор в ряде случаев ускоряет процесс схватывания цементного теста так же, как и при определенном соотношении в цементе действующего C_3A , гипса и с. с. б.

** Плотность упаковки — раскладка, при которой пространство между зернами заполнено водой и в итоге гидролиза и гидратации будет заполнено новообразованиями.

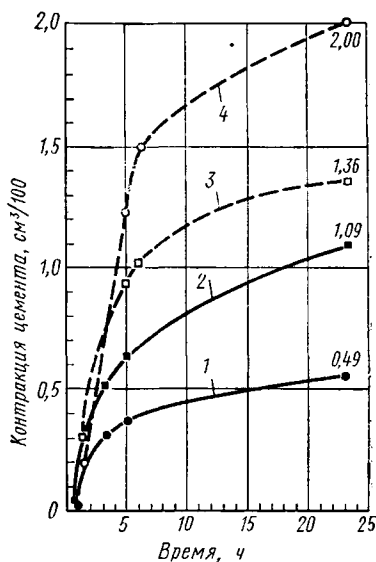


Рис. IX.2. Кривые изменения контракции цемента при нормальных условиях твердения и пропаривания:

1 — нормальное твердение при 18–20°С цемента из 30% балаклейского клинкера, 66% запорожского шлака, 4% гипса, $s=3180 \text{ см}^2/\text{г}$; 2 — нормальное твердение при 18–20°С цемента из 96% балаклейского клинкера, 4% гипса, $s=3075 \text{ см}^2/\text{г}$; 3 — пропаривание по режиму 1,5+3+1+16 ч при 85°С цемента из 96% балаклейского клинкера, 4% гипса; 4 — пропаривание по режиму 1,5+3+1+16 ч при 85°С цемента из 30% балаклейского клинкера, 66% запорожского шлака, 4% гипса, $s=3180 \text{ см}^2/\text{г}$.

б) цементный камень можно получить компрессионным приемом* с минимальной раздвижкой зерен цемента при $V/C \leq 0,08$, и процессы гидролиза и гидратации при этом протекают в иных условиях (в поверхностных слоях), что сказывается на стабилизации роста прочности цементного камня в короткие сроки твердения (примерно 7 сут.);

в) отсутствие систематического постепенного роста прочности при значительно больших значениях $V/C = 0,08$ является следствием ряда причин: грубого помола цемента при отсутствии условий для протекания процесса гидролиза и гидратации; неплотной упаковки материалов (цемента, песка, гравия, щебня); присутствия добавок, блокирующих поверхность зерен цемента от действия воды, следовательно, затормаживания твердения, а в ряде случаев полностью исключающего его дальнейшее развитие; использования цемента, в котором процессы гидролиза и гидратации силикатных фаз блокированы коагуляционными структурами, в том числе гидратированного трехкальциевого алюмината; использования высокобелитовых цементов в условиях, не обеспечивающих их длительной гидратации.

Когда зерна цемента, песка, гравия, щебня в уплотненной смеси окружены воздухом (например, в бетонах на жестких смесях или с избытком воды, затем испарившейся), нельзя прогнозировать кинетику прочности и другие технические свойства материала. В этом случае необходимо проводить прямые лабораторные испытания образцов такого бетона (раствора). В ряде случаев сказанное усложняется условиями твердения, при которых на процессы структурообразования цементного камня накладываются коррозионные процессы, вызывающие в нем и деструкцию, что, в частности, связано с особенностями твердения каждого из минералов цемента.

Так, из табл. I.4 видно, что каждый минерал имеет свои оптимальные влажностные условия для упрочнения в монолит. Твердение порошка белита показывает, что в цементе используется только часть белитовой составляющей, имеющей высокую дисперсность. Причем и для этой составляющей требуются длительные условия гидратации при высокой относительной влажности внешней среды. Для упрочнения теста из трехкальциевого алюмината требуется твердение в среде с минимальной относительной влажностью (например, в пустынях Средней Азии), т. е. в условиях, прямо противоположных твердению белитовой цементной составляющей. Анализируя результаты испытания алюмоферрита, этот минерал, входящий в состав промежуточного вещества, как и трехкальциевый алюминат, можно отнести к воздушным вяжущим. Действительно, при твердении в воде прочность образцов на гидратированном алюмоферрите к годовичному сроку систематически снижается и составляет примерно 50% от прочности семисуточных образцов. В воздушных

* В этом случае под компрессионным приемом понимают уплотнение сухого цемента в специальных формах, рассчитанных на восприятие высоких давлений, а затем подпитки образцов в формах водой.

условиях твердения, при которых прочность образцов приблизительно в 2 раза выше, чем образцов, твердевших во влажных условиях, этот минерал дает максимум прочности к 7 сут.; далее прочность не изменяется. Следовательно, алюмоферрит относится к быстротвердеющим минералам.

Ранее изложенные результаты петрографических испытаний образцов бетона после 15 лет пребывания в разных условиях (в воде и на воздухе) подтверждают приведенные сведения по испытанию образцов на синтетических мономинеральных цементах. Данные исследований и анализ других аналогичных работ позволяют утверждать, что природа длительного упрочнения бетонов (растворов) связана с систематическим углублением гидролиза и гидратации минералов силикатной фазы и последующими процессами перекристаллизации гелевых структур новообразований*.

Показанные в табл. 1.4 низкие прочности растворных образцов из мономинеральных синтетических цементов, входящих в промежуточное вещество (C_3A и C_4AF и аналогичных им, рассмотренных в § 4), отражают не меньшую степень гидратации, а их физическое состояние, в данном случае насыщение водой, как во влажном образце затвердевшего гипса.

Следовательно, ухудшение условий гидратации минералов силикатной фазы, когда прочность ниже предела, связанного с исходной структурой твердеющих минералов, надо отличать от стабильности условий гидратации, когда прочность образцов на минералах промежуточного вещества изменяется вследствие изменения физических условий для структуры новообразований. В частности, многократное разрушение образца из цементного камня на синтетическом минерале C_3A практически не снижает его прочности (табл. IX.9) при содержании одного и того же количества воды.

Анализ табл. IX.9 подтверждает, что твердение образцов (№ 1, 3 и 5) на минерале C_3A заканчивается в ранние сроки и прочность их зависит от влажности, т. е. по мере высыхания (испарения из них влаги) она систематически увеличивается от 3 к 28 сут. и далее, если в образцах еще находилась влага [образцы 7, 11 и 16, в которых прочность увеличивается при сжатии с 213 до 560 кГ/см^2 и при изгибе с 34 до 74 кГ/см^2 (10^{-1} МПа)].

Разброс прочности в показаниях связан с методикой изготовления образцов и, в частности, со сложностью получения материала одной дисперсности при повторных перетираниях кусков уже испытанных образцов цементного камня из C_3AH_6 . Различна также упаковка гидратированного порошка C_3AH_6 , смоченного разным количеством воды.

Сказанное об особенностях многократного упрочнения гидратированного порошка C_3AH_6 из минерала C_3A позволяет выдвинуть

* Относительно быстрый процесс гидролиза и гидратации промежуточной фазы клинкера, несомненно, сказывается на последующем замедлении твердения фазы алита, оптимальными условиями твердения которой является высокая относительная влажность воздуха и отсутствие новообразований из быстротвердеющих минералов, блокирующих доступ воды к зернам цемента.

Таблица IX.9

№ образца	Затворение	Состав исходного материала	В/Ц или V/C_3A или V/C_3AH_6	$V/(C_3A + C_3AH_6)$	Сроки, прошедшие от изготовления до испытания образца, сут.	Условия твердения	Предел прочности образцов, $кг/см^2$ (10^{-1} МПа)	
							при сжатии	при изгибе
1	Первое	Эталон C_3A	0,60	—	3	В насыщенном паре	149	25
2	Второе	C_3AH_6	0,26	0,86	3		Образцы мягкие	
3	Первое	Эталон C_3A	0,60	—	7	В атмосфере насыщенного пара	130	23
4	Второе	C_3AH_6	0,20	0,80	7		13	11
5	Первое	Эталон C_3A	0,60	—	28	То же	140	24
6	Второе	C_3AH_6	0,15	0,75	28		35	21
7	Первое	Эталон C_3A	0,60	—	3	}	213	34
8	Второе	C_3AH_6	0,24	0,84	3		47	15
9	Пятое	C_3AH_6	0,27	1,11	3		40	22
10	Шестое	C_3AH_6	0,36	1,47	4		116	37
11	Первое	Эталон C_3A	0,60	—	7	} На воздухе	476	80
12	Второе	C_3AH_6	0,21	0,81	7		94	35
13	Третье	C_3AH_6	0,27	1,08	7		120	42
14	Четвертое	C_3AH_6	0,26	1,34	7		177	55
15	Пятое	C_3AH_6	0,22	1,56	7		300	73
16	Первое	Эталон C_3A	0,60	—	28	} То же	560	74
17	Второе	C_3AH_6	0,26	0,86	28		200	50

Примечание. Эталонными названы образцы из синтетического минерала C_3A , затворенного при $V/C_3A=0,6$; их испытывали после 3, 7 и 28 сут. твердения при двух условиях хранения — в атмосфере насыщенного пара и на воздухе. Образцы (размером $1 \times 1 \times 1$ см и $1 \times 1 \times 3$ см), изготовленные из $CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 6H_2O$, использовали после твердения 3, 7 и 28 сут., затем после перетирания цементного камня с водой, смешивания, формования и твердения снова в течение 3, 7, 28 сут. и снова использовали.

положение об его глиноподобных свойствах, которые сильно ухудшают технические свойства цементов. Действительно, при одном и том же значении $V/Ц = V/C_3AH_6 = 0,86$ прочность разрушенных и далее перезатворенных образцов различна и связана с влажностью воздуха. Так, образец № 2 при $V/C_3AH_6 = 0,86$ через 3 сут. в атмосфере насыщенного пара еще не затвердел, а образец № 8 при $V/C_3AH_6 = 0,84$ через 3 сут. в тех же условиях упрочнения показал прочности: при сжатии 46 и при изгибе 15 кг/см^2 (10^{-1} МПа), т. е. значительно больше, чем перезатворенные образцы № 4 (при

$B/C_3AH_6=0,8$) на 7 сут. упрочнения, показавшие при сжатии 13 и изгибе 11 кГ/см² (10^{-1} МПа), и образцы № 6 (при $B/C_3AH_6=0,75$) на 28 сут. упрочнения, имевшие при сжатии 35 и изгибе 21 кГ/см², т. е. показатели прочности, близкие с показателями прочности образцов № 8, твердевших на воздухе 3 сут.

Характерно, что лишь многократное перезатворение сглаживает различие в упрочнении образцов после разрушений и последующих изготовлений. Действительно, к прочности эталона № 11, обладающего прочностью при сжатии 476 и изгибе 80 кГ/см² (10^{-1} МПа), наиболее близки образцы пятого перезатворения № 15, имеющие при сжатии 300 и изгибе 73 кГ/см² (10^{-1} МПа), хотя различие в значениях их B/C_3AH_6 значительно — для эталонных образцов оно равно 0,6, для образцов пятого перезатворения 1,56, систематически увеличиваясь от 0,81 для первого перезатворения до 1,56 для последнего. В данном случае $R_6 \neq f(B/C_3A)$, что в скрытом виде отражается при определении прочности бетона на полиминеральных портландцементях и цементах на их основе.

Покажем, как на процесс твердения влияет температурный фактор. Для этого рассмотрим влияние температуры на твердение некоторых минералов цемента. Исследованиями установлено, что при пропаривании образцы, изготовленные на синтетических минералах C_3S , гидратируются быстро, на C_2S и C_4AF — несколько медленнее, а на C_3A — не упрочняются. Однако процесс твердения полиминеральных цементов усложняется при пропаривании, когда одновременно с образованием прочных структур из гидратированных соединений возникают и дефекты в них — протекает процесс деструкции, снижающий технические свойства бетона (раствора) *. Как видно из этих сведений, характер твердения цемента при условно нормальных температурах (15 и 20° С) повторяется и при высоких температурах (до 100° С). При исследовании процесса гидролиза и гидратации отдельных синтетических минералов при разных температурах в силу особенностей этих процессов в разных условиях, приводящих к образованию различных продуктов, только по степени гидратации цемента (минералов) нельзя делать заключение о прочности технического камня (цементного камня, раствора, бетона) и тем более о его технических свойствах.

В настоящее время формирование структур цементного камня в условиях повышенных температур объясняется по-разному: как при исследованиях гидратационной активности цементов в нормальных температурных условиях и высокой относительной влажности (100%), так и в данном случае, когда анализируются условия гидратации мономинеральных синтетических цементов при пропаривании, всегда будет фиксироваться различие в ее определении из-за неодинаковых петрографических характеристик. Действительно, в заводских полиминеральных цементах поверхность зерен силикат-

* Водоотделение после образования цементного теста также следует связывать с образованием дефектных структур в цементном камне и в зонах его контакта с заполнителями.

Т а б л и ц а IX.10

№ образца	Наименование анализируемой пробы	Минералогический состав, %					Свободная СаО, %	Размер кристалла, мкм		Недожог, %	s, см ² /г	Предел прочности при сжатии, кг/см ² (10 ⁻¹ МПа)	
		алита *	белита *	промежуточное вещество	C ₂ A	*алита		*белита*	7 сут.			28 сут.	
Цемент на клинкере № 1													
1	Исходный клинкер без распада	45	25	30	4	Единичные гнезда	25—45	25—55	5	3720	174	280	
2	Отсев 0,15 мм	40	25	35	6	6 гнезд	20—30	20—40	10	2580	56	91	
3	Цементный песок 0,15—2,5 мм	40	25	35	6	Единичные гнезда	25—35	25—45	5	4030	143	225	
4	Отсев 0,15 мм	40	25	35	5	4 гнезда	20—40	25—40	5	2460	67	108	
5	Цементный песок 0,15—2,5 мм	45	25	30	4	—	30—50	30—45	Единичное содержание	3650	175	290	
6	Отсев 0,15 мм	45	25	30	2	Единичные гнезда	20—45	30—45	То же	1800	49	89	
7	Цементный песок 0,15—2,5 мм	45	25	30	2	То же	25—45	25—40	„	3980	174	263	
8	Остаток	50	20	30	3	—	25—45	30—45	—	3830	182	276	
Цемент на клинкере № 2													
9	Исходный клинкер без распада	50	25	25	6—7	5—6 гнезд	30—45	25—35	10	3260	115	174	
10	Отсев 0,15 мм	55	10	35	7	3—4 гнезда	30—45	25—30	25—30	2400	59	92	
11	Цементный песок 0,15—2,5 мм	45	25	30	5	24 гнезда	30—45	25—35	5—10	4200	104	154	
12	Отсев 0,15 мм	50	20	30	7	9 гнезд	30—50	30—40	10—15	—	56	112	
13	Цементный песок 0,15—2,5 мм	45	30	25	6	17 гнезд	30—50	30—40	До 5	3700	122	186	
14	Отсев 0,15 мм	45	25	30	7	5 гнезд	30—45	30—40	5—10	2200	40	99	
15	Цементный песок 0,15—2,5 мм	45	30	25	6	3—4 гнезда	30—50	25—45	Единичное содержание	3300	134	204	
16	Остаток	45	30	25	6	—	30—50	30—45	То же	3500	128	187	

* Для полиминеральных цементов правильное говорить о наличии в них не чистых **трек**- и двухкальциевых силикатов (C₃S и C₂S), а алита и белита.

Примечание. В таблице приведены показатели прочности стандартных растворных образцов размеров 7,07×7,07×7,07 см состава 1:3 с добавкой 3% гипса.

ных минералов в большей или меньшей степени и по-разному контактирует с промежуточным веществом (о составе и твердении его двух составляющих — минералов C_3A и C_4AF ранее было сказано). Следовательно, промежуточное вещество в определенной мере замедляет смачивание водой поверхности части зерен минералов C_3S и C_2S и тормозит процессы их гидролиза и гидратации.

На такое замедление будет также влиять качество поверхности зерен из них — ее гидравлическая активность. Это во многом объясняет различие в прочности цементов, практически имеющих одинаковые минералогические составы и тонкость измельчения. Только после снятия наслоений промежуточного вещества с поверхности зерен алита и белита путем помола до дисперсности, соответствующей сказанному, в полной степени проявится гидравлическая активность последних. В табл. IX.10 и IX.11 помещены результаты опытов, в которых показано, как меняется минералогический состав цемента при его дробном помоле и какие при этом получают прочностные показатели образцов.

Опыты помола клинкера из зерен различного размера показывают, что от технологии обжига клинкера и других технологических особенностей производства (топлива, исходного сырья, качества его помола и смешивания и др.) зависит минералогический состав и свойства цемента, в данном случае различная прочность.

Характер размалываемости клинкера, изменение его минералогического состава и прочности образцов на таких цементах автор учебника проверил следующим приемом: 1) 5 кг клинкера двух различных заводов размалывали — дробили одними и тем же шарами (крупного размера) в лабораторной мельнице на протяжении одинаковых отрезков времени; в табл. IX.10 и IX.11 такие навески названы исходным клинкером без отсева; 2) полученный при таком дроблении материал рассеивали на три пробы: мелкий, проходящий через сито с отверстиями 0,15 мм и названный отсевом 0,15 мм; средней крупности от 0,15 до 2,5 мм, названный цементным песком; частицы наибольшей крупности 2,5 мм (крупка), подвергающиеся последующему помолу по аналогии с исходным клинкером. Крупка от второго дробления, проводимого по указанной методике, также дифференцировалась на три части.

В итоге помола для каждого клинкера было получено по три пробы отсева — 0,15 мм, три пробы цементного песка — 0,15—2,5 мм и остаток (крупка, не подвергавшаяся последующему измельчению).

Вышесказанное позволило минералогический состав используемых цементов называть «действующим минералогическим составом» в отличие от: 1) расчетного минералогического состава, который рассчитывают на основании химического состава клинкера, позволяющего определять его «валовой» состав, т. е. состав, не дифференцированный по действующей с водой поверхности зерен (состав без учета его распределения, вида и размера минералов в зернах клинкера); 2) петрографического, когда имеется большее приближение минералогического состава к действующему, так как в этом случае под микроскопом определяется минералогический состав поверхно-

Таблица IX.11

№ образца	Цикл дробления	Наименование анализируемой пробы	Содержание зерен мельче 40 мкм, %	Содержание минерала C_3A , %			
				в навеске из зерен мельче 40 мкм	в 100% навески	взловое	в мелкой фракции, % к взловому

Цемент на клинкере № 1

1	I	Исходный клинкер без рассева	68,6	4,4	3,0	4,3	70
2		Отсев 0,15 мм	60,5	6,1	3,7	5,7	65
3		Цементный песок 0,15—2,5 мм	48,0	6,9	3,3	5,9	55
4	II	Отсев 0,15 мм	60,0	5,2	3,1	4,0	77
5		Цементный песок 0,15—2,5 мм	59,5	5,5	3,3	4,9	67
6	III	Отсев 0,15 мм	65,7	2,7	1,8	2,1	86
7		Цементный песок 0,15—2,5 мм	43,5	3,0	1,3	2,0	65
		Остаток	65,5	2,6	1,7	2,8	61

Цемент на клинкере № 2

9	I	Исходный клинкер без рассева	67,0	5,8	3,9	5,9	66
10		Отсев 0,15 мм	60,0	7,6	4,6	5,3	85
11		Цементный песок 0,15—2,5 мм	61,0	8,1	4,9	7,2	68
12	II	Отсев 0,15 мм	66,4	7,6	5,0	6,1	82
13		Цементный песок 0,15—2,5 мм	54,0	6,1	3,3	6,8	49
14	III	Отсев 0,15 мм	62,5	6,5	4,1	6,0	68
15		Цементный песок 0,15—2,5 мм	54,5	7,2	3,9	7,0	56
16		Остаток	70,5	5,8	4,1	5,9	69,4

сти зерен, которые несколько мельче зерен цемента, и дополнительно измельчаются для микроскопического анализа. Анализ приведенных сведений позволяет написать зависимость действующего минералогического состава от его дисперсности, условно выражаемой через показатель удельной поверхности $M_d = \bar{f}(s)$.

Действительно, зная, что твердость минералов, составляющих клинкер, различна и что это обстоятельство скажется на избирательном характере дробления зерен клинкера (в частности, дроблении по местам скопления алюминатной фазы), можно было ожидать отражения этого факта при осуществлении дробного — дифференцированного по этапам помола, позволяющего отбирать цемент по указанным характеристикам. В таком приеме исследования можно проверить и равномерность состава клинкера. Если бы все пробы имели один минералогический состав, который был определен с помощью микроскопа, то качество клинкера следовало бы оценивать с позиций его применения как практически однородного материала.

Из анализа табл. IX.10 и IX.11 можно сделать следующие выводы, подтверждающие сказанное:

1. Клинкеры № 1 и 2 с близкими минералогическими составами обладают различными свойствами, что видно по изменению минералогических составов отдельных порций цемента при их дробном помоле и различию показателей прочности образцов. Так, в обоих клинкерах первые пробы (I цикл дробления) имеют повышенное содержание зерен «недожога», количество которого уменьшается к III циклу дробления (для клинкера № 1 содержание наиболее слабых зерен клинкера «недожога» в начале дробления увеличивается с 5 до 10%, для клинкера № 2 — с 10 до 25—30%, а по мере дробления соответственно уменьшается для клинкера № 1 с 10 до 5% и сходит на нет, а для клинкера № 2 с 25—30 до 10—15%, 5—10% и доходит до единичного содержания).

Этот показатель позволяет считать, что качество клинкера № 1 выше, чем у клинкера № 2. Из сравнения показателей механической прочности образцов на этих цементах видно, как значительно снижается их прочность из-за наличия зерен клинкера «недожога». Например, прочность образцов № 2 одинакова с прочностью образцов № 10, у которых значительно больше алита (55 против 40%) при практически равных удельных поверхностях цемента и образцов № 3 по сравнению с образцами № 11 и т. д.

2. Наличие в исходном клинкере «недожога» указывает на недопустимость применения клинкера ухудшенной структуры, о которой следует судить по виду аншлифов клинкера и содержанию в нем повышенного количества свободной CaO .

3. Равномерность качества клинкера также выражается через стабильность содержания минералов силикатной группы (C_3S и C_2S) и их качество, условно определяемые размерами кристаллов (для клинкера № 1 стабильность этих показателей высокая, чего нет у клинкера № 2). Действительно, если в образцах № 1 минерала C_2S во всех пробах содержится 25% (кроме последней пробы, где его 20%), то в образцах № 2 — от 10 до 30%, при этом значительно выше пределы колебания промежуточного вещества от 25 до 35% против колебания промежуточного вещества в клинкере № 1, где оно достигает лишь 5%).

4. Отсев при помоле клинкера из-за содержания в нем «недожога» сразу же получается с тонкостью помола обычных цементов и составляет до 1800—2400 $\text{см}^2/\text{г}$; в клинкере № 2 в образцах № 10, где особенно много «недожога», — до 25—30% в I цикле дробления, при этом процессе резко уменьшается содержание минерала C_2S (с 25 до 10%) и повышается количество минерала C_3S (с 50 до 55%). Следует учитывать, что труднее размалывается минерал C_2S , следовательно, сказанное выше подтверждает неравномерность распределения в клинкере минералов силикатной группы и особенности их структур (меньшую гидратационную активность).

Характерно, что с уменьшением содержания «недожога» при стабильном количестве минерала C_2S тонкость помола клинкера, получающегося в отвесах 0,15 мм, систематически уменьшается. Например, для клинкера № 1 это видно на пробах № 1 и 6 ($s = 2580 \text{ см}^2/\text{г}$ — отсев от первого дробления, до $s = 1800 \text{ см}^2/\text{г}$ — отсев

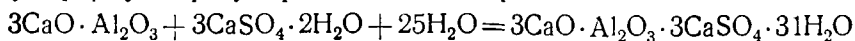
от третьего дробления) и для клинкера № 2, в которых становится меньше «недожога», но больше минерала C_2S — стабилизируется уровень дисперсности цементного порошка (пробы № 10 и 14, в которых «недожог» уменьшается с 25—30 до 5—10%, а содержание минерала C_2S возрастает с 10 до 25%).

В каждом конкретном случае сказанное об анализе клинкера надо сопровождать анализом структуры аншлифов и термохимическим анализом ДТА продуктов гидролиза и гидратации проб цемента. Приведенные факты позволяют отметить наличие в тонких фракциях цемента в случае размолы клинкера со структурой клинкера по типу структуры № 2, малсаживных зерен цемента при одновременном наличии в них значительного количества зерен активного алита. Особое внимание следует обращать на повышенное содержание минерала C_3A в тонких фракциях зерен цемента (см. табл. IX.11).

Независимо от качества любого из рассмотренных клинкеров ранее сказанное о минералах, покрывающих поверхности зерен алита и белита (минералов силикатной группы C_3S и C_2S), т. е. о минералах промежуточного вещества — минералах плазней, позволивших снизить температуру спекания CaO и SiO_2 до уровня применяемых ныне технологических температур (1450—1600° C) в цементных печах (табл. IX.12), проявляется в наличии больших количеств минерала C_3A на поверхности именно мелких зерен цемента. Оно численно приближается к количеству, рассчитанному на основании химических анализов, или к его валовому содержанию.

Из табл. IX.10 видно, что в мелкой фракции (>40 мкм) в пробах разного цикла дробления содержится от 56 до 86% минерала C_3A для клинкера № 1 и соответственно — от 49 до 85% для клинкера № 2. В каждом из этих клинкеров для разных проб различно и количество минерала C_3A . Это говорит о неравномерном содержании в промежуточном веществе клинкеров минерала C_3A и необходимости учета сказанного, в частности, при назначении дозировки гипса (см. § 13), который регулирует сроки схватывания цемента, разрушает коагуляционные структуры из гидратированного алюмината, повышает сульфатостойкость цементного камня (или обеспечивает его сульфатостойкость) и различные технические свойства бетонов (растворов).

Материалы табл. IX.12 подтверждают наше положение о важности учета действующего минералогического состава зерен цемента. Даже при средних значениях количества минерала C_3A в промежуточном веществе не удастся ввести в процесс гидратации все количество цемента заводских помолов, следовательно, связать гидратированный трехкальциевый алюминат с гипсом в высокосульфатную форму гидросульфеоалюмината по реакции



В сульфатостойких цементах по этой причине принято уменьшать содержание минерала C_3A до 5%, что обеспечивает связывание большого количества этого минерала в первый период гидро-

лиза и гидратации силикатных минералов, сводя к минимуму деструкцию цементного камня. Сказанное имеет особо важное значение при тепловлажностных режимах твердения цемента. Приведенные сведения не были известны, например, проф. Д. Н. Алексееву, который начал еще в 1911 г. проводить опыты по пропариванию камней для стен из бетона. Следует учесть, что в те годы цементы не имели высококачественной структуры клинкера и температуры пропаривания не превышали 75° С. Автор указанных работ пришел к правильному выводу о том, что продолжительность пропаривания не должна превышать определенных пределов. Указанные пределы температуры пропаривания близки по своим значениям к рекомендуемым теперь при пропаривании бетонов на портландцементях.

Т а б л и ц а IX.12

Оксиды, входящие в сырье для клинкера портланд- цемента, и их системы	Температура плавления оксидов, °С	Температура плавления системы оксидов, °С
CaO	2570	—
SiO ₂	1713	—
CaO—SiO ₂	—	2065
CaO—SiO ₂ —Al ₂ O ₃	—	1455
CaO—SiO ₂ —Al ₂ O ₃ —Fe ₂ O ₃	—	1340
CaO—SiO ₂ —Al ₂ O ₃ —Fe ₂ O ₃ —MgO	—	1300

Ученые отмечают, что если в камерах пропаривания повышать температуру примерно до 80° С, на поверхности бетонных конструкций в слое конденсированной влаги образуются пузыри, что связано с миграцией воздуха из бетона во внешнюю среду из-за повышения в нем давления. Наибольший выход воздуха, а следовательно, его расширение относится к периоду подъема температуры до перехода процесса пропаривания в стадию изотермического прогрева.

Естественно, при повышении температуры пропариваемого бетона образцы, изделия и конструкции, изготовленные из него, расширяются. В первый период прогрева бетона вследствие влаго- и термовлагопроводности вода мигрирует от периферийных слоев к центру изделия (слою бетона с меньшей температурой). При замораживании бетона вода из внутренних, более теплых зон, мигрирует к периферии образцов — к охлажденной поверхности, что в случае неморозостойких бетонов приводит к началу их разрушения именно с внешних зон.

При выдержке изделий до подъема температуры в камере пропаривания проходят четыре этапа твердения, а при подъеме температуры сразу вслед за формованием бетонной (растворной) смеси — три этапа. Первый этап (при четырехэтапном твердении) — выдержка бетона перед пропариванием в температурных условиях формования смесей. Далее в каждом из двух приемов пропаривания наступает второй этап (после выдержки, продолжительность которой определяется рядом условий, излагаемых ниже, и временем, связанным с операциями по передаче изделий, подвергаемых тепловлажностной обработке, с поста формования на пост пропаривания,

а при пропаривании на месте формирования — временем, которое необходимо для организации процесса пропаривания — постепенный разогрев бетона в деталях, изделиях и конструкциях; третий этап — изотермический прогрев*; четвертый — постепенное снижение температуры в пропариваемом бетоне.

Рассмотрим каждый из этапов, учитывая сказанное об особенностях гидролиза и гидратации полиминеральных портландцементов и цементов на их основе. Заметим, что в случае применения пластичных бетонных смесей на портландцементах ускорение твердения к моменту окончания пропаривания, как правило, доходит до $0,7—0,8 R_{28}$ нормального твердения.

Этап предварительной выдержки бетона перед подъемом температуры в камере пропаривания. Многочисленными опытами показано, что выдержка бетона после изготовления до подъема температуры в камере пропаривания (или температуры изделия, детали, конструкции) повышает технические свойства бетона. Следует рассмотреть причины улучшения процесса твердения цемента при повышенных температурах после предварительного выдерживания бетона (раствора). Для этого используем изложенные ранее факты, связанные с особенностями гидролиза и гидратации полиминеральных цементов в различных условиях внешней среды, а также сопутствующие пропариванию физические процессы.

В любом цементе часть воды (см. § 8 и 58), идущей для приготовления цементного теста, растворной и бетонной смесей, остается вне химической связи с цементом. Эта свободная вода, в свою очередь, в различной степени физически связана с твердыми материалами. Естественно предположить, что при нагревании изделий в камерах пропаривания (или при ином способе нагревания изделий) выявятся особенности такого различия физической связи воды с твердым материалом. Как известно, при замешивании цемента с водой в образующемся цементном тесте находится значительное количество воздуха. В зависимости от химико-минералогического и зернового составов цементного порошка, свежести его поверхности, а также температуры внешней среды, в цементном тесте с большей или меньшей скоростью происходит вовлечение воздуха в капилляры, образующиеся при гидролизе и гидратации (см. § 11).

Воздух при нагревании расширяется значительно больше, чем вода и цементный камень (объемное расширение влажного воздуха при температуре от 60 до 80°C составляет примерно $(4000—9000) \times 10^{-6} \text{ м}^3/\text{м}^3 \cdot ^{\circ}\text{C}$, что в $8—14$ раз выше объемного расширения воды и в 120 раз выше объемного расширения цементного камня). Многочисленными опытами подтверждено, что в сложной многокомпонентной системе цементное тесто — цементный камень — свободная вода — песок — гравий (щебень) — воздух большее термическое расширение системы (материала) связано и с большим содержанием в ней свободной воды, что закономерно, учитывая коэффициенты объемного расширения.

* Под изотермическим прогревом понимают прогрев при стабильных температурных условиях.

Предел прочности образцов, кг/см^2 (10^{-1} МПа)

Режим пропаривания				Цемент из 100% клинкера				Цемент из 49% клинкера и 51% основного шлака												
Выдержка до пропаривания при 20° С, ч	Потем температур до 92–55° С, ч	Пропаривание под давлением 40 Т/см² (10 ⁻¹ кПа), ч	Пропаривание в откритых формах без прироста, ч	Остатание в камере от 80 до 20° С, ч	Продолжительность твердения образцов, сут.															
					1		7		28		90		1		7		28		90	
					при сжа- тии	при изгибе	при сжа- тии	при изгибе	при сжа- тии	при изгибе	при сжа- тии	при изгибе	при сжа- тии	при изгибе	при сжа- тии	при изгибе	при сжа- тии	при изгибе		
Нормально-влажное твердение эталонных образцов					214	42	491	67	538	68	666	81	67	14	326	49	420	65	642	77
6	3	—	6	7–8	205	38	544	61	590	67	738	89	418	48	460	48	533	53	650	67
6	3	6	—	7–8	401	55	464	56	533	57	619	63	424	53	456	48	547	66	667	80
1	0	—	6	7–8	340	55	521	56	545	58	668	68	227	35	286	43	356	48	431	65
1	0	—	6	7–8	195	30	140	37	177	42	293	42	385	45	421	50	458	60	604	68
1	0	6	—	7–8	344	42	412	51	445	54	627	69	360	45	431	51	463	53	607	76
1	0	1	5	7–8	387	48	467	57	486	58	546	60	300	49	362	50	503	59	601	79
1	0	2	4	7–8	437	48	479	57	480	57	597	68	304	51	356	50	467	58	592	83

Анализируя приведенные цифры и физико-химический процесс, связанный с образованием капиллярной пористости в цементном камне, можно утверждать, что при прочих равных условиях характер пористости будет зависеть от наличия свободной воды в материале, подъема температуры бетона (раствора), что связано со временем после его изготовления*.

При прочих условиях воздух оказывает решающее значение в процессах деструкций при неумелой тепловлажностной обработке материала. Учитывая особенность формирования структуры цементного камня на полиминеральных цементах с различной водоудерживающей способностью (различным выделением свободной воды из формирующегося цементного теста) и различным содержанием воздуха, для снижения деформации цементного камня важно в период пропаривания организовать твердение таким образом, чтобы в образующихся капиллярах мог разместиться нагретый влажный воздух. Опыты показывают, что для этого необходимо выдерживать изделие или применять цементы, в которых при повышении температуры процесс гидролиза и гидратации обеспечивает резкий рост капиллярной системы, опережающий изменение объема влажного воздуха. Такими цементами, например, являются шлакопортландцементы тонкого помола с высоким содержанием активного гранулированного доменного шлака (табл. IX.13, рис. IX.2). В табл.

Таблица IX.14

Горная порода	Среднее значение α^* в интервале температур 20—100° C	Горная порода	Среднее значение α^* в интервале температур 20—100° C
Известняки	8 ± 4	Граниты	8 ± 3
Мраморы	7 ± 2	Диориты	7 ± 2
Глинистые сланцы	9 ± 1	Габбро и диабазы	5,4 ± 1
Песчаники	10 ± 2	Бетон	14
Кварциты	11		

* Тепловое расширение — изменение формы и объема разных систем, в том числе горных пород, определяется коэффициентом объемного или линейного расширения α . Коэффициент («мгновенный») $\alpha_v'' = \frac{1}{V} \left(\frac{dV}{dT} \right)_p$. Для удобства вычисления средний коэффициент объемного расширения предложено выражать через $\alpha = \frac{1}{V_0} \cdot \frac{V_T - V_0}{T - T_0}$ (здесь V_0 — объем тела при исходной температуре T_0). В таблице $\alpha = \frac{1}{L} \cdot \frac{\Delta L}{\Delta T} \cdot 10^6$ — средний коэффициент линейного расширения (где L — длина тела при исходной температуре T). Для перехода от объемного расширения породы к линейному с точностью, необходимой для практических целей, численные значения α уменьшают в три раза ($\alpha_{\text{линейн.расш}} = \frac{1}{3} \alpha_{\text{объемн.расш}}$).

* Любое расширение воздуха нельзя рассматривать вне хода процесса контракции и вызываемого ею внутреннего вакуума. Важно добиваться наибольшего диспергирования воздушных пузырьков за счет этого процесса и их размещения в «торцах» образующихся капилляров.

IX.14 приведены показатели термического расширения горных пород, используемых в качестве заполнителя в растворах и бетонах.

Приведенные в табл. IX.14 цифры показывают, что числовые значения характеристик термического расширения близки к соответствующим характеристикам твердеющего цемента; это дает основание показателями объемного расширения воды и влажного воздуха определять наличие и величину деструктивных процессов. Исследования процессов твердения различных минералов показали, что необходимо:

1) оценивать скорость и результат твердения полиминеральных портландцементов не только по их минералогическому составу, но также и по величине кристаллов силиката кальция (алита и бели-та), их строению и расположению в зернах клинкера, по гранулометрии цементов (а не только по тонкости помола, определяемой по остаткам на ситах или по удельной поверхности цемента);

2) оценивать скорость и результат гидролиза и гидратации портландцемента с обязательным учетом особенностей формирования структур новообразований из исключительно быстротвердеющего даже в обычных условиях минерала C_3A , который при пропаривании образует рыхлые массы ультратонкозернистых частиц, близких по размеру к гелевым, покрывающим зерна силиката кальция, затрудняя к ним и от них доступ воды и вынос в воде диссоциированных соединений; сказанное прямым образом связано с действующим количеством минерала C_3A , содержащегося в цементе, и с количеством гипса ($CaSO_4 \cdot 2H_2O$), который будет участвовать в первые сроки твердения в разрушении коагуляционных структур C_3AH_6 , образовавшихся из гидратированного минерала $C_3\bar{A}$;

3) оценивать скорость и результат твердения с учетом возможности протекания деструктивных процессов в силу значительного снижения растворимости извести $Ca(OH)_2$, которая образовалась при гидролизе и гидратации алита из-за повышения температуры воды, реагирующей с зернами цемента, и, следовательно, наличия в твердеющей системе пересыщенных растворов и образования кристаллических сростков из $Ca(OH)_2$ или на ее основе *;

4) оценивать скорость и результат твердения с учетом свежести поверхностного слоя зерен цемента, а также наличия в цементе минеральных добавок, ПАВ и электролитов;

5) оценивать скорость и результат твердения с учетом наличия в клинкере, из которого помолот цемент, слабообожженного клинкера и несвязанных соединений (CaO , MgO , Fe_2O_3 , Na_2O , K_2O и др.).

Применяя выдержку при ускоренном твердении бетонов (растворов), влияние новообразований в цементном камне можно в большей мере скорректировать (см. рис. IX.2).

* Различные цементы показали, что с увеличением содержания в цементе минерала C_3S (примерно выше 50—55%) прочность цементного камня бетона (раствора), подвергавшегося тепловлажностной обработке, систематически снижается.

Период подъема температуры. В зависимости от модуля поверхности ($M_n = s/V$, где s — поверхность изделия; V — объем изделия) пропариваемого изделия необходимо назначать скорость подъема температуры в камере пропаривания. Производственники для увеличения оборачиваемости форм и производительности предприятия стремятся получать от лабораторий рекомендации по наиболее короткому режиму пропаривания, в том числе этапа подъема температуры, изотермического прогресса и охлаждения изделия.

Рассмотрим, в каких пределах времени такое форсирование процесса при существующих составах портландцемента и бетонов не будет влиять на качество работ. При прочих равных условиях (т. е. вида и марки цемента, состава бетонной и растворной смеси, времени предварительной выдержки и температуры, при которой изделие твердело) скорость подъема температуры зависит от массивности изделия. На основании больших сроков эксплуатации предприятий по изготовлению конструкций рекомендуются следующие скорости подъема температуры: для тонкостенных деталей и конструкций (балконных, дорожных и аэродромных плит, блоков тоннельной обделки, пустотелых плит междуэтажных перекрытий, пустотелых камней и т. д.) — 2—3 ч, для массивных деталей и конструкций (блоков фундаментов, пролетных строений мостов, колонн и т. д.) — 3—4 ч. Следовательно, для пропаривания конструкций, например, при 70° С в первом случае, считая, что температура помещения имеет 15° С, скорость подъема температуры в час составит $55 : 2 = 27,5$ или $55 : 3 = 18^{\circ}$ С. Необходимо следить за равномерностью подъема температуры в бетоне. В табл. IX.15 показано, какое влияние имеет этот факт даже при пропаривании растворных образцов состава 1 : 3 небольшого размера (4×4×16 см) на портландцементе с добавкой с. д. б.

Как видно из табл. IV.15, вспучивание материала произошло из-за резкого ускорения подъема температуры в интервале от 42 до 60° С. Действительно, если на этапе подъема температуры от 20 до 42° С изменение температуры соответствовало 22° С в час, то последующий период нагрева от 42 до 60° С, когда даже без приборов отмечаются процессы деструкции, соответствовал подъему температуры 72° С в час. В этот период наметившееся нарушение сплошности образца исправить нельзя, так как в условиях пропаривания сформировались необратимые связи.

Следует заметить, что хотя из общего количества цемента, находящегося в образце на указанный период времени, с водой реагирует относительно небольшая его часть, процесс деструкции не изолирован и пронизывает, в основном, все цементное тесто — цементный камень по контакту между новообразованиями и по их контакту с поверхностью зерен песка. Некоторые специалисты считают, что на деструкцию материала в этом случае оказывает большое влияние различие коэффициентов объемного расширения компонентов, составляющих бетон (раствор).

Даже в нормальных температурных условиях через 60 мин с алитом химически связывается 0,8% воды, а к 5 ч — до 2%. Если бы

Время от начала приготовления кубиков, ч-мин	Режим пропаривания	Продолжительность периода, мин	Температура окружающей среды	Внешний вид образцов
0-40	Выдержка	40	20	Нормальная поверхность
1-40	Подъем температуры	60	До 42	То же
1-55	Дальнейший подъем температуры	15	» 60	Появились следы выхода воздуха и небольшое вспучивание поверхности
2-40	То же	45	» 70	Увеличение вспучивания
2-55	»	15	» 80	То же
3-20	»	25	» 90*	Кроме вспучивания появилась продольная трещина по верхней грани
8-50**	Резкое охлаждение	90	» 17*	Кроме нарушения сплошности появились новые трещины

* Температура внутри образца 75° С.

** Изотермический прогрев 4 ч.

Примечание. Сведения этой таблицы следует сопоставить со сведениями графика на рис. IX.2.

химическое связывание воды не проходило в уплотненном материале, где predetermined условия образования пересыщенных растворов и выпадение в осадок кристаллических соединений, образующих прочные связи в растворах и бетонах, химически связанная вода не predetermined бы сказанного о невозможности исправления дефектов в образовавшемся материале. Новообразования из минерала C_4AF также создают каркасные связи. Это можно увидеть и из опытов по многократному повторному вибрированию бетонов (см. § 72). Несомненно, содержание в бетонах (растворах) свободной воды, воздуха, виды и марки цемента имеют решающее значение при уточнении сроков подъема температуры изделий. Так же как и при назначении сроков выдержки изделия до пропаривания, следует учитывать, что отрицательную роль особо быстро формирующихся при пропаривании коагуляционных структур гидроалюминатов можно исключить из сферы действия, регулируя тонкость помола цемента и точно дозируя гипс для образования гидросульфоалюмината. Следует также учитывать возможность ускорения подъема температуры пропаривания до надлежащего уровня (до заданного максимума) за счет разогрева смесей. В этом случае весьма целесообразно затворять смеси на воде, нагретой до кипения [35, 49].

Период изотермического прогрева. Для различных видов и марок портландцемента имеет значение температура, при которой

протекает изотермический прогрев. Как правило, бетоны на портландцементе пропаривают при температуре не выше 80°C , а бетоны на шлакопортландцементе тонкого помола с высоким содержанием шлаков (более 60%) — при температуре 100°C или близкой к ней. Если в вопросах назначения сроков первых двух этапов пропаривания мнение большинства исследователей сходится, то по этапу изотермического прогрева нет одинаковых мнений. Продолжительность изотермического прогрева составляет 2—18 ч и более. Сказанное объясняется отсутствием у экспериментаторов надежных исходных сведений, без которых невозможно сравнивать опытные данные (например, нет необходимых широких сведений о составе цемента). Однако на этапе изотермического прогрева происходит не только перерасход пара, но и испарение воды из бетона (раствора).

Существуют и другие режимы пропаривания бетонов (растворов) с различной продолжительностью изотермического прогрева [35, 38, 39]: ступенчатый, без изотермического этапа, с применением повторного вибрирования. В случае исключения этапа изотермического прогрева по принципу нестационарного пропаривания (разогрева и остывания) изделия вода из бетона не испаряется, пропаривание осуществляется в среде с высокой относительной влажностью, так как пар остается насыщенным и остывающие изделия покрыты влагой, конденсирующейся из воздуха. Данный прием пропаривания позволяет экономить топливо. Перечисленные режимы пропаривания можно осуществлять с применением автоматического регулирования процесса по заданной программе.

Рассмотренные этапы пропаривания (табл. IX.16), как и любые приемы тепловлажностной обработки, должны осуществляться без испарения воды из бетона (при электропрогреве, применении электротермоактивной опалубки, автоклавной обработке и др.).

Изготовление сборных бетонных и железобетонных изделий при тепловлажностной обработке бетонов (растворов) в герметически закрытых термоформах с пригрузом позволяет резко ускорить все этапы процесса. В этом случае не допускается деформирование твердеющего бетона. В последнее время в ряде исследований совершенно правильно обращено внимание на влияние экзотермии цемента при пропаривании бетонов (растворов) на процессы структурообразования цементного камня. Таким образом, при пропаривании особенно важное значение имеет выбор цемента.

Период снижения температуры бетона (раствора) в пропаренных деталях (конструкциях). После пропаривания (или иного приема тепловой обработки) детали (конструкции) в случае изотермического прогрева должны охлаждаться до температуры внешней среды за тот же период, который затрачен на их разогрев. В ряде случаев при сокращенных сроках изотермического прогрева для получения изделий (конструкций) заданной прочности ($0,7—0,8 R_{28}$) этот срок охлаждения значительно увеличивается (до 10—14 ч), что определяется необходимостью охлаждения камер пропаривания (зависит от степени их герметичности).

Таблица IX.16

№ п.п.	Минералогический состав цемента, %			В бетоне содержится		Предел прочности при сжатии, кг/см ² (10 ⁻¹ МПа)					Режим пропаривания, ч				Предел прочности при нормальном твердении, %			
	C ₃ S	C ₂ S	C ₄ A	Промежуточное вещество	цементы	3	Продолжительность нормального твердения, сут.		ч	Продолжительность после пропаривания, сут.			Выдержка	Плавом тем-ператур до 80°С		Изотермический пропарив	Снижение тем-ператур до 52-57°С	
							7	28		1-2	3	7						28
1*	45	30	7,5	25	460	403	550	565	289	—	—	468	535	—	2	2	2*	51,3
2	45	30	7,5	25	460	403	550	565	451	—	—	468	535	—	2	2	10	80,0
3	45	30	7,5	25	460	403	550	565	516	—	—	409	564	—	2	2	13	91,5
4	45	30	7,5	25	460	403	550	565	518	—	—	499	544	—	2	2	13	91,5
5	45	30	7,5	25	460	403	550	565	528	—	—	—	525	—	2	2	12	93,5
6	45	30	7,5	25	460	403	550	565	491	—	—	—	519	—	10	2	2	87,0
7	45	30	7,5	25	450	—	—	527	450	—	—	—	502	—	2	2	13	85,4
8	45	30	7,5	25	450	160	—	483	417	—	—	—	517	—	2	2	13	86,4
9	45	30	7,5	25	450	170	—	427	343	—	—	—	510	—	2	2	13	80,6
10	45	25	8,1	30	450	415	462	548	289	—	—	482	558	—	2	2	2*	52,6
11	45	25	8,1	30	450	415	462	548	493	466	—	477	522	—	2	2	10	89,5
12	45	25	8,1	30	450	415	462	548	493	—	—	477	522	—	2	2	10	80,5
13	45	25	8,1	30	450	418	462	540	494	—	—	—	—	—	10	8	1*	91,5
14	45	25	8,1	30	450	418	462	540	530	—	—	—	602	—	2	2	10	98,0
15	45	25	8,1	30	450	375	471	506	455	460	—	492	—	—	3	8	1*	89,6
16	45	25	8,1	30	450	375	471	506	241	460	—	492	—	—	2	2	10	47,8
17	45	25	8,1	30	450	375	471	506	328	460	—	492	486	—	2	2	1**	64,8
18	45	25	8,1	30	450	466	467	534	442	416	—	464	484	—	2	2	10	83,0
19	45	25	8,1	30	450	354	458	509	356	464	—	507	493	—	2	2	10	70,0
20	45	25	8,1	30	450	278	357	375	268	338	—	339	390	—	2	2	10	71,5

* Образцы вынимали из камеры пропаривания при температуре 70—80° С.

** Образцы твердели 15 ч в открытой камере пропаривания.

Примечания: 1. Для цемента № 1—9 $R_d=600$ кг/см² (10^{-1} МПа), н. г.=25%.2. Для цементов № 10—20 $R_d=640$ кг/см² (10^{-1} МПа), н. г.=29,5%. Цемент содержит гидравлическую добавку.

В других случаях, когда по тем или иным причинам нужно ускорить охлаждение изделий (конструкций), продолжительность охлаждения должна обеспечить сплошность бетона — хрупкого материала, коэффициенты теплового расширения которого близки к аналогичным коэффициентам таких горных пород, как кварциты, песчаники, известняки (см. табл. IX.14). Резкое охлаждение изделий (конструкций) приводит к появлению в них трещин. В табл. IX.16, X.5 и X.6 приведены сведения о выборе составов бетона и цемента для случаев, когда необходимо применить ускоренные режимы пропаривания. Опыты подтверждают теоретические положения о целесообразности при пропаривании и других аналогичных условиях ускорения твердения связывания выделяющейся при гидролизе и гидратации извести в гидроалюминаты кальция; исключения из продуктов этого процесса коагуляционных алюминатных структур; в начале процесса создания условий для диспергирования воздуха, находящегося в цементном тесте, и его размещения в контракционных полостях новообразований. Все это предопределяет применение шлакопортландцементов высокой дисперсности с содержанием активного гранулированного доменного шлака не менее 70% и отличает от стандартного шлакопортландцемента, нормируемого ГОСТ 10178—62.

§ 60. Твердение бетона при отрицательных температурах

Для твердения бетонов необходимо наличие в нем жидкой фазы воды. Ее превращение в лед не только тормозит процессы гидролиза и гидратации цемента, но и вызывает деструкцию цементного камня. Ученые [20, 22, 38, 49] в течение ряда лет изучают условия, при которых не нарушается сплошность бетона в процессе твердения при отрицательных температурах, а также сохраняется в твердеющем бетоне вода в жидком состоянии. На громадной территории нашей страны преобладают суровые климатические условия, поэтому разработка способов круглогодичного производства работы имеет большое значение.

Зимнее бетонирование, разработанное и широко внедренное в нашей стране, нашло широкое признание во многих странах мира.

Все способы бетонирования при отрицательных температурах можно разделить на две группы: 1) производство работ без утепления бетона, допускающее частичное замерзание воды — холодный способ; 2) производство работ с утеплением бетона, не допускающее замерзания воды. Каждый из приемов имеет некоторые недостатки.

Производство работ без утепления бетона, допускающее частичное замерзание воды, привлекает своей простотой. При этом способе обеспечивают такое состояние воды, при котором она не превращается в лед при отрицательных температурах. Известно, что в зависимости от химического состава вода переходит в твердофазовое состояние при разных отрицательных температурах. Выбрав недефицитные химические добавки, легко растворяющиеся в воде,

снижающие в нужных диапазонах температуру замерзания таких водных растворов и не вызывающие отрицательного действия на процессы гидролиза и гидратации цемента, можно производить бетонные работы. Для этой цели были предложены две химические добавки: CaCl_2 и NaCl , а в последние годы и др. Как видно из табл. IX.17 и IX.18, применяя некоторые из указанных широко доступных солей, можно производить бетонные работы до температуры -30°C . В последние годы расширены исследования по применению холодных бетонных смесей при более низких температурах.

Таблица IX.17

Температура замерзания раствора с $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$, $^\circ\text{C}$	Содержание в растворе—воде затворения безводного нитрата кальция $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$, кг		Температура замерзания раствора с жидкофазным $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$, $^\circ\text{C}$	Содержание в растворе—воде затворения мочевины $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$, кг		Температура замерзания раствора с НКМ (с нитратом кальция и мочевиной) в соотношении, $^\circ\text{C}$		Содержание в растворе—воде затворения безводного НКМ, кг	
	в 1 кг	в 1 л		в 1 кг	в 1 л	1:1	3:1	в 1 кг	в 1 л
-0,8	0,027	0,030	—	—	—	-0,5	-0,5	0,0150	0,0150
-1,7	0,053	0,058	—	—	—	-0,8	-0,8	0,0250	0,0255
-2,6	0,080	0,087	-2,0	0,047	0,058	-1,5	-1,5	0,0500	0,0520
-3,2	0,108	0,113	-3,2	0,083	0,093	-3,0	-3,0	0,1000	0,1074
-4,0	0,130	0,142	-4,1	0,118	0,128	-4,7	-4,7	0,1500	0,1660
-6,0	0,173	0,197	-6,2	0,191	0,200	-5,5	-5,5	0,1750	0,1940
-8,7	0,217	0,253	-8,5	0,317	0,323	-6,2	-6,4	0,2000	0,2250
-10,1	0,237	0,285	—	—	—	-7,0	-7,4	0,2250	0,2540
-11,9	0,257	0,317	—	—	—	-9,0	-10,3	0,3000	0,3440
-13,6	0,278	0,347	—	—	—	-10,4	-14,0	0,3500	0,4000
-16,8	0,318	0,412	—	—	—	-12,4	-16,8	0,4000	0,4650
-19,2	0,357	0,473	—	—	—	-13,5	-18,5	0,4250	0,4950
-21,6	0,393	0,536	—	—	—	-14,8	-20,5	0,4500	0,5250
-23,8	0,405	0,560	—	—	—	-16,6	-22,6	0,4750	0,5550
-26,0	0,416	0,595	—	—	—	-18,5	-26,0	0,5000	0,5870
-28,2	0,427	0,620	—	—	—	-20,4	—	0,5250	0,6150
						-22,0	—	0,5400	0,6500

Примечание. Плотности указанных растворов составляют: $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ — 1,02—1,42; $\text{CO}(\text{NO}_2)_2$ — 1,015—1,090; нитрат кальция поставляется по МРТУ 6-03-195—67.

Количество добавок электролитов, указанных в таблицах, легко контролируется по плотности соответствующих растворов [20, 38, 47]. Это позволяет указанные в инструкциях и монографиях, их количества в 1 кг или 1 л раствора также дозировать с требуемой точностью, приготавливая воду затворения с необходимой эвтектикой для конкретных условий бетонирования.

Опыт работ с химическими добавками показывает, что хлористые соли без ингибиторов * имеют ограниченное применение. Положительные результаты применения холодного бетонирования полу-

* Ингибиторы — вещества, замедляющие, а в ряде случаев прекращающие химические процессы, в данном случае коррозии арматуры в железобетоне.

Температура замораживания раствора с CaCl_2 , °С	Содержание в растворе—воде затворения безводного CaCl_2 , кг			Температура замораживания раствора с NaCl , °С	Содержание в растворе—воде затворения безводного NaCl , кг		
	в 1 кг	в 1 л	на 1 л воды		в 1 кг	в 1 л	на 1 л воды
—0,6	0,013	0,013	0,013	—0,9	0,015	0,015	0,015
—1,2	0,025	0,025	0,025	—1,8	0,029	0,029	0,030
—1,8	0,036	0,037	0,037	—3,5	0,056	0,058	0,059
—2,4	0,048	0,050	0,050	—5,4	0,083	0,088	0,090
—3,0	0,059	0,062	0,063	—6,4	0,093	0,103	0,106
—4,4	0,083	0,089	0,090	—8,6	0,122	0,133	0,139
—6,1	0,105	0,114	0,117	—9,8	0,135	0,149	0,157
—8,1	0,126	0,140	0,144	—11,0	0,149	0,165	0,175
—11,4	0,158	0,180	0,188	—13,6	0,175	0,198	0,212
—15,7	0,189	0,221	0,238	—15,1	0,188	0,214	0,231
—19,2	0,209	0,249	0,264	—18,2	0,212	0,246	0,269
—23,3	0,228	0,276	0,295	—21,2	0,231	0,271	0,301
—25,7	0,238	0,290	0,312				
—31,2	0,257	0,319	0,346				
—34,6	0,266	0,334	0,362				
—38,6	0,275	0,346	0,376				
—50,1	0,294	0,376	0,417				
—55,0	0,299	0,383	0,42				

Примечание. Плотности указанных в таблице растворов при температуре 18—20° С составляют: CaCl_2 — 1,01—1,29, NaCl — 1,01—1,175.

чены только в пределах температур примерно до —20° С. Имеются неудачные случаи применения этого способа при изготовлении железобетонных конструкций. Надо заметить, что в инструкциях рассматривается дозирование хлористых солей без учета состава бетона. Следовательно, при применении высокопрочных бетонов с большим расходом цемента один и тот же процент хлористых солей создаст различную степень агрессивного воздействия на арматуру. В последнее время получены (в МАДИ и ВНИИСтройнефти) добавки ННК (нитрит, нитрат кальция) и ННХК (нитрит, нитрат кальция и хлористый кальций), которые устраняют коррозию арматуры, вызываемую хлорид-ионами. Эти добавки в обычных условиях и при пропаривании ускоряют твердение бетона, повышают его сцепление с арматурой.

Сказанное о столь эффективном влиянии нитрита и нитрата кальция на свойства бетона объясняется тем, что эти электролиты значительный период времени находятся в воде, размещенной в порах, не связываясь с гидратируемыми минералами цемента. Этим самым повышается ионная сила воды, еще не вошедшей в гидратные соединения, ускоряется процесс гидратации (например, прочность бетона с указанными добавками уже через 2—4 ч после приготовления в несколько раз выше прочности бетона такого же состава без добавок). Оптимальное количество добавки ННК для ускорения твердения — 3% от массы цемента (количество добавки несколько варьируется для разных цементов).

В отличие от ранее приведенных добавок (кроме NaCl), вступающих в химическую связь с рядом клинкерных фаз, добавка нитрата натрия не реагирует с минералами цемента, а только изменяет состав и свойства воды затворения (жидкой фазы), находящейся в бетоне. Эта добавка меняет температуру замерзания воды (а также растворимость минералов, повышая ионную силу раствора и ряд других его свойств) и рекомендуется для работ при относительно высоких температурах (от 0 до -10°C).

В зависимости от условий производства работ и других условий, связанных с регулированием технических свойств бетона (например, морозостойкости, коррозионной стойкости), ее дозировка колеблется от 2 до 5% от массы цемента. Даже не зная результатов исследований технических свойств бетонов на перечисленных добавках, можно выявить целесообразные пределы использования их для разных температур. Анализ табл. IX.18 показывает, что, например, в бетоне с В/Ц=0,5 для обеспечения незамерзаемости воды при $-19,2^{\circ}\text{C}$ требуется около 47,5 кг хлористых солей или примерно 13% от массы цемента. Такое количество добавки вводить нецелесообразно.

Следовательно, необходимы более эффективные добавки, приведенные в табл. IX.19, а также добавки НКК и НКХК. В табл. IX.21 приведены сведения о нарастании прочности бетона с добавкой НКМ (из исследований, проведенных в МАДИ и ВНИИСтройнефти) на портландцементе М400 и 500.

Таблица IX.19

Добавка НКМ, % от массы воды	Температура твердения бетона, $^{\circ}\text{C}$	Прочность бетона по сравнению с прочностью эталона на 28 сут. твердения, % при продолжительности твердения, сут.			
		7	14	28	90
8	0—5	40—50	55—80	70—90	90—100
16	От -6 до -10	30—40	40—60	50—75	80—90
20	» -11 » -15	25—30	35—40	45—65	70—85
25	» -16 » -20	20—25	30—40	40—55	60—75

Примечание. Поверхность бетона защищена от вымораживания воды.

Состав добавки НКМ для каждого температурного интервала различен: для температуры от 0 до -5°C — по одной части нитрата кальция и мочевины (4%+4%); от -6 до -10°C — по одной части нитрата кальция и одной мочевины (8%+8%); от -11 до -15°C — три части нитрата кальция и одна часть мочевины (15%+5%); от -16 до -20°C — три части нитрата кальция и одна часть мочевины (18,75%+6,25%). Из сравнения содержания добавки НКМ в холодном бетоне при температуре воздуха -20°C и хлористой соли видно, что дозировки одинаково велики, что усложняет их широкое использование при особо низких температурах воздуха. Однако указанные серии добавок на базе НКК позволяют

менять их количество не только с учетом температурного фактора, но и требуемых сроков получения заданной прочности. Следовательно, количество добавки НКМ можно значительно уменьшить, если сроки нарастания прочности допустимо удлинять против показанных в табл. IX.21.

Добавки типа НКМ, ННК, ННХК не устраняют частичного образования льда в бетоне, однако его кристаллический облик иной, чем льда, образующегося без этих добавок или при наличии хлористых солей. Такой лед не вызывает деструктивных процессов в бетоне. В отличие от хлористых солей, где важно полное соответствие их дозы температуре воздуха, любое возможное изменение температуры воздуха, наступившее после окончания бетонирования при использовании добавок на основе ННК, скажется только на кинетике упрочнения бетона без его деструкции.

В дорожном и аэродромном строительстве эти добавки позволяют получать в соответствии с результатами широко проведенных испытаний [20, 77] частично замороженные бетоны с необходимой прочностью без деструкции при оттаивании. Такие бетоны при замораживании будут постепенно упрочняться до проектной величины.

Производство работ с утеплением бетона осуществляется способами, выбор которых связан с условиями производства работ и геометрическими размерами бетонируемой конструкции. Любой способ связан с приготовлением бетонной смеси на горячей воде и нагретых заполнителях. Подогрев заполнителей необходим в двух случаях: для устранения попадания в бетон снега (льда) и для получения бетонной смеси с заданной температурой. Приготовление бетона осуществляется рядом технологических переделов вне отапливаемых помещений. При низких температурах воздуха и значительном времени перевозки смеси до места ее укладки вода в смеси может замерзнуть.

Для получения необходимой положительной температуры бетонной смеси, которая транспортируется к месту укладки, пользуются известной формулой расчета средней температуры смеси:

$$t_{б.с} = \frac{(0,2\Gamma + B_{г}) t_{г} + (0,2\Pi + B_{п}) t_{п} + 0,2Ц t_{ц} + B_{д} t_{в}}{0,2(\Gamma + \Pi + Ц) + B},$$

где Γ , Π и $Ц$ — количество гравия (щебня), песка и цемента, кг; $t_{г}$, $t_{п}$, $t_{ц}$ и $t_{в}$ — соответственно температуры гравия, песка, цемента и воды, с которой материалы подаются в бетоносмеситель, °С; 0,2 — средняя удельная теплоемкость гравия, песка и цемента, ккал/кг × °С; $B_{г}$ и $B_{п}$ — вода, содержащаяся в гравии и песке, кг; $B_{д}$ — вода, введенная в замес, с учетом влажности материалов, кг; B — суммарное содержание воды в замесе, кг.

Для температуры воздуха —30°С расчет по формуле дает смесь с расчетной температурой 40°С при нагревании воды до 70°С, песка до 30°С и гравия (щебня) до 35°С. При транспортировании на неутепленных транспортерах в закрытой галерее на расстоянии до 500 м такая смесь теряла примерно 20°С к моменту окончания ук-

ладки в блоках, закрытых шатрами с обогревом пространства. Каждый расчет температуры бетонной смеси должен быть уточнен опытным путем.

Для определения охлаждения бетона проф. В. С. Лукьянов предложил формулу, которая дает точные значения параметров охлаждения бетона в массивных сооружениях (например, опорах мостов, отдельных блоков гидротехнических сооружений).

Ориентировочно определить сроки охлаждения конструкции можно по более простой формуле проф. Б. Г. Скрамтаева, в которой время остывания бетона в конструкции до 0°C связано с исходной температурой t_6 уложенного бетона, содержанием цемента Π в 1 м^3 бетона; экзотермическим эффектом * Э цемента от твердения; поверхностью F охлаждения бетона конструкций, объемом V бетона конструкции, м^3 ; средней наружной температурой t_n воздуха за время твердения бетона, средней температурой $t_{6.\text{ср}}$ бетона за время остывания.

Для массивных конструкций с модулем поверхности до $3 t_{6.\text{ср}} = (t_6 + 5)/2$; для менее массивных конструкций с модулем поверхности до $8 t_{6.\text{ср}} = t_6/2$; для ажурных (тонкостенных) конструкций с модулем поверхности до $12 t_{6.\text{ср}} = t_6/3$.

Для теплозащиты широко используют пергамин, толь, войлок, шевелин, шлаковойлок, фанеру, опилки, шлак, камышит, соломит и др. Расчетные температуры воздуха надо брать из СНиП II-A.6—62. Тогда время остывания бетона определяют из формулы

$$X = \frac{600t_6 + \Pi \mathcal{E}}{\frac{F}{V} (t_{6.\text{ср}} - t_n)} \cdot \frac{R_{\text{общ}}}{\beta},$$

где $R_{\text{общ}}$ — суммарное (общее) термическое сопротивление опалубки и термоизоляции; β — поправочный коэффициент, который зависит от вида теплозащиты и силы ветра (этот коэффициент приводится в специальных справочниках) и для широко применяемых конструктивных приемов утепления бетона составляет 1,3—3.

Значения термического сопротивления различных теплоизоляций также имеются в справочниках.

Как видно из формулы, при бетонировании в зимнее время необходимо учитывать климатические условия, вид бетонируемого объекта, наличие теплоизолирующих материалов, видо-марку цемента, наметить ряд вариантов производства работ, выполнить расчеты и запроектировать их осуществление. При этом назначаются различные сроки получения марочной прочности бетона. Например, бетон массивных сооружений (шлюзов, плотин, гидростанций и ряда других объектов строительства) с длительным периодом производства работ проектируется с марочной прочностью на срок не менее 180 сут.

* Для оценки экзотермического эффекта различных цементов имеются соответствующие таблицы. Пределы тепловыделения различных видо-марок цемента колеблются для 3 сут. примерно от 30 до 90, для 7 сут. — от 40 до 95 и для 28 сут. — от 60 до 100 ккал на 1 кг цемента.

Таблица IX.20

Состав бетона, кг/л м³			Пластичность-Жест-кость, см	Предел прочности при сжатии, кг/см² (10 ⁻¹ МПа), при продолжительности твердения эталонных образцов, ч	Предел прочности при сжатии, кг/см² (10 ⁻¹ МПа)				
Цемент	Вода	Песок	Щебень		Испытания сразу после изготовления		Продолжительность твердения, ч		
				24	168		4	24	168
					Температура замороженных образцов, °С				
					-2	-25	-50	-25	-50
460	205	610	1050	3,5	7	298	395	360	494
250	163	700	1320	2,0	—	364	353	288	370
								544	548
								102	572
								544	544
								—	354
									663
									549

Примечание. Предел прочности бетона при сжатии сразу после оттаивания образцов за 24 ч замораживания при -50°С составляет 7,7% от прочности замороженных образцов и за 168 ч замораживания — 57,5%.

Таблица IX.21

№ п.п.	s, см²/л	Глинс, %	С. с. в., %	В/Ц	Осадка конуса смеси, см	Предел прочности при сжатии, кг/см² (10 ⁻¹ МПа), при продолжительности твердения образцов, сут.									
						контрольных					подвергнутых замораживанию и вибрированию после оттаивания				
						7	28	90	180	7	20	90	180	7	180
1	5300	9	—	0,64	8	163	294	304	387	100	187	190	209	166	278
2	5300	9	0,2	0,57	8	243	294	335	399	192	247	277	314	258	421
3	3900	3	—	0,64	17	84	132*	153*	222*	71	102*	100*	151*	106	269*
4	3900	3	0,2	0,57	17	105	167*	177*	235*	122	158*	187*	205*	147	238*

* Показатели прочности относятся к срокам твердения соответственно 15, 28 и 90 сут. Замораживание проводилось при температуре от -10 до -19°С в течение 12 ч. Минералогический состав цемента: 38,96% C₂S; 30,80% C₃S; 10,73% C₄A; 10,88% C₄AF.

К производству бетонных работ в зимнее время предъявляют два основных требования: 1) не обязательно получение заданной прочности бетона в относительно короткие сроки твердения (аналогичные срокам твердения в условиях положительных температур), но необходимо образование цементного камня такой структуры, при которой замерзание бетона не вызывает его деструкции; этот срок твердения бетона назван критическим; 2) получение бетона заданной прочности в любой срок после уплотнения; срок твердения связан с сохранением в бетоне положительных температур, при которых процессы гидролиза и гидратации цемента обеспечивают необходимую кинетику структурообразования цементного камня. Понятие критических сроков твердения или критической прочности по мере углубления исследований процессов твердения систематически уточняется. Условно назначенная цифра такой прочности в 50% нуждается в проверке, так как кинетика твердения у разных видов и марок цемента неодинакова и указанный показатель не вскрывает особенностей связывания воды в цементном камне.

Это положение подтверждается повторным вибрированием (встряхивание) системы цементного теста — вода после ее оттаивания. Образцы, в которых при встряхивании произошло повторное тиксотропное разжижение, приобретают такую же прочность, что и образцы нормального твердения, так как этим ликвидируется раздвижка флоккул из зерен гидратирующего цемента, которая была вызвана образованием льда. Если вслед за оттаиванием произвести повторное вибрирование бетона указанным способом, можно добиться восстановления первоначальной плотности бетона, полученной при укладке. В табл. IX.20 приведены итоги опытов по восстановлению свойств бетонов, которые были подвергнуты воздействию отрицательных температур ранее критического срока, обеспечивающего стандартное структурообразование цементного камня в бетоне.

Анализ табл. IX.21 и ряда других исследований показывает справедливость гипотезы о роли химико-минералогического состава цемента и воды в бетоне, так же как и повторности уплотнения при замораживании только что уложенного бетона. Немедленное замораживание бетона вслед за уплотнением дает различный эффект по его деструкции при разных температурах. В указанном случае деструкция не достигла возможной наибольшей величины, так как замораживание бетона производилось непродолжительное время при относительно невысоких отрицательных температурах воздуха. Меньшая потеря прочности замороженного бетона с пластификатором с.с.б. объясняется меньшим количеством воды в таких бетонах. Сказанное также подтверждается и прямыми опытами по испытанию замороженных бетонов до их оттаивания.

Опыты показывают, что с понижением температуры замораживания прочность образцов, испытанных при наличии в них льда, увеличивается тем больше, чем больше воды перешло в твердую фазу. При этом бетон, который до замораживания твердеет длительный срок, имеет большую суммарную прочность. Из этого вид-

но, что вода в бетоне имеет различный вид и на его деструкцию влияет только та часть воды затворения, которая замерзает при вполне определенных условиях.

Рассмотрим приемы утепления бетонной смеси, приготовленной на подогретых материалах. Поскольку нагрев воды, имеющей из всех компонентов бетона наибольшую теплоемкость*, является самым простым способом, воду следует нагревать до максимальной температуры (близкой к кипению). При затворении смеси на горячей воде происходит быстрое загустевание цементного теста, которое по мере остывания постепенно возвращается к нормальному состоянию. Смесь снова приобретает проектную пластичность-жесткость без последующего практически выявляемого изменения качества бетона.

Определив условия подогрева материалов, выявляют условия, обеспечивающие твердение бетона при отрицательных температурах воздуха. Для сохранения воды в твердеющем бетоне его обогревают паром, электроэнергией и инфракрасными лучами. Любой способ требует конструкции опалубки, которая бы сохраняла тепло предварительно подогретого материала и экзотермическое тепло, выделяющееся в результате процесса гидролиза и гидратации цемента. Для этого устраивают двойную опалубку из досок с полостью внутри нее. Внутренние поверхности досок обшивают каким-либо листовым материалом (например, пергамином), заполняя полость, например опилками.

При модуле поверхности конструкций (соотношении внешних поверхностей конструкции к их объему) $M = F/V < 5$ для определенного минимального значения отрицательных температур воздуха удается без подогрева сохранять тепло в бетоне с применением утепленной опалубки указанными способами. Такой способ работ назван термосным. При производстве бетонных работ в зимнее время возможны сочетания различных способов. Например, при достаточно низких температурах воздуха (от -40 до -50°C) устроена массивная опора (неармированного бетона) под мостовой переход в Сибири с сочетанием приема холодного бетонирования и способа термоса. Для обеспечения твердения бетона при температуре от -20 до -25°C вводили хлористые соли. В указанном случае способ термоса позволяет повысить его температуру до указанного предела (при температуре внешней среды от -40 до -50°C).

При указанных температурах нельзя предупредить замерзания воды только с хлористыми солями. Применение пара целесообразно только с поверхности конструкций — периферийный обогрев. Это достигается, например, путем включения труб, по которым подводится пар, в свободное пространство между плоскостями двух опалубок. Возможны другие приемы подведения пара. В частности, в бетонируемый объект закладывают трубы, по которым при твердении бетона циркулирует пар. Обогрев бетона открытым паром соз-

* Коэффициент теплоемкости воды $c = 1$ ккал/кг· $^\circ\text{C}$, теплоемкости заполнителя $c \approx 0,25$.

дает трудности, так как пар, конденсируясь, образует наледь, которую приходится систематически снимать. Применение электроэнергии при наличии резервных мощностей проще и дешевле пара. На протяжении ряда лет разработаны технические приемы осуществления этого способа *. В этом случае промышленный ток можно подводить: 1) к поверхности забетонированного объекта; 2) внутрь забетонированного объекта, подключая ток к специально оставляемым в нем электродам или к арматуре; 3) к электродам, вставляемым внутрь между поверхностями «теплой» опалубки в слой плотно утрамбованных опилок, смоченных раствором поваренной соли (метод электротермоактивной опалубки).

Количество тепла в бетоне (в ккал) определяют из условия

$$Q = 0,864 I^2 R t,$$

где I — сила тока, А; R — сопротивление обогреваемой конструкции, Ом; t — продолжительность включения, ч.

Надо отметить, что по сравнению с пропариванием электропрогрев наиболее эффективен при изготовлении легких бетонов на пористых каменных материалах (керамзите, пемзе, шлаке, перлите и др.). Электропрогрев по сравнению с пропариванием при наличии свободных мощностей позволяет просто и быстро проводить зимнее бетонирование, исключает коррозию металла при многократной оборачиваемости инвентаря, используемого при пропаривании бетона (металлической опалубки, разнообразных креплений, труб, подмостей и др.). Однако электрообогрев имеет и недостатки. К наиболее существенным надо отнести опасность работ с промышленным током напряжением 220/380 В при использовании электротермоактивной опалубки. Для того чтобы исключить несчастные случаи при кратковременных включениях тока, с мест территории, к которым подведена электроэнергия, выводится работающий персонал. В этом методе особое внимание надо обращать на изоляцию опилок от поверхности бетона и электродов из арматурной стали от деревянной опалубки. Контакт бетона с нагреваемыми опилками приводит к созданию опасности для работающих вследствие появления напряжения в сооружении и к громадным потерям энергии, так как ток проходит через бетон сооружения. Опилки хвойных пород для придания электропроводности всегда должны быть смочены раствором поваренной соли соответствующей концентрации (например, при напряжении в 220 В концентрация раствора составляет 58 г хлористого натрия на 1 л раствора; при напряжении 380 В 25 г на 1 л). Опилки без комков укладывают в опалубку послойно, тщательно уплотняя для создания плотного контакта с электродами. В этом случае исключаются потери энергии, загорание опилок и опалубки. Нагревать опилки допускается до температуры, не приводящей к их загоранию.

На строительстве канала им. Москвы применялись электроды из арматурной стали для термоактивной опалубки. Этот способ эффек-

* Начало работ по электрообогреву относится к 1931 г.

тивен, ускоряя твердение бетона и в осенне-весенне-летний периоды. Опыт показывает, что в зависимости от качества термоактивной опалубки, зимних погодных условий (температуры и ветра), сроков заданного нарастания прочности бетона, опалубку надо прогревать от 1 до 2—4 раз в сутки, каждый раз включая ток для подогрева опилок на срок меньше 1 ч. Отметим, что ток можно включать в случае, если опилки замерзли. Контакт электрода с проводом, подводящим ток, должен быть плотным и надежным. Перед каждым включением тока проверяют тщательность прилегания металлических электродов к опилкам и их влажность.

В случае неполного контакта между поверхностью электродов и массой опилок и при их низкой влажности опилки необходимо поливать горячей водой и уплотнять, сняв напряжение на термоактивную опалубку. Для осуществления двух других приемов электрообогрева (способов 1 и 2) непосредственно на месте работ ток трансформируют до 37—50 В.

Обогрев бетона с помощью внешних поверхностных электродов (пластинчатых, полосовых, нашивных, электродных щитов) и внутренних (струнных и стержневых) успешно применяют для прогрева монолитного малоармированного бетона (например, подпорных стен, фундаментов, в том числе бутобетонных полов, оснований крупногабаритных сборных опор под эстакады, балок и других крупногабаритных деталей). Струнные электроды, располагаемые параллельно оси бетонируемой конструкции (поэтому их также называют продольными электродами), имеют преимущество по сравнению со стержневыми электродами, находящимися перпендикулярно оси, так как в последнем случае усложняется монтаж электродов и распалубка конструкций. В случае применения струнных электродов прогрев бетона протекает равномернее.

Надо учитывать расстановку электродов, которые изготавливают из арматурной стали диаметром от 6 до 16 мм. Расстояние между электродами зависит от величины напряжения переменного тока*, подаваемого для прогрева бетона, наибольшей мощности тока, подаваемого для обогрева, и диаметров электродов. Это расстояние может быть определено по номограммам.

Техническая сторона прогрева бетона должна быть заранее определена для каждой конструкции, изготавливаемой в зимних условиях. Важно не допустить замерзания воды в бетоне конструкций сложных очертаний, которые наиболее трудно обеспечить равномерным прогревом. В последнем случае применяют различные типы электродов. При распределении электродов в бетонируемой конструкции необходимо обеспечить прогрев бетона до заданных температур и сохранение в твердеющем бетоне всей воды затвердения. Здесь уместно напомнить, что местное повышение температур бетона создает условия для миграции и испарения влаги из бетона, что равноценно некачественному уходу за бетоном, например, з

* Прогрев постоянным током не применяется из-за вызываемого при этом электролиза воды.

жаркий летний день (см. § 59) *. В частности, прогрев бетона с арматурой резко ухудшает ее сцепление с бетоном, что снижает свойства железобетонных конструкций. Поверхность электродов должна быть чистой (не покрыта краской, маслом, ржавчиной, грунтом, пылью и т. д.). Полосовые электроды можно изготавливать из отходов листового металла и, в частности, старой кровельной стали, которая должна быть очищена от краски. Естественно желание применять меньше электродов, но это связано с увеличением напряжения и, следовательно, с усложнением работ, так как необходимы специальные меры по охране труда, и такое их расположение, которые обеспечивало бы равномерный прогрев бетона и изоляцию электродов.

Сказанное о важности правильного выбора числа и типа электродов, их расположения надо рассматривать с учетом физической особенности двух типов материалов, резко различающихся по электропроводности. Так как ток преимущественно протекает по арматуре, то с этим фактом необходимо считаться, имея в виду, что в местах контакта электродов и арматуры возможен перегрев бетона, высыхание, что приведет к получению бетона с низкими техническими свойствами. Сказанное имеет особое значение для выбора бетона, в котором отсечка воды от цемента должна быть сведена к минимуму. В этом случае важно учитывать эффект от применения различных добавок минерального и органического вида. Вопрос о зимнем бетонировании с электрспрогревом изложен в ряде специальных монографий [38, 41, 49]. Несомненно, в ряде случаев этот метод найдет широкое применение и для ускорения твердения бетона, в том числе на заводах ЖБК.

Кроме перечисленных приемов производства бетонных работ в зимнее время надо отметить и бетонирование в тепляках. При этом вне бетонируемого объекта устраивают временное обрамляющее его сооружение (из металлических конструкций с соответствующими условиями работы стеновыми панелями, например, из дерева или плотного брезента с утепляющими слоями), отапливаемое внутри. В последнее время предложено непосредственно перед укладкой дополнительно прогревать бетонную смесь при помощи групповых электродов, погружаемых в ее объем, или другим приемом [49].

Все способы прогрева бетонной смеси в зимнее время и для ускорения твердения должны быть технически состоятельны и экономически оправданы.

* При этом надо отметить, что в таком бетоне резко увеличивается удельное омическое сопротивление (так как падает его электропроводность), которое при соблюдении нормативных указаний может быть принято в 500 Ом·см.

§ 61. Влияние агрессивной среды на состояние бетона

Влияние агрессивной среды сначала имеет локальный характер, так как разрушение начинается с дефектных мест бетона, что связано с неоднородностью этого материала. Проектируя комплексную марку бетона, нужно учитывать, что при существующих материалах и организации производства наличие слабых мест в бетоне в ряде случаев нельзя устранить. Иногда разрушение бетона связано с учетом условий работы сооружения. Например, разрушение поверхностного слоя опоры моста может произойти в зоне переменного и многократного воздействия воды и отрицательных температур. В тех же частях сооружений, но не подвергающихся агрессивному — разрушающему воздействию внешней среды, бетон работает стойко. Это позволило проектировать сооружения с делением их по зонам работы и применять материалы с различными свойствами, что целесообразно экономически и технически.

Надо заметить, что наличие в сооружениях нестойких мест бетона — это наглядное доказательство брака в производстве работ. Причина разрушения состоит в том, что бетон подбирают без учета работы материала в конкретной среде (по прочностной марке, а не по комплексной). Испытания образцов не дают ответа на вопрос о дальнейшей работе бетона, так как проводятся в оптимальных условиях. По этой причине прочность бетона конструкций нельзя назначать без соблюдения определенных требований к материалам, составу смеси, бетону, реальности условий их выполнения.

На основании теоретических положений о формировании свойств бетона долговечностью около 100 лет можно утверждать, что случаи разрушения связаны не с бетоном как одним из видов строительных материалов, а с несоответствием его разновидности условиям службы во внешней среде. При анализе выявилась необходимость дифференцировать случаи разрушения бетона, учитывая не только условия работы его, но и всю совокупность условий формирования. Поэтому нельзя исключать из рассмотрения ни одного звена в цепи технической документации на производство работ.

Следовательно, для изучения привлекают: 1) ГОСТы, нормы проектирования, указания по эксплуатации машин для добычи песка, гравия, дробления щебня, приготовления и транспортирования смеси и т. д.; 2) нормы на качество материалов; 3) технические правила ведения работ; 4) правила подбора состава бетона и его назначения по соответствующим техническим положениям; 5) правила эксплуатации сооружений. Нельзя забывать, что цементный камень получен в результате гидролиза и гидратации цемента, протекающих при наличии в бетоне избытка воды. Следовательно, плотности тяжелого бетона, как правило, ниже плотности пород заполнителя, а гидратированные соединения цементного камня имеют значительную растворимость в воде. По этой причине основное правило по-

лучения бетона с высокой долговечностью — это получение плотных бетонов, вода в которые поступает лишь в таком количестве, чтобы не возникали химические процессы, вызывающие деструкцию в цементном камне (см. § 63 и 65). Систематическое исследование воздействия внешней среды на бетон должно привести к разработке приемов расчета, аналогичных методам расчета инженерных сооружений на механические нагрузки; это повысит сроки их надежной работы, позволит использовать бетон со значительно большей эффективностью.

§ 62. Разрушение бетона в водной среде

В научных статьях конца XIX столетия можно встретить рекомендации, как предохранить бетонные сооружения от разрушительного действия грунтовых вод. В них сказано, что необходимо полностью предохранять поверхности бетонного сооружения от соприкосновения с грунтовыми водами путем: прикрытия слоем плотной утрамбованной глины, предохраняющей от размыва наружные поверхности сооружения ниже уровня грунтовых вод; подбора плотных водонепроницаемых бетонов с особо гладкими поверхностями, для чего их необходимо тщательно затирать сложным цементным раствором; покрытия сооружений органическими материалами (гудроном, каменноугольной смолой и т. д.).

Даже к 1926 г. (периоду строительства Днепрогэса — крупнейшего гидротехнического объекта того времени) не существовало технических требований на водонепроницаемость, химическую стойкость, морозостойкость и ряд других важных свойств бетона.

Приведенные рекомендации, по сути дела, исключали возможность использования бетона в гидротехническом строительстве, так как к агрессивным относились грунтовые воды, хотя многие из них менее агрессивны, чем, например, воды, заполняющие водохранилища в горных местностях (см. § 18 и 19).

Рассмотрим причины, вызывающие разрушение бетона агрессивной водой и пути его защиты. Анализ разрушения бетона агрессивными водами позволяет разделить коррозию на три условных вида [19, 21, 22, 24 57]: коррозию I вида, возникающую при контакте с водой, имеющей малую временную жесткость * (рис. X.1), когда в

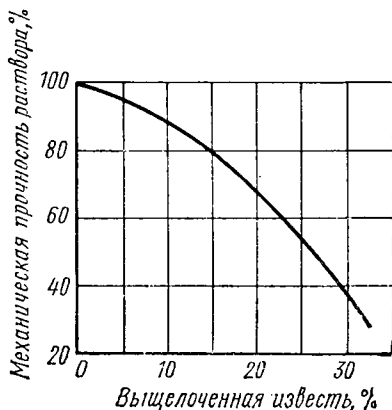
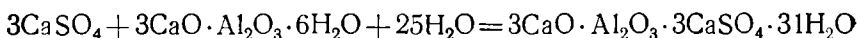
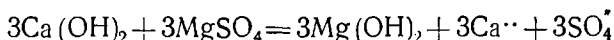
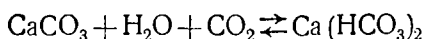
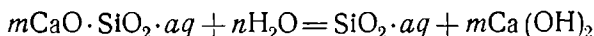
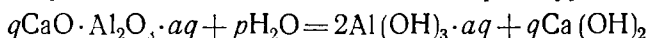


Рис. X.1. Зависимость механической прочности раствора от количества выщелоченной извести

* Временная жесткость — понятие, связанное с содержанием в воде растворенных минеральных веществ, степень ее минерализации.

бетоне растворяются составные части цементного камня (гидратированные минералы) и продукты реакции выносятся протекающей водой из бетона; коррозию II вида, связанную с действием на цементный камень кислых вод и растворов некоторых солей, в процессах участвуют составные части гидратированного цемента, при этом образуются соединения, не обладающие вяжущими свойствами, продукты обменных реакций растворимы в воде и легко вымываются из бетона; коррозию III вида, связанную с действием на цементный камень растворов солей (преимущественно сульфатных соединений), в результате образуются малорастворимые соли, рост кристаллов которых и вызывает разрушение бетона. Каждый из указанных процессов можно записать в виде ряда уравнений:



и др.

Действия агрессивной воды надо заранее учитывать и не допускать возникновения этих разрушительных по своим результатам процессов. Меры защиты носят комплексный характер и заключаются в выборе вида и марки цемента, заполнителей, подборе и приготовлении плотных бетонов, использовании в ряде случаев конструктивных мер защиты (в том числе гидроизоляции бетона). Для того чтобы рассмотреть механизм разрушения бетона при действии различных по составу агрессивных вод, надо учитывать, что бетон — щелочная среда, благодаря чему и возможно включение в него металла — стальной арматуры при изготовлении железобетона. Снижение щелочности бетона в результате постепенного выщелачивания — сложный процесс, на который решающее влияние оказывает жесткость воды-среды (см. табл. X.I).

Разрушение бетона под воздействием воды, как любой химический процесс, в данном случае гидролитическая диссоциация клинкерных минералов и продуктов новобразования, составляющих цементный камень, зависит от количества этой воды и поверхности цементного камня, контактирующей с водой. Чем плотнее бетон, тем при прочих равных условиях меньше поверхность контакта, из-за которого возникает коррозия. Рассмотрим в общем виде каждый из указанных видов коррозии.

Коррозия I вида. Очень мягкая вода способна воздействовать на поверхность бетона, покрытую карбонатом кальция (CaCO_3), поэтому именно это обстоятельство приводит к кажущемуся различию в растворении ею больших количеств извести по сравнению с жесткой (более минерализованной) водой. При наличии в воде бикарбонатов систематически происходит карбонизация бетона и,

следовательно, значительное повышение его водостойкости. Соединения, растворяющие образовавшиеся карбонатные слои (затвердевшие пленки CaCO_3), будут вызывать выщелачивание — удаление из цементного камня извести. В плотном бетоне разрушение резко замедляется, так как уменьшается вынос извести из цементного камня.

Процесс разрушения бетона происходит еще быстрее очень мягкими водами, если применять вяжущие, в продуктах гидролиза и гидратации которых не присутствует свободная известь (например, при использовании пуццолановых и шлакопортландцементов оптимальных составов, для твердения которых созданы необходимые условия) *. При одном и том же составе и способах уплотнения бетоны без органических добавок и электролитов по водонепроницаемости можно разместить в следующем порядке (по возрастанию этого показателя, если за эталон взят портландцемент): шлакопортландцемент; пуццолановый портландцемент с гидравлической добавкой — трепелом; пуццолановый портландцемент с гидравлической добавкой — сиштоффом. С течением времени указанный порядок в получении менее водопроницаемых бетонов становится еще более разительным, что связано с процессом твердения.

Процессы связывания извести, выделяющейся при гидролизе и гидратации минерала C_3S , можно назвать вторичными. Следовательно, результат уплотнения и повышенная водостойкость цементного камня, а в целом водонепроницаемость бетона сказывается лишь с течением времени, большим, чем период, необходимый для первичных процессов между портландцементом и водой. Научные разработки этого вопроса в наше время значительно продвинулись и позволяют скорректировать указанный порядок распределения вяжущих материалов по эффективности получения бетонов высокой водонепроницаемости (см. § 66). Новые виды шлакопортландцемента позволяют получать бетон с высокой водонепроницаемостью и, в частности, благодаря возможности получать изопластичные смеси по сравнению со смесями на других цементах, но с меньшим содержанием воды.

По расчетам количество извести, выделяющейся при твердении портландцемента, в среднем составляет: на 28 сут. — около 10%, на 90 сут. — около 15% от массы цемента, содержащегося в бетоне. Из § 8 (см. табл. I.15) видно, что в случае выщелачивания извести в соответствии со степенью растворимости остальных компонентов цементного камня будет происходить их диссоциация, усиливающая коррозию цементного камня. В начале начнется диссоциация высокоосновных гидросиликатов кальция (с основностью от 1,5 до 2 молекул CaO на 1 молекулу SiO_2) с переходом их в более устойчивый, низкоосновный гидросиликат кальция. По окончании диссоциации гидросиликатов (см. табл. I.15) в порядке растворимости гидрати-

* Для связывания извести, выделяющейся при твердении портландцемента, важно наличие в пуццолановом и шлакопортландцементе соответствующего количества гидравлических добавок или молотого основного гранулированного шлака и обеспечение длительных условий твердения.

рованных соединений цемента, после того как концентрация $\text{Ca}(\text{OH})_2$ в бетоне (при ее дальнейшем выщелачивании) достигает предельного значения — четырехкратного гидроалюмината ($1,08 \text{ г/л CaO}$), начнется диссоциация этого соединения и т. д.

Указанная схема лежит в основе процесса коррозии I вида. Она типична для любого вяжущего, однако в других вяжущих основой для возникновения разрушения и скорости этого процесса является иной состав воды и иная плотность бетона. Следует учитывать, что перенос продуктов коррозии в толще сооружений также приводит к уплотнению бетона*. На основе большого числа экспериментов разработаны нормы, учитывающие сказанное о возможности уплотнения бетона продуктами коррозии цементного камня, размеры конструкций, подвергающихся коррозии, и условия поступления мягкой воды в бетон.

Коррозия II вида. В противоположность мягкой воде общее содержание ионов в воде с высокой степенью минерализации достигает нескольких десятков тысяч миллиграммов в литре (см. § 18 и 19). Такие воды продвигались в породах, содержащих растворимые минералы. Хлориды, сульфаты и бикарбонаты кальция, магния и натрия (ионы Cl^- ; SO_4^{2-} ; HCO_3^- ; Ca^{2+} ; Mg^{2+} ; Na^+) в разном количестве содержатся в грунтовых, подземных, речных, океанских и морских водах. Следует очень внимательно относиться к выбору цемента и составу бетона при строительстве в солончаковых почвах и заболоченных местах.

Воды кембрийской системы, имеющие высокую минерализацию (от 2000 до 5000 мг/л), содержат много хлористого натрия. В водах силурийской системы, находящихся в известняках, преобладают бикарбонаты кальция и магния при относительно небольшой минерализации (от 300 до 500 мг/л). Степень минерализации и состав воды девонской системы весьма различны. Вода морских отложений пермской системы при высокой минерализации содержит значительное количество сульфатов и хлоридов. Степень минерализации указанных вод тем выше, чем они глубже расположены по отношению к поверхности.

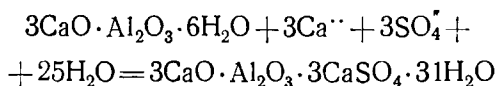
Особое внимание следует обращать и на воды заболоченных мест, имеющие низкие значения pH; присутствие органических гуминовых кислот оказывает специфическое, тормозящее действие на твердение бетона. Содержание в воде-среде торфа может не только значительно затормозить процесс твердения бетона (раствора), но и вызвать его разрушение. Перечисленный ионный состав воды (кроме сульфата ионов) вызывает коррозию II вида.

Опыты с применением измельченного торфа в составе песка показали, что при его содержании до 1,3% прочность образцов падает примерно в 2 раза, а при содержании до 2,52% прочность снижается в 6 раз. Нормы на I и II виды коррозии приведены в табл. X.1. По агрессии выделяются водные среды с выщелачивающей, обще-

* Такое самоуплотнение бетона коллоидными продуктами коррозии цементного камня можно назвать процессом кальматирования.

кислотной, углекислой, сульфатной и магниальной агрессивностью. В нормах СН 249—63 число агрессивных водных сред стало большим за счет включения в их состав водных сред, содержащих соли аммония, едкой щелочи, хлоридов, нитратов и других солей, а также едкой щелочи в условиях жаркого климата. Следовательно, с ранее названными пятью агрессивными средами еще существуют аммонийная, щелочная и среды со специфическими условиями службы. При промышленном строительстве значительно расширяются виды агрессии вследствие появления химических воздействий на бетон агрессивных сред промышленных производств.

Коррозия III вида может возникать в бетоне и без воздействия водной среды. Известно, что для возникновения сульфатной коррозии, т. е. коррозии III вида, необходимо наличие в цементном камне трехкальциевого алюмината, а во внешней среде — сульфат-иона. Типичным случаем такой коррозии можно считать разрушение бетона, в котором при стандартной тонкости помола цемента гипса содержится больше нормы. Этот процесс можно записать в том же виде, как и процесс образования высокосульфатной формы гидросульфоалюмината с учетом твердофазового состояния $C_3A \cdot nH_2O$.*



Вода считается агрессивной в следующих случаях: 1) гидрокарбонатная щелочность (HCO_3' мг-экв/л) меньше величин, приведенных в таблице; 2) водородный показатель (рН) меньше величин, указанных в таблице; 3) содержание свободной углекислоты превышает величину, определяемую по формуле $a[Ca^{++}] + b + k$, где a , b , k — коэффициенты, принимаемые по вспомогательным таблицам, приведенным в [21]; Ca^{++} — содержание в воде ионов кальция, мг/л; 4) ионов Mg^{++} не менее 1000 мг/л, что превышает величину, определяемую по формуле $k - [SO_4^{--}]$, где $[SO_4^{--}]$ — содержание SO_4^{--} , мг/л; k — коэффициент, принимаемый по таблице, приведенной в [21]; при содержании Mg^{++} менее 1000 мг/л вода не обладает магниальной агрессивностью, независимо от содержания ионов SO_4^{--} .

Катион Ca^{++} в ряде случаев может вступать в реакции и из $Ca(OH)_2$ — продукта гидролиза минералов в цементе. Гидросуль-

* Если гидратированный трехкальциевый алюминат будет переходить в менее основный гидроалюминаты и сульфоалюминат станет кристаллизироваться из раствора (например, в пуццолановых цементах), разрушения бетона не произойдет, так как не возникнут те значительные сосредоточенные внутренние напряжения, о которых было сказано. При этом имеет значение содержание минерала C_3A в клинкере портландцемента, само качество и количество гидравлической добавки. Понижение концентрации свободной извести полностью исключает или резко замедляет возникновение сульфатной и гипсовой коррозий. Сказанное о влиянии процесса образования гидросульфоалюмината и гипса на стойкость бетона в сульфатных водах имеет значение, так как абсолютные объемы гидросульфоалюмината и гипса больше, чем сумма объемов веществ, из которых они получаются. Отсюда важна организация процесса их образования, чтобы обеспечить ход твердения цемента без разрушения.

Таблица X.1

Условия омыкания бетона водой (окружающая среда)	Толщина конструк- ции, м	Виды агрессии *															
		Безнапорные сооружения								Напорные сооружения							
		Обычные и сульфато- стойкие портландцементы				Обычные и сульфатостойкие пуццолановые, песчано-пуц- цолановые и шлакопортланд- цементы				Обычные и сульфато- стойкие портландцементы				Обычные и сульфа- тостойкие пуццолано- вые и шлакопортланд- цементы			
		1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
Открытый водоем или грунт с коэффи- циентом фильтрации более 10 м/сут.	<0,5	1,5	6,7	6	6000	0,5	6,7	0	5000	2,0	7,0	0	6000	0,7	7,0	0	4500
	0,5—2,5	0,75	6,2	20	7000	—	6,4	15	6000	1,2	6,5	10	6000	0,4	6,7	5	5000
	>2,5	0,4	5,7	30	8000	—	6,0	25	7000	0,7	6,0	20	7000	—	6,2	15	6000
Грунт с коэффици- ентом фильтрации от 10 до 0,1 м/сут.	<0,5	0,75	6,2	40	8000	—	6,4	30	7000	1,0	6,4	25	7000	0,4	6,6	20	6000
	0,5—2,5	0,4	5,2	80	9000	—	5,5	60	8000	0,6	5,7	50	8000	—	6,0	40	7000
	>2,5	—	—	—	—	—	—	—	—	—	5,2	80	—	—	5,5	70	—
Грунт с коэффици- ентом фильтрации >0,1 м/сут.	<0,5	—	—	—	—	—	—	—	9000	—	5,2	80	—	—	5,5	70	8000
	0,5—2,5	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	9000
	>2,5	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—

* Виды агрессии: № 1 — норма выщелачивающей агрессивности воды-среды; № 2 — норма ма окислительной агрессивности воды-среды; № 3 — норма углекислотной агрессивности воды-среды; № 4 — норма магнзисальной агрессивности воды-среды.

фоалюминат кальция указанного вида (его объем) увеличивается в 2,86 раза * против объема исходных компонентов реакции образовавшегося соединения — новой твердой фазы, поэтому цементный камень разрушается из-за больших напряжений, возникающих при кристаллизации этого новообразования. Сказанное следует сравнить с изложенным материалом § 14, где показано, что благодаря учету напряжений удается их использовать с высокой технической эффективностью при изготовлении расширяющихся и напрягающих цементов.

Учитывая возможность разрушения бетона (раствора), чрезвычайно важно точно дозировать гипс ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$). Возможны следующие два случая разрушения бетона при воздействии сульфатных вод: 1) чисто сульфоалюминатного, когда в воде-среде незначительна концентрация иона SO_4^{--} ; 2) комплексного воздействия, где, кроме иона SO_4^{--} , при его значительных концентрациях в воде-среде разрушение вызывается также кристаллизацией гипса. Результаты действия сульфатной коррозии на бетон неодинаковы и зависят не только от концентрации иона SO_4^{--} , но и от солевого состава воды, что отражено в нормах [21]**.

Проф. В. В. Кинд показал различие в процессе сульфоалюминатной коррозии цементного камня, которое зависит от концентрации иона SO_4^{--} в воде-среде. Корродирующее действие солей серной кислоты, диссоциированных в воде-среде, таких, как катионы всех металлов, основания (гидраты окислов) которых имеют меньшую по отношению к $\text{Ca}(\text{OH})_2$ растворимость в воде, связано с их растворимостью. Например, если катионы Mg^{++} , Al^{+++} с аналогичной им по указанному признаку растворимостью, заполняя капилляры бетона при подсосе воды, соединятся с ней (с гидроксильным анионом извести OH') в стабильные для этих условий соединения, то резко снизится в цементном камне ее содержание (этот случай типичен для коррозии бетона сточными промышленными водами).

Следовательно, в условиях протекающей коррозии бетона для восстановления величины pH до нормального значения произойдет дальнейшее растворение $\text{Ca}(\text{OH})_2$ и при его полном связывании — последующее растворение гидросиликатов и гидроалюминатов. И в указанном случае различно действие отдельных катионов, реагирующих с гидроксильным анионом извести. Различие состоит в растворимости получающихся новообразований. Если новообразования, заменяющие первичные продукты гидратации минералов цемента, обладают малой растворимостью, они будут уплотнять цементный камень, кальматируя — закупоривая его поры. Итак, соз-

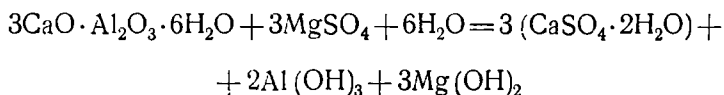
* Вместо одной молекулы $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ с молекулярным объемом 150,12 см³ и трех молекул гипса. Отметим, что катион Ca^{++} поступает в круг реакции в результате диссоциации $\text{Ca}(\text{OH})_2$ — извести цементного камня.

**Так, при содержании в 1 л воды до 1000 мг аниона SO_4^{--} независимо от катионов (натрия, магния, кальция), с которым связан этот анион серной кислоты, коррозия имеет один и тот же характер; при более высокой концентрации особое значение имеет содержание в воде катиона Mg^{++} .

дается препятствие для дальнейшего развития коррозии агрессивными ионами воды-среды благодаря вовлечению в круг реакции катионов металлов, основания которых (гидраты окислов) характеризуются меньшей растворимостью, чем растворимость известняка цементного камня.

Если гидратные соединения (продукты реакции), образующиеся при коррозии, по своей природе формируются с гидроксильными анионами известняка в растворимые слабо ионизированные соединения, то они также будут необратимо реагировать с $\text{Ca}(\text{OH})_2$; при этом в отличие от труднорастворимых соединений их будет вымывать из бетона вода-среда. Таким образом, в случае коррозии цементного камня ущерб для качества бетона связан с особенностями продуктов коррозии — их большей или меньшей растворимостью и степенью ионизирования. По этой причине в действующей инструкции по проектированию (Признаки и нормы агрессивности воды-среды для железобетонных и бетонных конструкций. СН 249—63 [21]), в частности, учитывается и возможность содержания в воде-среде ряда солей, например солей аммония (аммонийная агрессивность).

Изменение интенсивности коррозии бетона зависит также от растворимости известняка, образующейся при гидролизе и гидратации цемента. Ее вымывание зависит от степени растворимости кальциевой соли, образующейся при рассмотренных выше реакциях. Чем выше растворимость образующейся кальциевой соли, тем быстрее произойдет удаление известняка. Указанное деление коррозии по механизму ее протекания на три вида условно, что видно из описания ее различных случаев. На примере коррозии бетона сернокислым магнием, содержащемся в воде-среде, реакция с гидратированным трехкальциевым алюминатом, в случае повышенной концентрации этой соли в воде, выглядит по В. Н. Юнгу следующим образом:



При содержании аниона SO_4^{--} в воде-среде до 1000 мг/л будет создаваться высокосульфатная форма гидросульфоалюмината, который вызовет коррозию III вида. Вместо гидросульфоалюмината образуется гипс, также вызывающий деструкцию бетона, и гидраты двух катионов, не имеющие вяжущих свойств. Разрушение от кристаллизации гипса, образующегося по реакции $\text{Ca}^{++} + \text{SO}_4^{--} = \text{CaSO}_4$, связано с тем, что его объем в 2,24 раза больше объема известняка (молекулярный объем $\text{Ca}(\text{OH})_2$ равен 33,23 см³, молекулярный объем гипса $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ — 74,54 см³).

Рассмотренные случаи коррозии показывают, что она всегда связана с анионами или катионами различных солей (в природных водах анионом всегда является SO_4^{--} , в промышленных — также ряд других анионов).

§ 63. Разрушение бетона в воздушных средах при стабильных и переменных температурах

Известны случаи разрушения бетона в воздушных средах, связанные с химическими процессами. Причиной одного из таких разрушений послужила реакция между «щелочами» цемента (Na_2O и K_2O) и кремнеземом заполнителя (см. § 33). Разрушения бетона могут быть из-за наличия в воздушной среде различных газов, совместная адсорбция которых с парами влаги создает агрессивные условия, аналогичные рассмотренным в § 62. Такие разрушения, подобные разрушениям природных каменных материалов, названы выветриванием.

В технической литературе, посвященной долговечности каменных сооружений, встречаются различные названия долговечности — погодостойкость, климатическая стойкость. Под этим понимается сохранение материалом сооружения природных качеств (прочности, плотности, минералогического состава и других показателей качества). Изучение поведения в воздушных средах каменных материалов во многом помогает изучению бетона (раствора). Анализ службы каменных сооружений, построенных несколько веков назад, интересен тем, что сроки их эксплуатации во много раз превышают сроки эксплуатации бетонных сооружений, строительство которых начато менее 100 лет назад*.

Кроме того, в снижении стойкости сооружений решающим является систематическое загрязнение воздушного бассейна в связи с исключительно быстрыми темпами развития промышленности и невниманием к вопросу очистки отходящих газов. Как известно, охрана природы — государственная задача, которая решается не только в масштабах одного государства.

Атмосферный воздух, кроме присущих ему газов, содержит различные химические соединения. Так, в дыме можно обнаружить SO_2 , SO_3 , CO , CO_2 , HCl , сажу и ряд других соединений, в том числе примесь пыли, способствующей истиранию поверхностного слоя сооружений. Пыль также способствует произрастанию на поверхности, а по мере разрушения материала и в его глубине различных растений (водорослей, лишайев, деревьев). От выделения ими химических соединений и развития корневой системы происходит интенсивное разрушение бетона.

Углекислота CO_2 и влага воздуха, реагируя с углекислым кальцием бетона CaCO_3 , образуют хорошо растворимые двууглекислые соли $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$, которые из поверхностных слоев бетона вымываются дождевой водой. Как с минералами горных пород, так и с новообразованиями цементного камня, крупным заполнителем некоторых каменных пород, происходит реакция газов воздуха. Напри-

* Интереснейшим примером является разрушение белокаменных памятников Владимиро-Суздальской Руси в связи с образованием кристаллов сульфатных солей. В частности, выдвинуто предположение об образовании сульфатов в карбонатном каменном материале из-за адсорбции на его поверхности сернистого ангидрида SO_2 .

мер, известны случаи разрушения балок пролетных строений мостов там, где из водоемов систематически на поверхности бетона адсорбируется сероводород H_2S . Учитывая возможное разрушение бетона в воздушной среде, необходимо знать ее состав и соответствующим образом проектировать долговечный бетон.

§ 64. Разрушение бетона при переменном воздействии воды и отрицательных температур

Наряду с изучением механических свойств бетона и железобетона — прочности при разных случаях напряженного состояния от действия статических и динамических нагрузок, ползучести, усадки — громадное значение приобрело систематически развивающееся исследование условий стойкой работы этих материалов. В основу изучения морозостойкости, как и других свойств, определение которых связано с изучением деформаций бетона (раствора), положен принцип его испытания до стадии разрушения. Неправильно морозостойкости оценивать по лимитированному числу циклов, нормируя величину потери прочности бетона (раствора) и массы образцов. Это приводит к случайностям в оценке качества и не позволяет судить о морозостойкости конкретного бетона по существу.

Однако неверно изучать морозостойкость только путем изменения способа оценки этого свойства без привлечения ряда положений, в первую очередь, принципа получения бетона любой длительной сопротивляемости воздействию внешней среды. Это можно записать для любого агрессивного воздействия в виде (по аналогии с таким же, но более общим выражением, приведенным в § 53):

$$R_T = kR_{28},$$

где k — коэффициент роста прочности бетона за T лет его службы бетона или коэффициент сработки микробетона Юнга в цементном камне и процессов кристаллизации различных фаз и гелевой составляющей последнего без наличия процессов деструкции; R_{28} — прочность бетона на 28 сут. твердения.

Проектирование морозостойких бетонов — создание бетонов с такими структурными компонентами (цементным камнем, каменными заполнителями, контактной зоной между ними), в которых не будут протекать процессы замерзания воды или часть ее будет многократно превращаться в лед и вновь переходить в жидкое состояние без деструкции материала. Так как по выдвигаемому нами положению [12, 54, 70, 72, 74] коэффициент k всегда больше 1, бетон не только не снизит прочность, но в процессе длительного твердения будет систематически упрочняться.

Следует еще раз напомнить, что цемент является полиминеральным и полидисперсным материалом, агрегированным в комочки из слипшихся зерен. В технической литературе можно встретить утверждение о том, что при существующих методах испытания упрочнение бетона — показатель его высокой долговечности. Это не так, потому что в любом бетоне, в том числе и не относящемся к кате-

гории долговечных, имеются процессы упрочнения и деструкции. С определенного числа циклов замораживания и оттаивания процессы деструкции будут превалировать над процессами твердения, и материал разрушится. Сложность изучения морозостойкости бетона пока не позволяет отказываться от экспериментального пути.

Эксперименты по обширному циклу исследований морозостойкости бетона и железобетона, условий выполнения работ и твердения бетона при одновременном воздействии агрессивных сред, особенно в лабораторных условиях, весьма сложны, трудоемки и дороги. Естественным является организация экспериментов в натурных условиях. Для этого в СССР созданы климатические станции, где бетон замораживается и оттаивает от двух до нескольких раз в течение каждых суток. Опыты на таких станциях позволили сделать ряд выводов для теории бетона и практики строительства [12, 19, 74, 75]. Последующие исследования должны, в частности, выяснить виды связей между испытаниями на климатических станциях и в лабораторной камере холода.

Важно решить вопрос о степени разрушения бетонов при понижении температуры замораживания ниже стандартного показателя; уточнить границы зон бетона в сооружениях [66, 75, 77]. Испытания и длительные сроки эксплуатации различных бетонов позволяют утверждать, что бетоны высокой морозостойкости обладают и другими важными техническими свойствами. Отсюда (с известной условностью) нами составлены проскты связи свойств через марку морозостойкости (табл. X.2).

Для установления такой универсальной зависимости свойств бетона между собой их определение должно осуществляться в комплексном плане с применением наиболее современных методов. Это определение структуры цементного камня (рентгенографический, электронно-микроскопический, микроскопический, дериватографический анализы цемента); минералогического состава; водотделения цемента и количества вовлеченного воздуха; систематический контроль изменений в структурах компонентов бетона, в его текстуре при помощи ультразвуковой дефектоскопии; испытание деформативных свойств бетона, в том числе на ползучесть, виброползучесть, усадку и др.

Нельзя рассматривать каменные заполнители вне их генезиса, а цементный камень — вне технологии производства работ. Например, неморозостойкость структуры каменных материалов вызывает разрушение бетона даже при наличии в данных агрессивных условиях цементного камня с долговечной структурой. Кроме того, повышение морозостойкости цементного камня усиливает и ускоряет процесс такого разрушения бетона.

В технической зарубежной литературе до начала систематического изучения морозостойкости бетона можно было встретить значительное количество неверных формализованных положений. О. Граф считал, что устойчивость бетона зависит от его механической прочности; Мак-Миллан устойчивость бетона связывал с назначением в нем минимального расхода цемента; Дэвис устойчи-

Т а б л и ц а X.2

№ п.п.		Перечень характеристик материалов	Показатели при марке морозостойкости бетона							
			Мрз 25	Мрз 50	Мрз 100	Мрз 200	Мрз 500	Мрз 1000	Мрз 1500	Мрз 6000
Характеристика цемента										
1	Химический состав цемента	Требуется уточнения в части неучитываемых составляющих P, Ti, B, F и др. Химический состав должен отвечать требованиям ГОСТа (не учтено, как на морозостойкость бетонов влияют добавки — электролиты, как повышающие, так и снижающие морозостойкость, например НКМ, НКН, хлористый калий)	Можно не учитывать То же Позволяет практически использовать представления о зависимости формирования структуры цементного камня от действующего минералогического состава цемента							
2	Содержание минерала $C_3S, \%$	Можно не учитывать	То же							
3	То же, $C_2A, \%$	Позволяет практически использовать представления о зависимости формирования структуры цементного камня от действующего минералогического состава цемента	То же							
4	Петрографический состав, в том числе структурные особенности клинкера (форма кристаллов, характер кристаллизации и др.).	Не имеет значения, но не ниже 1,5	Наиболее целесообразно: разное содержание, близкое к верхнему пределу, но не ниже 2—2,5							
5	Содержание гипса	Верхний предел нормы 3—3,5	Верхний предел нормы 3—3,5							
6	П. п. п., дополнительно возникшая отложения цемента, %	Можно не учитывать	То же							
7	Тонкость помола цемента по удельной поверхности, $см^2/г$, и по кривой распределения зернового состава	Любая удельная поверхность, обеспечивающая требование п. 12. Кривая распределения зернового состава имеет решающее значение для неразрушающихся бетонов ** и характеризуется близкими числовыми значениями зерен цемента в диапазоне активных зерен	То же							
8	Содержание минеральных мелкокомпонентных добавок: гранулированного доменного шлака *** гидравлических неактивных	Обеспечивающее получение стандартных марок цемента по прочности То же	По ГОСТу							
			Требуется уточнения							
			Не допускается							
			То же							

9	Содержание щелочных окислов (K_2O и Na_2O)	Требует дополнительного исследования	Не допускается выше 0,6	Не допускается
10	Пластичность растворной смеси при определении марки цемента (при $V/P=0,40$ должна иметь расплыв ко- нуса при определении по ГОСТ 310—60), мм	≥ 105	$\geq 110—115$	≥ 115
11	Введение комплекса поверхностно- активных добавок: группа пластифицирования из усло- вия существования трех групп введение гидрофобизирующих до- бавок	Может быть любая группа из трех	I и II	I
12	Марка цемента по ГОСТ 10178—62 ****	—	I и II	I

Ведение гидрофобизирующей до- бавки в оптимальном количестве и с. д. б.

При проектировании бетона по формуле комплексной марки ($\Phi—X—П$) и с учетом требований данной таблицы

Характеристика каменных материалов

13	Морозостойкость гравия (щебня)	Выше морозостойкости бетона	—	Не допускается сочетание зерен
14	Сочетание горных пород в бетоне	Не нормируется		гранита и кварца с зернами карбо- натных пород
15	Чистота поверхности зерен, отсут- ствие ледяных линз на поверхности зерен и другие требования	По ГОСТу для мелкого и крупного заполнителя		

№ п.п.	Перечень характеристик материалов	Показатели при марке морозостойкости бетона								
		Мрз 25	Мрз 50	Мрз 100	Мрз 200	Мрз 500	Мрз 1000	Мрз 1500	Мрз 6000	
Характеристика бетонной смеси и особенностей технологий работ										
16	Пластичность-жесткость смеси	Определяется условиями работы и табл. X.1 при сохранении стабильности смеси			Определяется максимально допустимым расходом воды в соответствии с п. 18 при сохранении стабильности смеси и использовании вибратора с надлежащей характеристикой					
17	Минимальный расход цемента, кг/м ³	Определяется рядом условий: 1) обеспечением плотности бетона, при которой не возникает коррозии арматуры; 2) водопроницаемостью бетона; 3) выбором марки цемента исходя из условия $R_d = (2-2,5)R_{628}$								
18	Максимальный расход воды вне зависимости от сохранения выбранного по расчету прочности В/Ц с увеличением расхода цемента, кг/м ³	При назначении состава бетона должны учитываться требования из «Указаний СН 406—70» при приготовлении смесей с пластифицирующей добавкой Не нормируется 190—200 175—190 165—175 155—165 140—150 110—130								
19	Различные характеристики	При этом недопустимо увеличение расхода воды и соответствующее увеличение цемента исходя из положения, что $R_6 = f(B/Ц)$, так как между прочностью и морозостойкостью бетона нет однозначной зависимости Для любых составов смеси требуется: 1) выбирать соответствующие ее составу средства и условия для качественного дозирования компонентов и их смеси в сооружении без расслоения и потери заданной пластичности-жесткости; 2) применить вибратор, обеспечивающий формирование из запроектированных смесей бетона заданной плотности без расслоения смеси								

Характеристика бетона исходя из представления об его комплексной марке

20	Минимально допустимый срок ухода за бетоном при 100% относительной влажности внешней среды, не менее, сут.	Полноценная гидратация зерен цемента (длительная «сработка» микробетона Юнга) 7 7 10 15 60 90 180 180 Не все указанные здесь сроки ухода за бетоном, кроме длительных, обеспечивают сохранение в нем заданного количества воды					
----	--	---	--	--	--	--	--

Разные характеристики:
марка бетона по механической
прочности
плотность бетона

усадка бетона высокой морозо-
стойкости
водонепроницаемость бетона
твердение при пропаривании
многократное вибрирование

Для высоких марок бетона по морозостойкости, как правило, может быть выше требуемой по статическому расчету на прочность.

Бетоны без воздухововлекающих и пластифицирующих добавок с высокой морозостойкостью имеют минимальные показатели ползучести (определение ползучести у бетонов, неморозостойких на рассчитанное число циклов, при систематически нарастающей деструкции цементного камня и текстуры бетонов может служить лишь методическим приемом определения морозостойкости, не характеризующая собственно деформации ползучести).

Как правило, незначительная, что следует из перечня требований к характеристикам цемента.

Высокая, характеризует морозостойкость бетона

Твердение бетона на поргланцементях при пропаривании значительно снижает указанные марки по морозостойкости

Многократное вибрирование бетонной смеси с подобранными интервалами резко повышает морозостойкость бетона

* Указанное содержание минерала C_3A в ряде случаев не точно отражает его отрицательное воздействие на формирование структуры цементного камня, так как цифры условно отражают состояние действующего минерала, вскрытого при помоле клинкера для реагирования с водой.

** Необходимость развития роли тонкости помола через показатель зернового состава.

*** Гранулированные доменные шлаки даже тонкого помола ($s=4000 \text{ см}^2/\text{г}$) при высокой тонкости помола клинкера могут обеспечить высокую морозостойкость, если в результате гидратации образуются новые соединения и зерна шлака не останутся вне этого процесса.

**** Для получения бетона с высокой морозостойкостью необходимо выполнять все требования таблицы. В ряде случаев марка морозостойкости требует применения бетона прочностью, выше расчетной.

вость бетона ставил в зависимость от механической прочности и химического состава цемента; Лайз долговечность бетона считал мало зависящей от прочности и химического состава цемента и т. д. Интересное и правильное положение об определении морозостойкости строительных материалов высказал в 1915 г. К. Я. Илькевич в оригинальной работе «Строительные вяжущие вещества, бетонные огнестойкие постройки и их санитарная оценка». Он считал, что проба на мороз в различных климатах должна производиться различно, а именно — в соответствии с температурными условиями каждой данной местности. Морозоупорность материалов для каждой местности должна быть, так сказать, своя. К сожалению, это верное мнение до сих пор в полной мере не находит применения не только во многих исследованиях, но и не отражено в нормативных документах. На данном уровне знания вопроса рекомендуется учитывать расчетное число циклов замораживания и оттаивания по формуле

$$M_{pз} = T k_1 k_2,$$

где T — проектный срок эксплуатации сооружения (конструкции), лет; k — число наиболее характерных температурных переходов за год для местности, в которой эксплуатируется сооружение; k_2 — коэффициент запаса, назначаемый с учетом производства ремонтных работ по восстановлению разрушенной части бетона в сооружении и конструкции (от 1 до 2).

По рассчитанному числу циклов замораживания назначают материалы, состав бетона, условия его приготовления (табл. X.2). Заметим, что данные для этой таблицы были рассчитаны для температур воздуха не ниже $(-25) - (-30)^{\circ} \text{C}$. Следовательно, при более низких температурах, учитывая, что бетон, не имеющий высокую морозостойкость, разрушается в несколько раз быстрее, надо применять крайние составы бетона (не разрушающиеся при нескольких тысячах циклов испытания). Однако получение бетона особо высокой долговечности не требует больших затрат или удлинения сроков строительства. Не трудно показать, что долговечность сооружений, их стоимость, равная стоимости бетонов небольшой долговечности, зависит от высокой культуры строительных работ. Это не означает, что любой цемент и каменный заполнитель можно применять там, где они не пригодны, что видно из таблицы назначения этих материалов для бетонов рассчитанной морозостойкости на различное число циклов испытания. Таким образом, высокую морозостойкость можно обеспечить на реально существующих материалах при точном соблюдении условий, содержащихся в табл. X.2. Неверно считать какой-либо из ее пунктов второстепенным или полагать, что, выполняя только часть их, можно достичь высокой морозостойкости бетона.

Для разработки аналитических методов расчета морозостойкости бетона (раствора) необходимы значения перечисленных выше условий, которые, в свою очередь, связаны и определяются сложными физико-химическими процессами твердения цемента. Неучет

Таблица X.3

Содержа- ние в 1 м³ бетона, кг		Содержание с. с. б., % к массе цемента	Показатели морозостойкости, баллы, при количестве циклов замораживания и оттаивания								
воды	це- мента		120	198	265	295	319	427	498	539	567
200	500	—	9	8—9	7—8	8	3—7	1—3	—	—	—
200	500	0,2	—	—	—	—	—	9—10	—	9—10	8—9
180	500	—	9—10 т	9—9 т	—	8	7	3—6	—	0—3	0—3
180	500	0,2	—	—	—	—	—	—	—	—	8—10
150	500	—	—	10 т	—	9—9 т	8—9 т	7—8	—	7—7	7—7
150	500	0,2	—	—	—	—	—	—	—	—	9—10
140	500	—	—	—	—	9	7—8	6—8	—	1—5	1—4
140	500	0,2	—	—	—	—	10—10 т	9—10 т	—	—	8 т—9 т
160	400	—	10 т	—	—	9—9 т	—	—	6—8	3—7	2—6
160	400	0,2	—	—	—	—	9—10	—	—	—	8—9
150	400	—	10 т	9	—	—	8 т—9 т	—	4—6	—	3—5
150	400	0,2	—	—	—	—	—	—	—	—	9
140	400	—	—	10 т	—	9 т—10 т	—	7—8 т	6—8	5—7	5—7
140	400	0,2	—	—	—	—	—	—	9—10	—	9
130	400	—	10—10 т	10 т	—	—	—	—	—	—	7
130	400	0,2	—	—	—	—	—	—	—	—	9
120	400	—	10 т	—	—	—	10—9 т	—	—	5	4
120	400	0,2	—	—	—	10—10 т	—	—	—	—	9
150	325	—	9—10 т	9	—	7—8	7	2—5	1—3	—	0
150	325	0,2	—	—	—	—	—	—	—	—	8—9
130	325	—	9—10 т	8—9	—	7—9	6—9	1—7	—	1—4	0—3
130	325	0,2	—	—	—	—	—	9—10	—	—	1—9
120	325	—	—	—	—	10 т	—	—	—	7	7
120	325	0,2	—	—	—	—	—	—	—	—	—*
110	325	—	—	—	—	—	—	9—10 т	—	—	9—10
110	325	0,2	—	—	—	—	—	9—10	—	—	9—10
140	250	—	10 т	8—9	—	—	7	3—5	—	1	0
140	250	0,2	—	—	—	—	—	9	—	—	7—9
120	250	—	—	9—10	—	9—10	—	9 т—10 т	—	—	9 т
120	250	0,2	—	—	—	9—10	—	—	—	8—10	8—9
110	250	—	—	10 т	—	—	9	—	—	—	7—8
110	250	0,2	—	—	—	—	9—10	9	—	8—9	8

* В этом случае бетонные образцы не изменились по баллам и имеют высшую оценку.

Примечание. Буква т показывает образование трещин.

любого из пунктов табл. X.2 не позволяет судить о долговечности бетона. Например, неучет параметров контракции цемента, наличия или отсутствия минерала C_3A исключает возможность оценки качества капилляров в цементном камне; неучет условий ухода за твердеющим бетоном оставляет нерешенным вопрос о качестве капилляров и т. д. Только многофакторная зависимость позволит приблизиться к точному решению практической задачи по назначению долговечных бетонов. Предполагаем, что долговечны только те материалы, в которых при любом числе циклов не возникнет деструкция. Многолетние исследования [74] приводят к заключению, что, прежде чем отказаться от оценки морозостойкости по циклам испытания, необходимо с полной убедительностью устано-

вить механизм разрушения бетона (раствора) при данной агрессии и, не испытывая этот материал, научиться с должной надежностью определять те физические константы, числовые значения которых дают надлежащие сведения о стойкости бетона (раствора) и морозостойкости иными методами.

Многочисленные испытания морозостойкости бетонов (растворов) различных составов по методике, указанной выше, позволили прийти к утверждению о роли многофакторной зависимости, наметить перечень факторов и их числовые значения. Полученные результаты длительного замораживания и оттаивания указывают на

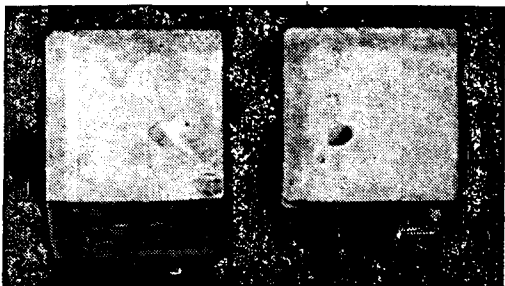


Рис. X.2. Разрушение балочки при многократном замораживании и оттаивании по сечению, имевшему воздушную пору

важность оценки морозостойкости с помощью ультразвуковой дефектоскопии. Некоторые исследователи считают, что после значительного числа циклов испытания (до 2 тыс.) бетоны (растворы) не могут разрушаться при дальнейшем увеличении срока испытаний.

Длительная сопротивляемость материала замораживанию и оттаиванию свидетельствует об относительно меньшем числе дефектных мест, с

которых в дальнейшем и начнется процесс деструкции. Начавшееся разрушение при дальнейшем испытании приобретает лавинный характер, что хорошо видно из табл. X.3 и X.4. Надо отметить положительное влияние добавки с. с. б. Следовательно, длительность испытания должна быть разделена как бы на два периода: 1) подготовительный, когда в зависимости от числа, характера и мест расположения дефектов возникает напряжение, вызывающее деструкцию материала; 2) период лавинных изменений в монолитности структуры цементного камня, когда разрушаются морозостойкие связи вследствие изменения их конструкции, до этого разрушения морозостойкой.

При выборе конкретной видо марки с учетом условий работы бетона (табл. X.5) следует руководствоваться дополнительными условиями, нормируемыми в соответствующих СНиПах и ГОСТах. В табл. X.6 развивается положение об отдельных технических характеристиках вяжущих.

Дефектными местами, вызывающими деструкцию в стадии подготовительного периода в бетоне и железобетоне, могут быть: 1) капилляры различных диаметров и качества с наличием в них воздуха и без него; 2) воздушные поры и полости разных размеров (рис. X.2); 3) контактный слой с минералом C_2S и крупными зёрнами минерала C_3S , образования из выделившейся извести; 4) кон-

тактный слой с минералами зерен шлака и различных минеральных добавок, не вступающих в химическую связь с новообразованиями цемента (с гидратированными силикатами кальция); 5) новообразования из ряда минералов цемента C_3A , C_4AF и аналогичные им структуры; 6) места, в которых несвоевременно появляются новообразования из гидросульфоалюмината.

Влияние указанных дефектных мест на морозостойкость нельзя рассматривать вне значений В/Ц и условий производства работ. Наличие в цементе преимущественно силикатов кальция при невысоком содержании воды в условиях длительных сроков твердения при оптимальных режимах обеспечивает частичное закрытие ряда дефектов, снижение их влияния. Следовательно, чем в более ранние сроки твердения бетон подвергается замораживанию и оттаиванию, тем больше вероятности его разрушения при прочих равных условиях.

Чтобы упростить представление о структуре капилляров, формирующихся при гидролизе и гидратации цемента, когда значительная часть воды затворения остается вне химического процесса, все капилляры следует разделить на активные и пассивные, исходя из механизма их действия на структуру цементного камня. Активные те капилляры, в которых вода переходит в лед — твердую фазу с возникновением напряжений, вызывающих деструктивный процесс в области их расположения; пассивные те, в которых независимо от того, переходит ли в них вода в лед или нет, не возника-

Т а б л и ц а X.4

Содержание в 1 м ³ бетона, кг		Содержание с. с. б., % к массе цемента	Оценка состояния концов шпал, баллы, при количестве циклов замораживания и оттаивания					Предел прочности бетона при сжатии через 28 сут., кг/см ² (10 ⁻¹ МН/м ²)
воды	це-мента		85	133	182	400	450	
105	350	—	—	—	—	IIa, IIa	II6, II6	547
120	350	0,2	—	—	—	IIa, IIa	II6, Va	547
120	350	0,2	—	—	—	III6, III6	V6, V6	526
125	400	0,2	—	—	—	III6, III6	III6, III6	526
130	350	0,2	IIa, IIa	IIa, IIa	IIIa, IIIa	IVa, IVa	Va, Va	527
130	350	0,2	—	—	IIIa, IIIa	IVa, IVa	Va, Va	507
140	350	—	—	—	II6, II6	VI6, VI6	VI6, III6	317
140	400	—	—	—	—	IVa, IIa	Va, VIa	317
140	400	—	—	—	—	IIa, IIa	II6, II6	317
145	500	0,2	—	—	—	IIa, IIIa	IIa, Va	317
150	450	—	—	—	—	III6, III6	VIa, VIa	372
150	450	—	—	—	—	III6, III6	VIa, VIa	510
150	450	—	—	—	—	III6, VIa	VIa,6, VIa, 6	488
150	450	—	IIa, IIa	IIIa, IIIa	IIIa, IIIa	VIa, VIa	VIa,6, VIa,6	488
150	450	—	—	—	II6, II6	IIIa, IIIa	Va, Va	510
150	450	—	—	—	—	IIa, VIa	IIa, VIa	566

П р и м е ч а н и я: 1. Железобетонные шпалы изготовлены по разной технологии с вибрированием смеси различными вибраторами (на виброплощадках СМ-475, девятишпальным вибратором, одношпальным поверхностным вибратором). 2. Для расшифровки условных обозначений дан рис. X.1.

Таблица X.5

Область применения различных цементов	Условия для последующего твердения цемента в бетоне			
	портланд-цемент	пуццоланового портландце-мента и много-компонентного на их основе	шлакопорт-ландцемент	глиноземистого цемента
В тяжелых бетонах и при стабилизации грунтов	Обеспечи-вают нор-мальный процесс	Особые условия работы	Оптимальны только в сборном и массивном железобетоне и бетоне	Применяют толь-ко для специаль-ных видов
Твердение при тем-пературе до +50° С и оптимальной влажно-сти	Близки к нормальному росту проч-ности	Неоптимальные усло-вия твердения (ниже оп-тимальных)		Сброс прочности до 50—60%
То же, при отрица-тельной	То же	Применять не следует		При условии ре-гулирования темпе-ратуры можно при-менять
То же, при холод-ном бетонировании	»	То же		Применять не следует
То же, при тепло-влажностной обработ-ке	Неоптималь-ные	Оптимальные при высо-ких температурах, близ-ких к 100° С		Сброс прочности до 50—60%
В массивном бетоне без применения специ-альных мер по охлаж-дению	Неоптималь-ные, образу-ются тре-щины в бе-тоне	Оптимальные		То же
В ажурном бетоне (без применения теп-ловлажностной обра-ботки и высокой отно-сительной влажности)	Оптимальные	Неоптимальные, приме-нять не следует		Оптимальные
В условиях жарко-го климата при соблю-дении надлежащего ухода	То же	Неоптималь-ные, при-менять не следует	Оптимальные	Сброс прочности до 60%

Область применения различных цементов	Условия для последующего твердения цемента в бетоне			
	портланд-цемента	пуццоланового портландце-мента и много-компонентного на их основе	шлакопорт-ландцемент	глиноземистого цемента
Дальность перевоз-ки смесей на отдель-ных видо-марках вя-жущих	Допускают дальние перевозки при регулировании процесса схватывания специальными мерами			
Скорость нараста-ния прочности	Можно ре-гулировать	Высокая при термо-влажностной обработке, относительно невысокая в нормальных условиях	Исключительно высокая	

Примечание. Сказанное относится и к легким бетонам.

Т а б л и ц а Х.6

Технические характе-ристики	Портланд-цементы	Пуццолановые портландце-менты и мно-гокомпонент-ные на их основе	Шлакопорт-ландцементы	Глиноземистые цементы
Прочность при нор-мальных условиях твердения	Обеспечи-вается для всех проек-тируемых марок	Обеспечивается только для части проектируемых марок	Обеспечивается для всех высоких марок	
Потеря прочности при нарушении режи-ма твердения (условий ухода с учетом влажности внешней среды)	Значитель-ная, особен-но для даль-нейших сро-ков, не вос-станавлива-емая	Значительная в любые сроки, не восстанавлива-емая	Незначительная	
Морозостойкость	Обеспечива-ется для всех проек-тируемых марок	Низкая	Достигается высокая стойкость только при пропарива-нии специ-альных сор-тов шлако-портланд-цемента	Обеспечивается для всех проекти-руемых марок

Технические характеристики	Портланд-цементы	Пуццолановые портландцементы и многокомпонентные на их основе	Шлакопортландцементы	Глиноземистые цементы
Воздухостойкость	Обеспечивается для всех проектируемых марок	Низкая	Обеспечивается для всех проектируемых марок	То же
Стойкость в агрессивных водах	То же	Высокая для ряда сред	То же	Высокая для ряда сред
Водонепроницаемость	»	То же	»	То же
Истираемость	»	Большая	»	»
Усадка и расширение	Регулируются специальными мерами			
Ползучесть	Регулируется специальными мерами		Низкая для шлакопортландцемента специального состава	Регулируется
Морозостойкость после пропаривания	Значительно снижается	Увеличивается по сравнению с нормальным твердением	Значительно увеличивается	Резко снижается

Примечание. Обеспечение стойкости в агрессивных водах и при щелочной коррозии требует выбора сорта цемента (в том числе и его химико-минералогического состава и добавок к нему). Рекомендации даны с учетом, что в каждом случае будут взяты оптимальные составы вяжущих, требуемые добавки, запроектирована технология работ и обеспечены оптимальные условия твердения бетонов (растворов).

ют напряжения, связанные с деструкцией цементного камня. Переход воды в лед зависит от ее температуры и размера капилляров, поэтому в капиллярах одного и того же диаметра процесс будет эпизодическим, следовательно, название капилляров активными или пассивными будет не стабильным.

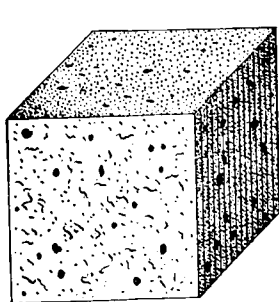
Возможен и такой случай формирования капилляров, когда в них защемлен воздух, попадающий в итоге контракции системы цемент — вода при их химическом взаимодействии (см. § 11).

В этих капиллярах воздух будет служить амортизатором критических напряжений при образовании льда, поэтому они не возникнут до начала лавинного процесса разрушения бетона (раствора) в стадии подготовительного периода. В настоящее время наличие или отсутствие воздушных буферов экспериментально показать не представляется возможным. Однако указанная гипотеза о роли воздушных буферов хорошо подтверждается изменением состояния бетона, результаты которого видны на рис. X.3.

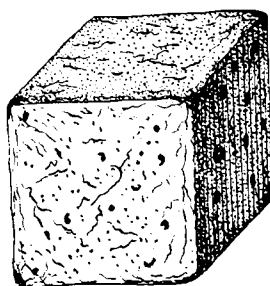


Рис. X.3. Разрушение бетона от замораживания и насыщения водой

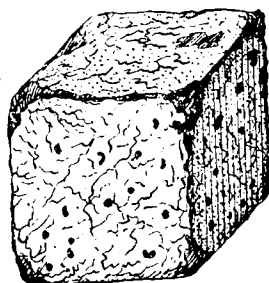
Свежеприготовленные образцы из бетона (раствора) в формах устанавливают в сосуд с водой, из которого можно удалять воздух. Затем их испытывают на морозостойкость параллельно с эталонными образцами. Результаты показывают, что прочность обеих серий образцов, твердевших в нормальных условиях, одинакова, но морозостойкость образцов, подвергавшихся насыщению, резко отличается от морозостойкости ненасыщенных. При этом оба периода разрушения как бы сливаются в одну стадию. Образцы разрушаются сразу по всему объему, что легко проверить, растирая его руками на мелкие частицы. Известно, что образцы, изготовленные на морозостойком каменном материале, постепенно разрушаются, начиная с поверхности, систематически углубляясь в толщу или с участков бетона (раствора), не содержащих воздух. В этом же опыте удается отделить каждое зерно песка, так как цементный камень полностью разрушен и потерял монолитность.



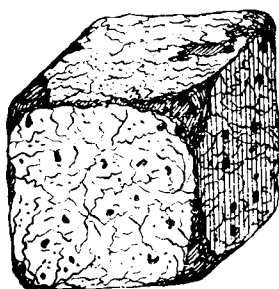
Балл 10



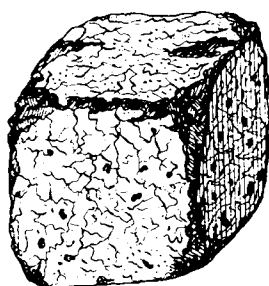
Балл 9



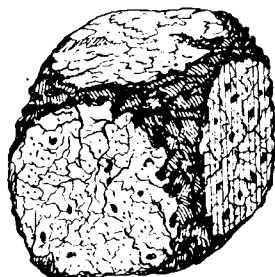
Балл 8



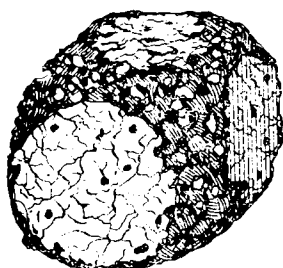
Балл 7



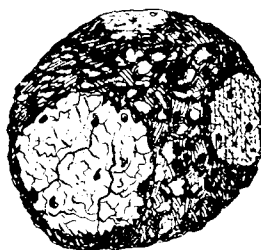
Балл 6



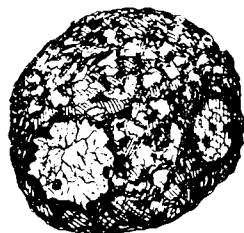
Балл 5



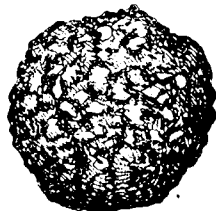
Балл 4



Балл 3



Балл 2



Балл 1

Рис. X.4. Эталоны для оценки степени разрушения бетонных и растворных образцов

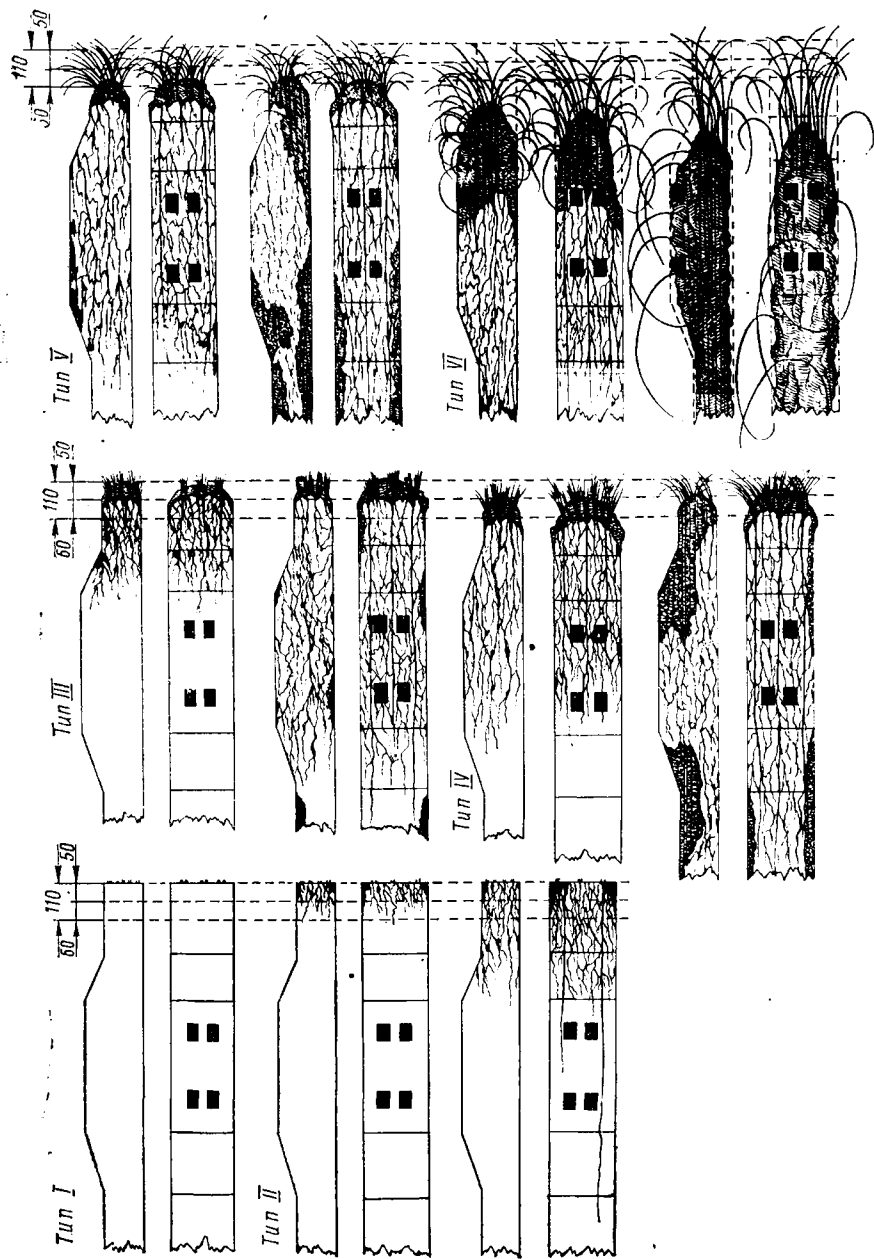


Рис. X.5. Эталоны для оценки степени разрушения напряженно-армированных щал

Перечисленные дефектные места в цементном камне можно рассматривать именно с позиций этого эксперимента, т. е. по причине производства работ, в технологии которых этот факт не учтен. Только направляя процесс структурообразования в нужное русло для создания долговечного материала, можно получить и надлежащий эффект. Следовательно, необходимо применять бетонные (растворные) смеси с минимальным содержанием воды; уплотнять смеси до заданной плотности, не допуская расслоения; обеспечивать длительность твердения, заданную в проекте; использовать только такие материалы, которые рассчитаны по морозостойкости в соответствии с указаниями табл. X.2.

Сказанное о роли пассивных и активных капилляров в бетоне (растворе) нужно использовать при анализе различных исследований морозостойкости. Неучет температурного фактора приводит к серьезным ошибкам, так как один и тот же состав бетона, если он не проектируется как долговечный, при одних температурах замораживания морозостоек, а в условиях эксплуатации сооружения неморозостоек из-за более низкой температуры воздуха. Для оценки бетона после визуального осмотра предложена десятибалльная шкала (рис. X.4). То же следует сделать и для других конструкций при изучении их стойкости с параллельной оценкой состояния материала с помощью ультразвукового дефектоскопа.

На рис. X.5 показан эталон для оценки степени разрушения, например, напряженно-армированных шпал.

§ 65. Свойства бетона и их взаимосвязь

Постепенное и последовательное развитие знаний о бетоне как универсальном строительном материале приводит к необходимости изучать не только традиционные для каждого материала прочностные свойства, но и такие, которые исследованы недостаточно, что не позволяет правильно использовать их при проектировании сооружений из бетона (железобетона). Понятие «правильно использовать» рассматривается как возможность более экономичного использования материалов при изготовлении бетона (железобетона) и конструкций из них. Неучет свойств материала может привести к недолговечной работе бетона и постепенному разрушению деталей и конструкций. К сожалению, еще не выявлены строгие закономерности, чтобы аналитически рассчитать поведение бетона (железобетона) в условиях эксплуатации и, пользуясь ими, упразднить коэффициенты, полученные экспериментальным путем на образцах в условиях, которые полностью моделируют условия работы бетона в сооружениях. По этой причине даже закономерность $R_b = f(B/C, R_c, t, p)$ не отражает истинную прочность бетона в сооружении, так как условия приготовления, транспортирования, уплотнения и твердения смеси в лаборатории и конструкции (сооружении) различны. При этом технолог обязан извлекать из материала максимум его возможностей, что достигается в лабораторных условиях. Следовательно, и на строительстве каждый технологический передел должен подчиняться этой цели. Поэтому закономерность $R_b = f(B/C, R_c, t, p)$ действительна только для бетонов, твердевших в оптимальных условиях, и неприемлема для случайных условий твердения. Многие специалисты считают, что в бетоне всегда должен оставаться резерв — микробетон Юнга * — негидратированное вяжущее, как гарантия против возникновения угрозы разрушения конструкций и сооружений. Это очень важный и принципиальный вопрос в технической политике производства цемента и строительства с применением бетона (железобетона).

Сторонники положения о необходимости иметь в твердеющем цементе такой своеобразный резерв из непрореагировавших зерен цемента считают, что эти зерна по мере образования дефектов в бетоне из-за деструктивных процессов как бы «залечивают» продуктами гидролиза и гидратации дефектные места. Однако остается открытым вопрос о величине такого резерва цементных зерен, о резерве для них воды, которая обеспечит получение новообразований, и нет убедительного доказательства, что места расположения этих зерен совпадают с местами возникновения дефектов.

* Этот резерв в среднем на 28 сут. твердения бетона (раствора, цементного камня) составляет от 40 до 60% от количества цемента в бетоне.

Любые конструкции или изделия из бетона (железобетона) нужно проектировать не на одну марку прочности, которая условно соответствует пределу прочности бетона через 28 сут. твердения (или другому только одному сроку, когда можно загружать конструкции расчетными нагрузками). Например, дорожные покрытия следует проектировать так, чтобы при систематически возрастающих нагрузках (при резком увеличении тоннажа грузовых автомобилей) покрытия можно было бы использовать за счет резерва цемента, неиспользованного при твердении на первый проектный срок*. Следовательно, все дорожные одежды (все слои) проектируют и в расчете на перспективные нагрузки.

Однако при проектировании любых конструкций допускается возникновение в бетоне процессов деструкции. Поэтому организация направленного структурообразования дает увеличение прочности. В большинстве случаев твердение быстро прекращается из-за производственных условий приготовления (пропаривания при резких режимах, непродолжительном уходе за твердеющим бетоном, использовании лежалого цемента, наличии в нем значительного количества грубых фракций и белита), недостаточного уплотнения смеси, наличия в цементе значительного количества трехкальциевого алюмината (не связанного с гипсом в гидросульфалюминат). Несовершенство использования цемента при прочих равных условиях связано с наличием C_3A и C_2S , недостаточной тонкостью помола, при содержании излишне мелких и чрезмерно крупных зерен, никогда полностью не участвующих в твердении, недостаточным содержанием гипса (в том числе недостаточной тонкостью помола), несвежестью поверхностного слоя зерен цемента, наличием в ряде случаев минеральных добавок в количествах, превышающих целесообразный предел, использованием видо-марок цемента не в оптимальных условиях и рядом других факторов, относящихся к условиям работ. В частности, некоторые исследователи показали, что помол клинкера на трубных и сепараторных мельницах приводит к различию в качестве цемента. Однако вяжущее, более активное к затвердеванию, позволяя быстрее получать механически прочные искусственные камни — конгломераты, не всегда приводит к получению и более стойких бетонов.

Бетонные работы дорогостоящи, поэтому нельзя применять бетон для строительства временных сооружений. Не следует использовать бетон случайного состава по комплексной марке и там, где его состав не полностью отвечает условиям работы во внешней среде. Работы надо осуществлять так, чтобы бетон в сооружениях служил любой срок эксплуатации сооружений, исчисляемый десятилетиями и сотнями лет.

Большая часть железобетонных конструкций работает в агрессивных средах, неучет которых приводит к недолговечной работе

* Имеется в виду срок расчета, принятый при проектировании покрытий для сдачи в эксплуатацию под нормативные нагрузки.

бетона (железобетона). Например, то же междуэтажное перекрытие в промышленных зданиях, рассчитанное только на механические воздействия без учета агрессивности среды — продуктов производства, разрушится в достаточно короткий срок. Таких примеров можно привести много (см. § 61—66). Следовательно, разрушение бетона — это факт неправильного его применения. Исключение любых дефектов, возникающих в бетоне в силу ранее сказанного, нельзя предотвратить за счет перерасхода цемента — сохранения в бетоне резерва вяжущих свойств.

На более ранних этапах развития теоретических представлений о бетоне различные причины его разрушения часто из-за недостатка знаний не дифференцировались по агрессивности среды. В последнее время причины разрушения бетона от агрессивного воздействия определяются в большинстве случаев с необходимой достоверностью. Отсюда и на основании теоретических положений о бетоне, изложенных выше, возникает возможность правильного выбора материалов и назначения оптимальных составов бетона. В табл. X.5 и X.6 приводятся такие рекомендации о применении различных видов цемента и технические характеристики получаемых бетонов.

Соответственно принятым правилам проектирования бетон всегда рассчитывают с некоторым запасом прочности. По аналогии и стойкость необходимо рассчитывать с учетом свойств бетона. Существует весьма сложная зависимость между различными свойствами, которую следует выяснять при постановке различных исследований бетона (раствора, цемента). Переход от одного какого-либо свойства к другому возможен, однако он должен проводиться на базе различных исходных характеристик, описывающих качество компонентов бетона, технологию работ и состав последнего. Без таких характеристик (см. табл. X.2) не удастся связать между собой различные свойства бетона.

Иллюстрировать сказанное можно существовавшим ошибочным положением о том, что чем выше прочность бетона, тем больше его морозостойкость, химическая стойкость и ряд других свойств. Это положение в частных случаях подтверждается опытами, однако в общем виде оно неверно.

§ 66. Марки бетона по прочности, морозостойкости, водонепроницаемости, химической стойкости

Технические свойства бетона, необходимые для проектирования бетонных и железобетонных конструкций, деталей, элементов, не все нормируются. Нормирование технических средств связано с развитием науки технологии бетона и химии цемента. Развитие исследований в этих разделах технических знаний позволяет постепенно расширять число нормируемых свойств. Так, сделаны попытки нормировать ползучесть бетона, существуют нормы на величину напряжения для напрягающего цемента, нормы на тепловыделение для цемента, применяемого в массивном гидротехническом бетоне, и ряд других норм. В качестве примера рассмотрим марки бетона

по широко применяемым показателям прочности, морозостойкости и водонепроницаемости.

В технических документах отражены показатели прочности, морозостойкости и водонепроницаемости с учетом специфики каждой области строительства. Например, в промышленном и гражданском строительстве в основном используются бетоны, у которых не нормируется показатель водонепроницаемости. Когда в указанных областях строительства этот показатель требуется применять, проектировщик обращается для справок к тем СНиПам и ГОСТам, где нормируется водонепроницаемость бетона. При составлении нормативов по водонепроницаемости испытания проводились на бетонных образцах, что не позволяло выяснить существо водонепроницаемости железобетона и бетона того же состава в конструкциях (а оно резко различно). Аналогично этому может служить и показатель нормируемой морозостойкости, отличный в конструкциях от эталонных составов бетона, испытанных в отдельных лабораторных образцах. Опыт показывает, что фильтрация воды, разрушение железобетонных конструкций протекает по контакту бетона с арматурой. Сказанное о различной стойкости бетона доказывает необходимость углубления знаний в области моделирования испытаний и разработки таких методов работ, которые исключают нарушение нормативных требований*.

Перечень марок бетона по прочности, морозостойкости и водонепроницаемости одинаков во всех технических документах. Если эти свойства проверяют при испытании образцов (для использования в строительстве или исследуемых для дальнейшего углубления сведений в области технологии бетона), то ряд других свойств нельзя проверять прямым путем. Для их обеспечения существуют рекомендации по качеству исходных материалов, а в ряде случаев и составу бетона. Сказанное можно иллюстрировать примером обеспечения химической стойкости бетона (см. § 62). Действительно, указанный прием является наиболее прогрессивным и к таким приемам надо в конечном счете свести все методы испытания. В частности, как показано в § 64, трудоемкую и длительную проверку морозостойкости бетона также можно заменить более совершенным аналитическим расчетом. При определении химической стойкости бетона четко выявляется роль плотности бетона и химико-минералогического состава цемента (точнее, продуктов его гидратации и состава микробетона Юнга). Широкие и многолетние экспериментальные работы позволили установить причину химического разрушения бетона и не допускать их техническими рекомендациями, ранее изложенными в Н. 114—54** (см. 62 и 64).

Такой же подход к замене испытаний приемом, заключающимся в выборе материалов и условий производства работ, можно было бы требовать и для определения остальных технических свойств.

* Несоответствие результатов таких испытаний — результат несовершенства методов испытания и нарушение правил производства работ.

** Эти весьма прогрессивные технические рекомендации теперь расширены и заменены Инструкцией СН 249—63 [21].

Для этого необходимо работать на материалах с точно нормированными характеристиками, а не со случайными свойствами, которые не оценены проверкой в пробных составах бетона и не получили оценки как типовые составы. Такой прием назначения типовых составов без предварительной трудоемкой работы правильный, и он постепенно выйдет на первый план в нормативных документах [67].

§ 67. ГОСТы и СНиПы на бетоны

Выполнение бетонных и железобетонных работ проводят в строгом соответствии со СНиП II-B.1—62 «Бетонные и железобетонные конструкции монолитные. Правила производства и приемки работ» и СНиП III-B.1—70 «Бетонные и железобетонные конструкции. Нормы проектирования» как единым нормативным техническим документом. Неучет особенностей работы материала при воздействии на конструкцию нагрузок, создающих в нем напряженное состояние, лишает технолога возможности объективно оценивать материалы для бетона и его состав. По этой причине неверно учитывать указания СНиПов только в части узко направленного использования требований раздела «Материалы для бетонных и железобетонных конструкций», хотя в этот раздел в общем виде также включены основные положения об условиях расчета конструкций. Одним из примеров может служить дополнение к указанию о перечне марок бетона, касающееся ограничений и рекомендаций для использования части марок (для бетонных конструкций не рекомендуется бетон с проектной маркой 300 и т. д.). В указанных СНиПах особо выделяется вопрос установления проектных марок бетона по морозостойкости (при $t \geq -40^\circ \text{C}$) и водонепроницаемости.

Для практического применения указаний о назначении морозостойкости и водонепроницаемости используются таблицы с рекомендациями необходимых марок для четырех групп условий эксплуатации бетонных (железобетонных) конструкций: при попеременном замораживании и оттаивании в водонасыщенном состоянии для конструкций, предназначенных к эксплуатации при расчетных температурах -40°C и ниже; при попеременном замораживании и оттаивании в условиях временного насыщения конструкций, предназначенных к эксплуатации при расчетных температурах -40°C и ниже; в грунтовых условиях при возможном эпизодическом воздействии на конструкции температур -40°C и ниже (что может быть в период строительства, монтажа и в ряде других случаев) и таких же условий работы материала в период строительства или ему аналогичных условий для внутренних конструкций сооружений и отапливаемых зданий.

По морозостойкости назначают марки от Мрз 100 до Мрз 300 и по водонепроницаемости от В-2 до В-6. Назначение марок связано не только с перечисленными условиями по степени силы их воздействия на бетон в железобетоне, но и с классом зданий и сооружений. Состояние постоянного водонасыщения считается наиболее

агрессивным. К 1-му классу относят наиболее ответственные (капитальные) сооружения; класс здания и сооружения должен устанавливаться с привлечением указаний соответствующей главы СНиП II-A.3—62 («Классификация зданий и сооружений. Основные положения проектирования»). В этих таблицах для корректирования числовых значений расчетных сопротивлений бетона сжатию (R_n и $R_{пр}$), которые приведены в СНиПе для конструкций без предварительного напряжения и конструкций с различной степенью обжатия бетона, используются коэффициенты условий работы бетона на сжатие m_b для соответствующих условий работы.

На эти коэффициенты умножают величины расчетных сопротивлений бетона на сжатие при изгибе (R_n) и на осевое сжатие (применная прочность $R_{пр}$). Необходимо отметить, что применение в большей или меньшей мере численно обоснованных коэффициентов условий работы материалов связано с непосредственной деятельностью технологов, и значения этих коэффициентов вытекают из хорошо организованных широких исследований и анализа службы построенных сооружений. Действительно, указанные в таблицах СНиПа коэффициенты условий работы бетона на сжатие m_b значительны. Так, для бетона, предварительно ненапрягаемого обжатием, $m_b=0,7$; для предварительно напряженных бетонов $m_b=0,75—0,85$. Это показывает, насколько ухудшается работа замораживаемых и размораживаемых конструкций при постоянном насыщении бетона водой. Для эпизодических условий насыщения водой и замораживания этот коэффициент возрастает у ненапрягаемых бетонов до 0,9, у напряженных — до 0,9—1 и при работе в грунтовых условиях и для внутренних конструкций и сооружений любых видов железобетона — до 1.

Нет оснований делать различие в работе материала на морозостойкость и водонепроницаемость для бетонов, напряженных и ненапряженных армированием, что показывает анализ этих свойств и опыты с такими бетонами [74]. Указанные величины лишней раз показывают, насколько важно обеспечить однородность бетона в конструкциях и повысить их качество, чтобы сократить затраты материальных ресурсов на изготовление бетона (железобетона). Участие технологов с их производственным опытом в творческих поисках проблем сокращения материальных затрат и повышения качества, несомненно, скажется и на более обоснованных и гарантированных рекомендациях, содержащихся в технических указаниях, которые должны регулярно пересматриваться.

РАЗДЕЛ ТРЕТИЙ

ТЕХНОЛОГИЯ БЕТОННЫХ РАБОТ

ГЛАВА XII

ПРИГОТОВЛЕНИЕ, ТРАНСПОРТИРОВАНИЕ, УКЛАДКА И УПЛОТНЕНИЕ БЕТОННОЙ (РАСТВОРНОЙ) СМЕСИ

§ 68. Приготовление бетонной смеси

Последние сорок лет в области приготовления бетонной смеси велись работы по решению следующих задач: 1) совершенствованию бетоносмесительного оборудования и увеличению его объема; 2) совершенствованию дозирочных устройств (пока с участием ручного труда) и питанию бетоносмесительного оборудования; 3) улучшению складского хозяйства, в частности, складов вяжущих, их разгрузки и транспортирования со складов на бетоносмесительные устройства; 4) оборудованию устройств для дозирования пластифицирующих ПАВ; 5) созданию инвентарных сборно-разборных заводов разной производительности; 6) автоматизации дозирования компонентов бетонной смеси; 7) включению в технологический процесс приготовления бетонной смеси мокрого помола клинкера и домолу цемента в различных мельницах, в том числе вибрационных, а также совершенствованию способов выдачи бетонной смеси в транспортные устройства и транспортирования ее к месту формирования в опалубке (формах) для бетонирования конструкций (сооружений).

Существует два способа производства бетонной смеси: 1) приготовление бетонной смеси с водой на стационарном заводе; 2) приготовление сухой смеси на стационарном заводе и затворение ее водой на месте работы, например в передвижных дорожных бетоносмесительных установках или в процессе транспортирования в автобетоносмесителях. Первый, централизованный способ приготовления бетонной смеси наиболее распространен, что является несомненным успехом в области технологии бетонных работ. Централизованное изготовление бетонной смеси положительно сказывается на технико-экономических показателях заводов и качестве бетона.

В организации централизованных бетонных заводов решающее значение имел массовый выпуск бетоносмесительного оборудования совместно с дозирующими устройствами. Бетоносмесительные заводы дифференцированы по способу обеспечения компонентами смеси, технологии работ и конструктивным особенностям. В одних случаях это связано с видами транспорта (автомобильным, железнодорожным, водным), в других — с размещением заводов (непосредственно на месте добычи каменных материалов или близ це-

ментных и металлургических заводов, где возможно использование шлака).

По конструкции встречаются заводы стационарные нетиловые и стационарные из инвентарных деталей, а также полустационарные (временные) установки, смонтированные из инвентарных сборно-разборных деталей, полигоны, цехи на заводах по изготовлению сборного железобетона, установки по дополнительному домешиванию бетонной смеси, доставляемой в автобетоносмесителях на дальние расстояния с изменением (увеличением) ее пластичности и дальнейшим транспортированием смеси к месту работ. Производственная мощность каждого предприятия зависит от: 1) количества видов-марок бетонной смеси (бетона); 2) дальности перевозки смеси с предприятия на место работы; 3) потребности отдельных заказчиков в получении такого количества бетонной смеси, при котором обеспечивается монолитность бетонируемого объекта; 4) технологической и организационной возможности предприятия по одновременному выпуску различных видов-марок бетонной смеси, перестройки для замены одних составов другими.

Как видно из перечисленного, производительность ЦБЗ определяется не только производительностью смесительных устройств. Номинальная производительность смесительных установок при высоком коэффициенте их годового использования прямым образом связана с приготовлением одной видо-марки смеси, что не требует переналадки дозирующих устройств. При этом надо учитывать, что для приготовления двух видо-марок смеси не только на разных цементах, но и на одних заполнителях на заводе должны быть дополнительные бункера для разных видов-марок. Выпуск нескольких видов-марок бетонной смеси снижает номинальную мощность ЦБЗ. Особое значение для технико-экономических показателей работы ЦБЗ различного назначения, конструктивного осуществления и технологического обустройства имеет радиус его действия (см. § 70).

Опыт показал, что наиболее совершенными являются бетоносмесители, позволяющие менять угол наклона материалов. Смесители, не изменяющие положения материалов при перемешивании, выдают менее однородную бетонную смесь. Отметим, что емкость смесителя обозначается в паспорте по загрузке материалов, а не по выходу смеси.

Установлено различие во времени перемешивания смесей разных составов пластичности-жесткости. Недопустимо сокращать продолжительность смешивания ниже установленного для данного типа смесителя и состава смеси. Нельзя произвольно менять условия работы смесителя: увеличивать или уменьшать число оборотов смесителя, смешивать материалы при неполной загрузке емкости смесителя или при увеличенном количестве материалов, заполнять емкость в случайной последовательности загрузки материалов, увеличивать время смешивания против указанного срока, останавливать смеситель, не выгрузив из него смесь, заполнять емкость не вращающегося смесителя материалами. При перемешивании не-

обходимо точно учитывать объем выпускаемой смеси при каждом замесе, что можно осуществить лишь при правильном определении этого объема. Опыт показывает, что этот простой вопрос иногда незаслуженно остается вне поля зрения, что приводит к нарушению проектного состава бетонной смеси (бетона).

Система выдачи замесов на каждый смесительный агрегат достаточно проста и предусматривает: 1) расчет замеса с учетом коэффициента выхода смеси; 2) выдачу замеса с учетом влажности заполнителей, резко влияющей на технические свойства бетона; 3) проверку качества смеси при назначенном режиме работы смесителя; 4) проверку соответствия объема перемешанной смеси заданному объему замеса (следует учитывать, что объем замеса задается из проекта состава смеси, проверенного в лаборатории на замесах, относительно небольших по объему); 5) корректирование состава в нужном направлении для получения заданного объема замеса; 6) проверку сохранения свойств смеси по подвижности, удобоукладываемости и формуемости (см. табл. II.4). Необходимо учитывать, что даже фракционированные гравий и щебень имеют высокую неоднородность по форме и набору зерен различных размеров, что всегда отражается на выходе смеси и требует систематической проверки.

Под **коэффициентом выхода бетонной смеси** понимают величину уплотнения сухих сыпучих материалов (цемента, песка, гравия или щебня) после их смешивания с водой и уплотнения смеси

$$\beta = \frac{V_6}{V_{ц} + V_{п} + V_{г(щ)}},$$

где V_6 — объем уплотненного бетона; $V_{ц}$, $V_{п}$, $V_{г(щ)}$ — соответственно объемы цемента, сухих песка и гравия (щебня) в насыпном состоянии.

Значения β могут меняться в зависимости от объема пустот в заполнителях в пределах 0,55—0,70 *.

Работа смесительных установок любой производительности всегда должна контролироваться работниками лабораторий. Разные показатели прочности бетона, в первую очередь, являются результатом бесконтрольного выпуска смеси и показывают на невысокую квалификацию ее работников. Лаборатории должны быть подчинены главному инженеру строительства (или главному инженеру завода по изготовлению сборного железобетона), который несет ответственность по всем организационно-техническим и производственным показателям строительного производства.

При приготовлении бетонной смеси должны быть учтены качества сырьевых материалов. Нельзя приготавливать бетонную смесь

* Арифметическая сумма объемов сухих рыхлых материалов всегда больше объема получаемой смеси, в которой пустоты материала с большей крупностью зерен после перемешивания с водой и уплотнения смеси заполнены менее крупными зернами. В этом расчете не учитывается некоторое увеличение коэффициента выхода бетонной смеси из-за невозможности учесть наличия в бетоне пятого компонента — воздуха.

из заполнителей смешанного состава (природных песчано-гравийных смесей), которые не имеют стабильного состава и при их использовании будет систематически изменяться состав смеси, что наглядно фиксируется изменением пластичности-жесткости. Следовательно, для сохранения пластичности-жесткости в составе смеси придется менять содержание воды и водоцементного отношения, что недопустимо. Нельзя также использовать зимой замерзшие заполнители. После укладки и уплотнения смеси на таких заполнителях не только образуется большое количество пустот, но одновременно уменьшается площадь контакта цементного камня с поверхностью заполнителей. Технические показатели такого бетона низкие.

Приготовление бетонной смеси предопределяет качество бетона, и на этом технологическом переделе недопустимо нарушение технических требований ни при использовании сырьевых материалов, ни в технологии. Все нарушения подлежат немедленному устранению, что возможно только при высокой квалификации персонала и тщательно организованном контроле. Высокая квалификация рабочих и технического состава немыслима без знания ими теории бетона и практики его приготовления вплоть до вопросов эксплуатации бетонных и железобетонных конструкций.

§ 69. Транспортирование бетонной смеси

Для предприятия любой мощности важна ритмичность. Однако не всегда учитывается, что технология стационарного процесса, каким является приготовление бетонной смеси, отличается от строительного производства, зависящего от многих условий, в том числе от погодных, в ряде случаев вынуждающих прекращать укладку смеси. Радиус действия предприятия, как правило, неразрывно связан с увеличением числа потребителей, что обеспечивает высокий коэффициент использования его мощности. Однако пластичность-жесткость смеси с течением времени изменяется; с учетом этого нужно и располагать ЦБЗ. Опыт показывает, что благодаря пластифицирующим добавкам можно даже летом, в жаркую погоду, транспортировать бетонную смесь на несколько десятков километров. Следовательно, при организации перевозки бетонной смеси не должны быть забыты погода, условия транспортирования, в том числе скорость, зависящие от состояния дорог, наличия пересечений (в том числе железнодорожными путями).

Оптимальная продолжительность доставки смеси близка к 60 мин. В табл. XII.1—XII.4 приведены показатели изменения пластичности-жесткости бетонной смеси при одной и той же температуре в зависимости от времени вылеживания смеси до уплотнения.

Анализ таблиц показывает, что многочисленные дефекты структуры цементного камня и его контакта с поверхностью заполнителей возникают из-за недоуплотнения смеси, которое, в свою очередь, является результатом избытка воды. При существующих приемах уплотнения пока еще не возможно дальнейшее уменьшение коли-

чества воды против ее содержания в жестких смесях. Как следует из § 72, уплотнить жесткие смеси можно только при поверхностном и объемном вибрировании (на синхронизированных виброплощадках). Наиболее жесткие смеси (с жесткостью около 100 с) удается уплотнить только объемным методом с пригрузом. О значении водоудерживающей способности цемента для формирования структуры цементного камня, его контакта с поверхностью заполнителей и регулирования этого свойства изложено в § 45. При транспортировании (считая, что при этом не происходит расслаивания) или задержке уплотнения бетонная смесь густеет — теряет пластичность, как цементное тесто при схватывании. Следовательно, упрочнение смеси после вылеживания, когда цементное тесто с помощью вибрирования еще уплотняется до заданной плотности — результат перераспределения воды, ее частичного ухода в новообразования (в кристаллическую решетку гидратированных соединений) и выход отсеченной от теста воды в контактную с поверхностью заполнителей зону. При высоком содержании цемента в бетоне (выше 600 кг/м³) в результате вылеживания смеси прочность бетона систематически снижается. При столь высоком содержании цемента в тесте возрастает водоудерживающая способность цемента из-за значительного роста содержания мелких фракций, не отделяющих воду.

Т а б л и ц а X II.1

№ смеси	Условия формирования образцов	Осадка конуса, см	Предел прочности при сжатии			
			после 24 ч пропаривания при 70° С		после 28 сут. твердения в стандартных условиях	
			кг/см² (10 ⁻¹ МПа)	%	кг/см² (10 ⁻¹ МПа)	%
1	Формование образцов вслед за приготовлением смеси . . .	18	78,0	100	132,3	100
2	То же	6	104,0	134	180,6	136,5
3	Формование образцов из смеси № 1 после ее вылеживания	6	93,7	120	171,9	130

П р и м е ч а н и е. Здесь следует учитывать, что смесь уплотняется на вибростоле с высоким эффектом вибрирования.

Из табл. XII.3 и XII.4 видно, что пределы прочности образцов № 9—12 и № 5—8 при вылеживании в течение 24 ч сближаются с показателями предела прочности образцов № 13—17 и 9—12 с высоким расходом цемента. Следовательно, закономерность $R_6 = f(B/C)$ действительна только в пределах определенного времени после приготовления бетонной смеси. Это обстоятельство надо учитывать при контроле качества бетона. Во многих случаях по этой причине различаются показатели предела прочности образцов, приготовленных на бетонных заводах и на месте укладки. Сказанное

Таблица XII.2

В/Ц	Продолжительность вылеживания смеси, ч	Осадка конуса, см	Предел прочности при сжатии ** после 7 сут. твердения	
			кг/см ² (10 ⁻¹ МПа)	прирост прочности, %
0,7	0	20	136	100 (эталон)
0,7	4,5	7,5	182	132
0,7	10,0	3,5	215	158
0,82*	10,0	17,0	126	93
0,82	14,5	14,0	—	—
0,82	24,0	7,0	166	122
0,82	29,0	2,5	184	136

* В смесь добавлена вода.

** Предел прочности бетона в возрасте 28 сут. равен 200 кг/см²; расход портландцемента М400 — 300 кг/м³.

Таблица XII.3

№ п.п.	Марка бетона	В/Ц	Продолжитель- ность вылежи- ния смеси на портландцементе М400, ч	Пластичность смеси, см	Жесткость смеси, с	Предел прочности при сжатии			
						кг/см ² (10 ⁻¹ МПа)	%	кг/см ² (10 ⁻¹ МПа)	%
						через 3 сут.		через 28 сут.	
1	100	1,0	0	18,5	—	30,0	100	—	—
2	100	1,0	3,5	6,5	—	40,5	136	—	—
3	100	1,0	8,5	—	15	66,0	223*	—	—
4	100	1,0	8,5	—	—	53,0	179**	—	—
5	150	0,8	0	17,5	—	50,0	100	149	100
6	150	0,8	4	14,0	—	60,0	120	—	—
7	150	0,8	6	8,0	—	66,0	132***	—	—
8	150	0,8	10	11,0	—	87,0	174****	176	118
9	200	0,6	0	18,5	—	91,0	100	220	100
10	200	0,6	4	17,5	—	120,0	132	—	—
11	200	0,6	8	11,0	—	129,0	143	—	—
12	200	0,6	24	—	60	154,0	170	260	118
13	400*****	0,4	0	18,0	—	197,0	100	—	—
14	400	0,4	4	7,5	—	197,0	100	—	—
15	400	0,4	6	4,5	—	188,0	96	—	—
16	400	0,4	8	2,0	—	188,0	96	—	—
17	400	0,4	9	—	23	188,0	96	—	—

* Образцы приготовлены из смеси, пролежавшей на бойке под влажной тканью.

** Образцы приготовлены из смеси, пролежавшей в герметически закрытой емкости.

*** Образцы приготовлены из смеси, пролежавшей тонким слоем.

**** Образцы приготовлены из смеси, пролежавшей компактным объемом.

***** Образцы № 13—17 содержат 678 кг цемента в 1 м³ бетона.

о причинах изменения прочности бетона вследствие изменения плотности цементного камня после механического воздействия на цементное тесто, в котором некоторое количество воды в процессе гидролиза и гидратации цемента ушло из сферы контакта с по-

Таблица XII.4

№ п.п.	Марка бетона	В/Ц	Продолжительность выдержки смеси на портландцементе №400*, ч	Пластичность смеси, %	Жесткость смеси, с	Предел прочности при сжатии			
						через 3 сут.		после пропаривания по режиму 0+3+4+ +15 ч при 80° С	
						кг/см ² (10 ⁻¹ МПа)	%	кг/см ² (10 ⁻¹ МПа)	%
1	150	1,0	0	15	—	73	100	—	—
2	150	1,0	2	11,5	—	78	107	—	—
3	150	1,0	6	9,5	—	90	123	—	—
4	150	1,0	8	0	—	106	145	—	—
5	250	0,6	0	—	60	180	100	137	100
6	250	0,6	2	—	—	210	117	167	122
7	250	0,6	4	—	—	215	120	198	144
8	250	0,6	6	—	—	237	132	215	157
9	400	0,4	0	19,5	—	320	100	—	—
10	400	0,4	2,5	15,5	—	301	94	—	—
11	400	0,4	6	7,5	—	255	80	—	—
12	400	0,4	8	4,0	—	246	77	—	—
13	400	0,66	0	7	—	73	100	—	—
14	400	0,66	24	—	38	95	130	—	—
15	400	0,66	0	—	32	74	101	—	—
16	400	0,64	0	12	—	88	100	—	—
17	400	0,94	24	—	—	104	119	—	—
18	400	0,94	48	—	—	177	203	—	—
19	400	0,94	72	—	—	169	194	—	—

Примечание. Бетонные смеси № 13, 14, 16—19 приготовлены с 0,3% с. с. б.; бетонная смесь № 15 — эталон без с. с. б. к смесям № 13 и 14; бетонные смеси № 1—12 приготовлены на портландцементе Красноярского цементного завода, № 13—19 на портландцементе Себряковского цементного завода; бетонные смеси № 9—12 содержат 638 кг портландцемента в 1 м³ бетона.

поверхностью зерен цемента, можно подтвердить и дополнительным прессованием свежеспрессованной бетонной смеси (табл. XII.5) и повторным многократным вибрированием (см. § 72).

Процесс выделения воды из теста — освобождение места для сближения частиц по мере углубления гидролиза и гидратации цемента, ее химического связывания — известен из опытов с цементом. При последующих приложениях нагрузки после первого обжатия, через 5 и 8 ч, видно, как улучшаются структурные показатели цементного камня благодаря реализации указанных изменений в количестве воды, задерживаемой в структуре цементного теста по мере стабилизации суспензии. Действительно, цементное тесто — концентрированная суспензия, в которой идут на различных уровнях химические процессы (глубоко по всей толще зерна с минералами C_3A и C_4AF , мелкими зернами минерала C_3S , заторможено в поверхностном слое с крупными зернами C_3S и мелкими и крупными зернами C_2S) и физические процессы, обуславливающие стабилизацию суспензии по линии новообразований и ее разделение на дисперсионную среду и твердую фазу там, где они еще не образовались. Указанные опытные данные позволяют предположить, что

Условия формирования образцов	Предел прочности при сжатии			
	кг/см ² (10 ⁻¹ МПа)	%	кг/см ² (10 ⁻¹ МПа)	%
	через 1 сут.		через 7 сут.	
Уплотнение штыкованием	33	100	123	100
Уплотнение штыкованием и давлением через 1 ч после уплотнения в формах	64	194	162	132
Уплотнение штыкованием и давлением через 1 и 4 ч после уплотнения в формах	75	227	—	—
Уплотнение штыкованием и давлением через 1, 4 и 7 ч после уплотнения в формах	58	176	—	—
Уплотнение штыкованием и давлением через 6 ч после уплотнения в формах	—	—	186	151
Уплотнение штыкованием и давлением через 9 ч после уплотнения в формах	—	—	180	146
Уплотнение штыкованием и давлением через 1, 6 и 9 ч после уплотнения в формах	—	—	241	196
Уплотнение штыкованием и вибрированием через 4 ч после уплотнения в формах	68	206	—	—

Примечание. Состав 1 м³ бетонной смеси: портландцемента М400 — 358 кг, песка — 530 кг, воды — 215 л, щебня — 1140 кг, В/Ц=0,6; осадка конуса — 18 см; марка бетона — 250, образцы-кубы — 10×10×10 см, давление штампа — 8,05 МПа, продолжительность выдерживания 60 с.

отмеченные процессы миграции влаги в формирующемся бетоне, протекающие наравне с процессами твердения, приводят к образованию дефектных мест, в чем можно убедиться, испытывая бетон, в котором не скорректирован этот процесс, например, дополнительным допрессовыванием свежуплотненной смеси или иными приемами (вакуумированием, повторным многократным вибрированием и др.).

Вследствие указанного отделения воды от цементного теста, ее ухода в химический процесс и отсутствия последующего механического воздействия на цементное тесто получают бетоны разных марок (при широко применяемых видо-марках цемента, их расходах и приемах производства работ) со свойствами значительно более низкими, чем свойства, которые заложены в нем. В этом легко убедиться, испытывая бетоны на прочность, водонепроницаемость, морозостойкость, усадку, ползучесть, коррозионную стойкость и другие свойства.

§ 70. Укладка и распределение бетонной смеси

При укладке бетонной смеси в опалубку или форму* и ее распределении необходимо учитывать следующие особенности этого технологического передела: 1) высоту допустимого свободного падения смеси в место распределения; 2) состояние поверхности предыдущего слоя бетона, на который укладывается смесь, если производится бетонирование монолита, а также стен соседних блоков; 3) разбивку объема выполняемых бетонных работ на отдельные участки; 4) условия разравнивания — распределения в опалубке смеси, поданной на место укладки; 5) погодные условия (температуру воздуха, выпадение дождя, снега) и др. Перечисленные условия наиболее типичны и их анализ поможет дать правильные решения. К началу укладки и распределения смесь при визуальном осмотре должна быть однородной и сохранять заданную пластичность-жесткость. В процессе укладки и распределения она также должна не изменять связность и однородность, сохранять пластичность-жесткость, на которую рассчитана для данного технологического передела. При значительном периоде между концом смешивания и разгрузкой с транспортных средств пластичность-жесткость может уменьшиться (см. § 9), после чего она все же должна соответствовать этому технологическому переделу.

Естественно, при проектировании смеси учитывается температурный фактор и относительная влажность воздуха, которые могут резко изменяться. По этой причине составляют несколько вариантов состава бетонной смеси, из которых используют тот, который соответствует конкретным условиям производства работ.

Нарушение однородности или величины заданной пластичности-жесткости смеси может привести к тому, что в конструкции (сооружении) часть бетона получится с техническими свойствами ниже проектных: невозможно уплотнить смесь до заданной плотности, в теле бетона образуются раковины и снижается сцепление с арматурой, которое в некоторых местах может отсутствовать. Такой железобетон не надежен и его качество определяют пробным разрушением.

Иногда могут создаться условия, при которых нужно подвезенную бетонную смесь сбрасывать с большой высоты. При разности в отметках не более 5 м смесь можно разгружать без каких-либо устройств. Если ее сбрасывают компактным объемом — большим комом, расслаивание исключено, как и при перекидывании смеси лопатой, когда ее сбрасывают кучно, «шлепком», а не «веером». При сыпании смеси с транспортной ленты часты случаи расслаивания ее. Для сбрасывания смеси с большой высоты рекомендуется применять трубы диаметром, подбираемым с учетом размера пор-

* К понятию укладки в форму можно отнести и укладку бетонной смеси при устройстве покрытий, где дорожное основание служит дном формы, а рельс — стенкой формы.

ции сбрасываемой смеси. В таких случаях бетонную смесь целесообразно предварительно выгружать в бункера, оборудованные затворами и вибраторами-собирающими, которые способствуют тиксотропному разжижению смеси и ее передвижению к отверстию трубы небольшими порциями. Положение труб для опускания смеси должно исключать образование пробок, которые срывают ритм работы и создают дополнительные трудности. Смесь не расслаивается, если ее транспортировать в бадах, автосамосвалах, из которых ее необходимо быстро разгружать. Неровность поверхности кузовов автосамосвалов, некачественная их очистка затрудняет выгрузку смеси.

Автором предложен способ разгрузки бетонной смеси с помощью подстилающего слоя крупного заполнителя. Для этого небольшую часть крупного заполнителя из состава бетонной смеси насыпают из бункера тонким слоем на дно кузова автосамосвала, чем создают своеобразную подстилку. Бетонная смесь при опрокидывании кузова легко разгружается, а доза такого гравия (щебня) при вибрировании перемешивается со смесью. Сказанное имеет особое значение при перевозке смеси на большие расстояния.

Поверхность предыдущего слоя уложенной и уплотненной смеси, а также поверхности стенок опалубки (форм) должны обеспечивать монолитность изготавливаемой конструкции, съем опалубки с забетонированной детали (конструкции) и качество поверхности изготовленных сооружений. Для послойного бетонирования нужны бетоносмесительные установки производительностью, обеспечивающей возможность перекрытия очередного слоя за срок, несколько меньший сроков схватывания бетона, которые условно считаются равными 2 ч (по срокам схватывания цементного теста с соответствующим значением В/Ц). При послойном бетонировании связь между слоями создается физико-химическими процессами, что позволяет говорить о монолитности бетона в таком объекте.

При выполнении работ возникает ряд организационных и технических обстоятельств, требующих перерыва в уплотнении смеси, из-за чего приходится устраивать рабочие швы. Для уплотнения и твердения смеси с ранее затвердевшим слоем необходимо с последнего снять пленку, состоящую из продуктов гидратации с высоким содержанием воды и карбоната кальция. Для очистки слоя бетона применяют воду или воду и воздух, подаваемые под давлением, пескоструйный аппарат, механические шарошки и щетки.

Чтобы повысить сцепление слоев, в нижний слой перед окончанием его уплотнения заделывают короткую стержневую арматуру таким образом, чтобы часть стержня при последующей укладке смеси оказалась в верхнем слое. К сожалению, меры, направленные на повышение монолитности слоев при перерыве в укладке бетонной смеси, еще не решены настолько, чтобы контактная поверхность была равноценна монолитному бетону. Опыт кафедры

дорожно-строительных материалов * Московского автодорожного института показывает, что решение этого вопроса связано не только с приемами подготовки поверхности перед укладкой нового слоя бетонной смеси, но и с физико-химическим объединением слоев. Следовательно, предпоследний слой должен иметь такой состав цементного теста, который был бы заторможен до начала укладки новых порций смеси.

Отметим, что твердение бетона в толстых слоях представляет несомненный интерес, так как оно происходит под давлением вышележащих слоев бетона. Упрочнение нижележащих слоев может достигать до 50—60% от марочной прочности бетона. По этой причине бетонирование тонкими слоями на больших площадях не позволяет реализовать весьма значительное преимущество твердения бетона под пригрузом. Бетонирование больших площадей тонкими слоями связано с желанием снизить разогрев твердеющего бетона и организовать уплотнение пакетными вибраторами, располагаемыми на тракторах,двигающихся по укладываемой бетонной смеси. Сказанное о твердении бетона под пригрузом должно учитываться при его проектировании и, следовательно, создавать предпосылки для объективного сравнения вариантов организации бетонных работ.

Наличие в рабочих швах отдельных дефектов в контакте бетона при строительстве сооружений, работающих в водных средах, приводит к фильтрации воды и постепенному разрушению бетона, в частности, за счет выноса извести из цементного камня (см. § 63). Фильтрация также ухудшает внешний вид сооружений.

Некачественная подготовка опалубки и инвентарных форм приводит к большой затрате труда на снятии опалубки или на расформовке деталей (конструкций). При плохо организованной работе прибегают к использованию различных рычагов, ударам кувалдами по опалубке, что разрушает формы, сокращает сроки их использования. При этом поверхности распалубленного бетона наносится ущерб, так как с опалубкой отрывается от бетона цементный камень, а в ряде случаев — куски бетона.

Разбивка объема работ по укладке и уплотнению бетонной смеси непосредственно связана с предыдущим вопросом и имеет свои особенности. Действительно, при разбивке бетонных работ учитывают производительность бетономесительного узла (завода), качество подготавливаемой бетонной поверхности, условия последующей работы конструкции, что отмечают на чертежах как указание на необходимость укладки смеси без нарушения монолитности бетона. В ряде случаев, когда нет указаний, запрещающих устройства рабочих швов, при изучении чертежей на выполняемую

* Целесообразность мокрой сепарации цемента для отбора мелких фракций от более крупных проверена на больших кубах и показала полную реальность его осуществления при любом масштабе бетонных работ. В частности, этим приемом удается регулировать тепловыделение бетона; опыт в МАДИ показал, что в смесях существует резко отличное распределение воды, входящее для грубых фракций до $V/C=0,23$ и в тонких фракциях цемента — до $V/C=1,2—1,4$.

деталь нужно учитывать реальность последующего бетонирования, если его организуют с перерывами. Такой реальностью является: расположение арматуры в бетоне вблизи рабочего шва, которая может не допустить очистки поверхности слоя; загрязнение арматуры бетонной смесью, находящейся выше рабочего слоя, не допускающее ее последующей очистки перед укладкой бетонной смеси после перерыва; плохая организация производства работ, приводящая к перерывам в бетонировании (например, перерыв в доставке смеси, неучтенные обеденные перерывы, передача незавершенного бетонирования от одной к другой смене и ряд других особенностей, не учтенных в производстве работ).

Подача бетонной смеси к месту распределения и уплотнения производится по транспортерным лентам, трубопроводам и бетононасосам, а также при помощи кранов или других подъемных устройств, если смесь поступает в емкостях.

Условия распределения смеси связаны с типом вибратора, при выборе которого необходимо учитывать радиус его действия. По этой причине порция разравниваемой смеси должна быть строго определенной величины, а расположение вибратора в бетонируемом объекте (или на любом его участке) должно обеспечить тиксотропное разжижение бетонной смеси.

Погодные условия имеют очень важное значение для удобства производства и качества бетонных работ. В отличие от заводских цехов со стационарными условиями организация работ на строительстве должна быть гибкой и учитывать любые изменения погоды, не допуская срыва работ или снижения их качества. Действительно, в течение суток создаются неодинаковые условия для бетонирования. Например, летним днем даже в пределах Московской области температура может достигать 35°C и значительно снижаться к ночи. Такое суточное колебание, если работать днем с составом смеси, используемым ночью, может сильно повлиять на темпы работ и их качество. Еще большие трудности создаются на юге страны или в местах, где преобладают низкие и отрицательные температуры. В последнем случае (см. § 60) необходимо принимать меры, защищающие бетон от замораживания. Особое внимание заслуживает организация работ при дожде или снегопаде. В любом из этих случаев укладываемая бетонная смесь должна быть защищена от попадания влаги.

После укладки и уплотнения бетонной смеси для проверки выполненных работ и приемки сооружения в эксплуатацию должны оставаться документы, в которых фиксируется выполнение проекта. Для этого до начала бетонирования производителем работ и лицами, принимающими эту работу, составляется акт с указанием выполнения в нужном объеме и надлежащего качества скрытых работ: по подготовке основания, выполнению гидроизоляции, армирования, установке закладных деталей, если они нужны, правильности установки подмостей и их крепления, опалубки, по облицовке, цементации и другим, которые указаны в проекте. Бетонные работы нельзя производить без тщательного осмотра уже

выполненных скрытых работ и составления акта, разрешающего их производство.

§ 71. Различные приемы уплотнения бетонной смеси

В период применения для производства бетона вяжущих с относительно невысокими техническими свойствами, в том числе невысокой прочностью, приготавливали бетонные смеси с минимально возможным содержанием воды, уплотняя ручным трамбованием. Такой весьма трудоемкий способ использовали для уплотнения смеси типа «влажной земли». С развитием цементной промышленности и выпуском высококачественного цемента стали применять литые смеси со значительным избытком воды против необходимого для протекания химических процессов. В табл. XII.6 даны различные по содержанию воды смеси и рекомендуемые способы уплотнения.

Таблица XII.6

Наименование смеси	Осадка конуса, см	Время формирования на виброплощадке, с	Содержание воды в смеси, л/м³		Способ уплотнения
			на гравии	на щебне	
Жесткие	—	>30	120—130	130—140	Раньше ручное трамбование, теперь механическое трамбование и вибрирование с пригрузом
Литые	>14—16	—	220	240	Самоуплотнение
Малопластичные	1—3	—	130—145	145—155	Вибрирование
Среднепластичные	3—6	—	145—160	155—170	Вибровакуумирование
Высокопластичные	6—12	—	160—185	175—200	Центрифугирование, штыкование

Примечание. Считается, что вода остается для пластифицирования смеси и не уходит в поры каменного материала.

Опыт применения каждого вида смеси показал их достоинства и недостатки. Так, недостатком смесей, уплотняемых ручным или механическим трамбованием, является использование их только в неармированных сооружениях. Отсюда естественно распространение жестких смесей, допускающих уплотнение вибраторами с пригрузом. Качество бетонов из таких смесей высокое.

Применение литых бетонных смесей, самоуплотняющихся под действием силы тяжести песка и гравия (щебня), резко уменьшилось в силу их недостатков: избыток воды приводит к получению неоднородных по высоте конструкций; в верхних слоях в большом количестве собирается растворная часть, обогащенная цементным камнем из мелких фракций цемента, с большим водоцементным отношением, чем обусловлено подбором состава. Из-за отделения

воды в процессе седиментации цементной суспензии цементного теста, разбавленного избытком воды, сцепление бетона с арматурой также резко снижается. Путем введения минеральных добавок (в частности, бентонитовой глины, состоящей из минералов группы монтмориллонита $Al_2O_3 \cdot 4SiO_2 \cdot nH_2O$ и бейделита $Al_2O_3 \cdot 3SiO_2 \cdot \times nH_2O$) с высокой водоудерживающей способностью литые бетонные смеси имеют те же строительные свойства, что и глинистое тесто, однако вследствие ухода части воды в физически связанное состояние с поверхностью минералов глины, в значительной мере устраняются седиментация цементного теста и расслоение смеси, повышаются технические свойства бетонов *. Указанное направление заслуживает внимания и дальнейших разработок.

Малопластичные бетонные смеси получили в строительстве широкое распространение. И в этом случае возникает необходимость использовать свойство смесей распределяться в опалубке с меньшей затратой труда, гарантией заполнения формы любой сложности и получения бетона с техническими свойствами, обеспечивающими проектные требования.

Средне- и высокопластичные бетонные смеси с целью отделения из уже уложенной смеси части воды подвергают вибровакuumированию, а для изделий цилиндрической формы (труб и опор) — центрифугированию [67]. Вибровакuumирование можно разделить на следующие этапы: предварительное распределение смеси с помощью вибрирования; собственно процесс отбора части воды и доуплотнение смеси при помощи вакуум-щитов, отсос воды из бетонной смеси, отделившейся при таком разрежении и обжати, вибрирование смеси с оставшимся количеством воды для устранения вертикальных капилляров, получившихся при вакуумировании. Для практических целей разработана технология производства таких работ и средства ее осуществления. Но этот способ из-за значительной трудоемкости не нашел широкого применения, несмотря на высокий технический эффект в самых различных случаях (от изготовления небольших деталей из железобетона до крупных гидротехнических комплексов). Центрифугирование имеет ограниченную область применения, так как связано с формованием конструкции цилиндрического очертания.

Из табл. XII.7 видно, что состав бетонной смеси влияет на результаты ее уплотнения, так как наличие цементного теста разной консистенции, расположение в смеси крупного заполнителя, наличие в нем пустот — все имеет значение для доуплотнения бетонной смеси, предварительно вибрированной.

Опыт вакуумирования под стеклянным колпаком цементного теста в формах-восьмерках показывает, что неодинаковые составы

* Такие исследования проведены в НИС Гидропроекта им. С. Я. Жука, а результаты их использованы на строительстве Саратовской ГЭС. Частичное связывание воды по своему эффекту, но не по характеру полученных структур цементного камня, похоже на пластифицирование смесей малыми количествами ПАВ (например, с. д. б.)

Таблица XII.7.

Бетонная смесь	В/Ц	Способ уплотнения	Предел прочности при сжатии, кг/см ² (10^{-1} МПа)		
			Продолжительность твердения, сут.		
			7	28	90
На портландцементе № 1 и гравии	0,62	Вибрирование	94/—	190/—	238/—
		Вакуумирование	163/73	286/50	298/25
На портландцементе № 1 и щебне	0,62	Вибрирование	161/—	274/—	372/—
		Вакуумирование	218/35	373/36	402/8
На портландцементе № 2 и гравии	0,62	Вибрирование	96/—	193/—	208/—
		Вакуумирование	160/167	286/48	292/40

Примечание. Портландцементы № 1 и 2 имеют одинаковые минералогические составы, но цемент № 2 — быстрая. Однако и в цементе № 1 содержится по ГОСТу нижний предел гипса. Пластичность смеси по осадке конуса для гравийных смесей 5—6,5 см, для щебеночных — 3 см, для всех составов $\eta=0.36$. Рост прочности при вылеживании смеси, дополнительном вибрировании, трамбовании близок к результатам, полученным при вакуумировании. В знаменателе — прирост прочности бетона по сравнению с вибрированием в %.

теста (например, по химико-минералогическому составу) по-разному отдают воду. В одном случае, не теряя связности, оно выгибается подобно резине, выходя из формы; при извлечении воздуха из-под стеклянного колпака тесто отдает влагу, которая превращается под колпаком в водяную пыль. При снятии разрежения тесто вновь заполняет форму, несколько уменьшившись в объеме.

В другом случае из теста вода выделяется крупными каплями. Несомненно, столь характерная резиноподобность теста связана с наличием в нем большого объема коагуляционных структур. При этом надо отметить, что ошибочно представление о возможности отбора любого количества воды от уплотняемой таким образом бетонной смеси, независимо от того, сколько ее введено при перемешивании. В табл. XII.8 показаны результаты отбора воды на лабораторной центрифуге, из которых следует, что при приготовле-

Таблица XII.8

Исследуемая смесь	Водоудерживающая способность (%) при величине В/Ц до отбора воды на центрифуге					
	0,6	0,9	1,0	1,2	1,4	2,4
Цементное тесто . . .	42,5	47,5	—	49,0	52,0	—
Цементный раствор 1:3 (количество воды отнесено к цементу) . . .	60,0	—	87,0	—	100,0	125,0
Цементный раствор 1:3 (количество воды отнесено к песку) . . .	6,0	—	13,0	—	16,0	—

Примечание. Портландцемент с минералогическим составом: 49% C_3S ; 27% C_2S ; 8% C_3A ; 15% C_4AF ; $s=3000$ см²/г; гипса — 5%.

нии пластичной бетонной смеси для последующего уплотнения на центрифуге решающее значение для качества изделия имеет и количество введенной воды.

Следовательно, при любом методе уплотнения увеличение содержания воды развивает пористость не только в структуре цементного камня, но и в текстуре растворной части бетона и в контактной зоне между цементным камнем и поверхностью зерен заполнителя. Любой из методов отбора воды, введенной для увеличения пластичности смеси, не позволяет извлечь всю введенную воду, и с этим надо считаться при подборе состава бетона.

Среди широкого круга работников, связанных с бетонными работами, преобладает неверное мнение о возможности компенсировать недостатки смесей с повышенным содержанием воды увеличением расхода цемента без учета изменения других технических свойств. Действительно, вода — универсальный пластификатор и увеличение ее содержания обеспечивает известную простоту распределения смеси в формах, ее уплотнение при незначительных усилиях. Практическая оценка сооружений связывается со сроками их пуска в эксплуатацию, когда, кроме прочностных свойств бетона, другие свойства не выявляются. До тех пор пока существует такая формальная оценка качества бетона, будет перерасход цемента, сопровождаемый пониженными свойствами бетона. Это, в частности, подтверждается разрушением отдельных участков бетонных покрытий, где пренебрегали сказанным о недопустимости оценки прочности бетона без учета коэффициента использования цемента и оценки его вне определения других проектных свойств.

Кроме перечисленных, были разработаны способы: прессование, виброштампование, вибропрокат без давления и с силовым давлением, торкрет-набрызг. Кроме вибропроката, требующего повышенных расходов цемента, остальные методы по разным причинам не имеют широкого производственного применения.

Любой из существующих методов уплотнения должен обеспечить: 1) сближение на минимально возможные расстояния всех частиц смеси без ее расслоения и механического разрушения зерен заполнителя, что может произойти при высоких давлениях прессования смеси; 2) твердение с необходимым количеством воды, которое должно быть несколько большим, чем то, которое за длительный период времени уйдет в химический процесс*; 3) сохранение в формуемом образце (конструкции) при последующем твердении всего количества воды затворения; 4) применение составов бетона с расходами цемента, которые применяются для приготовления высокомарочных и долговечных бетонов при качественно организованном вибрировании жестких смесей; 5) реальные возможности использования вяжущих, существующих или доступных для мас-

* Химические реакции цемента с водой должны протекать в условиях ее небольшого избытка или сближение частиц должно быть во много раз большим, что достижимо лишь путем уплотнения сухих порошков цемента при давлении 2500—3000 кГ/см² (10^{-1} МПа) и последующей подпитке такого образца водой. После подсосывания воды в образец его В/Ц $\approx 0,065$ [70, 72, 74].

сового применения в перспективные сроки, из других отраслей. Разработка прогрессивных приемов уплотнения, несомненно, сложная задача, которую надо решать.

Рассмотрим широко применяемый способ уплотнения смесей вибрированием. Опыты по вибрированию были начаты в конце двадцатых — начале тридцатых годов. Существо процесса уплотнения смесей вибрированием основано на временном и обратимом тиксотропном разжижении цементного теста, которое после прекращения сотрясений вновь приобретает исходную вязкость в среде смешанных с тестом каменных заполнителей. П. М. Миклашевский еще в 1934 г., консультируя бетонные работы на строительстве канала им. Москвы и руководя исследованиями по вибрированию смесей, отметил, что бетонная смесь при вибрировании приобретает свойства тяжелой жидкости. Это подтвердилось при введении в вибрируемую смесь предложенного им прибора (рис. XII.1). Начиная с 1934 г. получили распространение разработанные в ЦБЛ строительства поверхностные вибраторы «Спартак». В этих виброплощадках дебалансы были помещены непосредственно на ось двигателя, что требовало эпизодической замены подшипников. Такая замена в полной мере была оправдана и позволила впервые в нашем

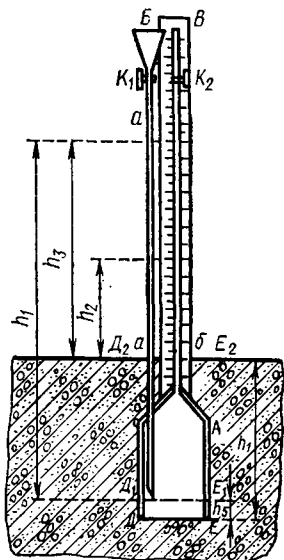


Рис. XII.1. Прибор П. М. Миклашевского для контроля работ по формированию бетонных смесей вибрацией

Таблица XII.9

Наименование вибраторов с колебаниями от электрической энергии	Краткая характеристика вибраторов
Поверхностные вибраторы, в том числе на бетоноукладочных машинах	Колебания передаются непосредственно на бетонную смесь через рабочую площадку, на которой установлен электродвигатель с дебалансами
Наружные вибраторы	Колебания передаются через опалубку, для чего вибраторы крепят к ней специальным устройством; на небольшой подставке устанавливают электродвигатель с дебалансами
Внутренние вибраторы	Колебания передаются непосредственно на бетонную смесь через стенки вибратора, имеющего различные формы; электродвигатель с дебалансами заключен внутри таких вибраторов (булав, цилиндров)
Станковые вибраторы или вибростолы (виброплощадки)	Колебания бетонной смеси передаются через форму, что позволило назвать этот прием вибрирования объемным. В нем участвует и форма, что ухудшает использование вибраторов. Оптимальные результаты показали синхронизированные вибраторы

строительстве перейти на массовую укладку бетонной смеси вибрированием. В табл. XII.9 указаны типы вибраторов, нашедшие широкое применение в бетонных работах.

Массовый переход на вибрирование бетонных пластичных смесей связан с многолетними исследованиями и разработкой теории этого вопроса. Развитие вибрирования непосредственно связано с большим вкладом в это важное дело коллективов исследователей и строителей [11, 13, 16, 22, 37, 53]. Попытки применить вибрирование смеси имели место в 1933 г. на объектах промышленного строительства. На строительстве канала им. Москвы в 1936 г. работало более 800 вибраторов различных типов, которыми (преимущественно поверхностными виброплощадками) было уплотнено более 55% бетонной смеси (1,6 млн. м³ бетона), на Волгострое в 1936—1940 гг. весь объем смеси, превышавший 2 млн. м³, уплотнен вибраторами. Технические и экономические выгоды, получаемые при вибрировании смесей, начали находить отражение в нормативных документах, в частности в указаниях по снижению расхода цемента на 10% против составов, уплотняемых ручным способом. Эта экономия цемента прямым образом зависела от снижения в ней дозы воды, что, в свою очередь, связано со способом уплотнения, а последнее — с подбором состава бетонной смеси и назначением необходимой пластичности-жесткости. Смесь не должна терять связности и равномерности распределения цементного теста, песка и крупного заполнителя при выгрузке из бетоносмесителя, транспортировании к месту укладки, распределении в формах (опалубке) и уплотнении.

Следовательно, для качественного производства при транспортировании работ бетонщики должны обеспечиваться смесью, стабильной по свойствам и уплотняющейся принятыми приемами. В этом отношении вибрирование позволяет работать с известным резервом в составе смеси за счет уменьшения в ней количества воды, так как необходимая при этом плотность бетона будет достигнута за счет несколько большей продолжительности вибрирования*. Подбирая пластичность (жесткость) бетонной смеси, следует руководствоваться указаниями Госстроя СССР по их обязательному пластифицированию [60]. Интенсивность воздействия вибраторов на смесь связана с амплитудой и частотой их колебания. Эффективность вибрирования принято оценивать интенсивностью колебания и продолжительностью вибрирования.

Приведем пример разрешающей возможности механизмов. По заданию отделения строительных материалов ЦНИИС в 1957 г. ВНИИСтройдормаш запроектировал вибростол с двумя частотами (2800 и около 5500) и разными амплитудами колебаний. Работа вибростола была синхронизирована. На таком опытном экземпляре удалось уплотнить сухую на вид бетонную смесь, так как в ней содержались 100 л воды при 400 кг портландцемента тонкого помола

* Можно сослаться на вибрирование двутавровых опор линий электрификации железных дорог, изготавливаемых на жестких смесях с пригрузом в течение 10—15 мин вибрирования на длинномерной синхронизированной виброплощадке.

(в пересчете на 1 м³ бетона). Такого количества воды при обычных способах уплотнения не хватало для получения цементного теста нормальной густоты. При совместном синхронизированном вибрировании такая смесь, не поддающаяся уплотнению с пригрузом при раздельном вибрировании на каждой отдельной частоте, моментально разжижалась, приобретала текучесть и быстро уплотнялась. Благодаря уплотнению с пригрузом появилась возможность немедленной распалубки кубика в 8 л без разрушения при испытании сосредоточенной нагрузкой в 100 кг, передающейся через острые граненной гайки диаметром в 3 см. Такой свежемобразованный кубик можно переносить в распалубленном состоянии.

Указанный пример уплотнения пока не удастся внедрить на большие модели, так как вибростолы большого размера быстро выходят из строя из-за излома сепараторов в подшипниках. Однако при принятых производственных приемах вибрирования удастся добиться значительно более эффективного тиксотропного разжижения цементного теста — значительного снижения вязкости этой тяжелой жидкости. Следовательно, производственные приемы вибрирования надо совершенствовать, не останавливаясь на достигнутом. Особое внимание при эксплуатации вибростолов следует обращать на равномерность амплитуд колебания.

Технологические рекомендации по вибрированию бетонных смесей изложены в соответствующих инструкциях и указаниях [22, 41, 45, 53, 57, 61, 62, 77 и др.], которыми необходимо руководствоваться. Технические документы содержат: 1) ориентировочные характеристики, используемые для подбора различных смесей (см. табл. VII.4); 2) характеристики вибраторов и их разрешающие способности; 3) общие соображения о влиянии на качество смеси вида и марки цемента и тех или иных особенностей заполнителей; 4) продолжительность вибрирования смесей; 5) правила использования вибраторов с соблюдением требований охраны труда; 6) частные случаи, встречающиеся при уплотнении бетонной смеси вибраторами, а именно: длительность перемешивания смесей разной пластичности (жесткости), указания по предотвращению смеси от расслаивания, особенности производства работы, связанные с соблюдением мер по устойчивости опалубки, на которую давит бетонная смесь, разжиженная вибрированием, выправление амплитуд на вибростолах, устройство подмостей и др.

Дальнейшее развитие способов уплотнения смеси вибрированием должно быть направлено на автоматизацию процесса уплотнения, что устранил ручной труд по переносу вибраторов, влияние вибрирования на человека, а также произвольное назначение мест стоянки вибраторов и времени вибрирования на каждой очередной позиции вибратора. Прототипом такого способа можно назвать вибрирование пакетом, составленным из внутренних вибраторов*. Групповое вибрирование получило широкое применение на гидротехническом

* Такой способ уплотнения бетонной смеси группой объединенных вибраторов был предложен П. М. Миклашевским и С. В. Шестоперовым.

строительстве и обеспечило не только резкое повышение производительности труда, его облегчение, но и создало преимущества, указанные выше.

При строительстве покрытий ныне применяемые виброуплотняющие машины (бетоноукладочные и бетоноотделочные разной конструкции) еще не обеспечивают возможность применения бетонных смесей с такой же пластичностью (жесткостью), как, например, при формировании плит на синхронизированных вибростолах. Для дорожного и аэродромного покрытий в бетонные смеси дается больше воды. Сказанное, несомненно, снижает долговечность покрытий и, в частности, качество поверхностного слоя, в котором содержится больше воды, чем в нижележащих слоях из-за частичного расслоения смеси.

Характерно, что жесткая смесь, которая легко уплотняется поверхностным вибратором конструкции 1935 г., при использовании существующих бетоноукладчиков не прорабатывается виброукладочной машиной, что видно по поверхностным раковинам на покрытии. Достигнутое в области массового применения вибрирования должно совершенствоваться. Качество вибрирования нужно оценивать по предлагаемому нами показателю — порогу жесткости бетонной смеси, характеризующему количеству воды, которое надо дать в смесь при прочих равных условиях (качество и количество цемента, песка, крупного заполнителя, различных добавок, погодные условия и требования по комплексной марке). Чем с меньшим количеством воды смесь можно уплотнить, тем выше порог ее жесткости, следовательно, эффективнее работа вибратора, выше его решающая возможность.

§ 72. Повторное многократное вибрирование бетонной смеси

Рассмотрим историю развития этого способа уплотнения, имеющего исключительно большое значение для понимания бетона как материала, свойства которого могут меняться в весьма большом диапазоне. Широко известное положение о необходимости обеспечивать процессы твердения бетона без механических воздействий на материал не было ограничено временем. Для того чтобы определить возможность вибрирования последующих слоев, например, в железобетонных днищах шлюзов, в монолитном теле плотины и в аналогичных им случаях, в 1934 г. проводилось широкое производственное внедрение способа уплотнения бетонной смеси на строительстве канала им. Москвы. В табл. XII.10 показаны результаты опытов, проведенных автором совместно с П. М. Миклашевским в ЦБЛ на строительстве канала им. Москвы.

Опыты должны были моделировать производство работ в блоках (части) сооружаемых объектов (шлюзов, плотин и других сооружений). Выбранное время последующего воздействия на уже уложенный слой бетона составляло минимум 2 ч, что диктовалось техническими условиями работы на цементе с указанным временем его схватывания. Из табл. XII.10 следует, что повторное вибрирование

№ п. п.	Прием уплотнения	Интервалы между повторными вибрированиями, ч	Предел прочности при сжатии через 8 сут., кг/см ² (10 ⁻¹ МПа)	Объемная масса бетона, кг/м ³
1	Штыкование	—	75,8	2350
2	Одноразовое вибрирование	—	103,9	2370
3	Повторное вибрирование	2	123,3	2370
4	То же	2 и 4	121,2	2390
5	»	2, 4 и 6	127,0	2400
6	»	2, 4, 6 и 8	142,0	2430
7	»	2, 4, 6, 8 и 10	159,5	2440

Примечание. Продолжительность каждого вибрирования 1 мин; состав бетона (на 1 м³): портландцемента — 250 кг, воды — 150 л, песка — 680 кг, гравия — 1324 кг; осадка конуса — 1—3 см. Вибрирование производилось путем установки каждого последующего образца на нижележащий куб. Формы кубов (20×20×20 см) деревянные. Вибрации на нижележащий куб передавались через пуансон, прикрепленный к доске поверхностного вибратора. Значения показателей испытаний средней из трех серий опытов.

уже уплотненной бетонной смеси в течение 10 ч не только не снижает предела прочности бетона, но значительно ее повышает. Аналогично этим опытам были проведены опыты с повторным вибрированием армированных призм размером 15×15×65 см на бетонной смеси того же состава. В каждую призму закладывалось по три стержня длиной 18 см и диаметром 32 мм. Интервалы между повторными вибрированиями изменялись от указанных в табл. XII. 10 до 36 ч. Опыты показали, что повторное вибрирование увеличивает сцепление бетона с арматурой. Дальнейшие исследования [64, 70, 72, 74] показали, что повторное вибрирование является целенаправленным приемом формирования структуры цементного камня.

Повторное многократное уплотнение нельзя рассматривать без анализа исследований по вылеживанию смесей, а также повторного уплотнения, например, ударом или прессованием (см. § 69). Технические свойства бетона после повторного вибрирования повышаются, что видно из табл. XII.11, где сравниваются морозостойкости бетонных образцов при однократном и многократном вибрировании.

Для испытания образцов (табл. XII.11) был взят бетон М250 состава: цемента — 360 кг, воды — 200 л, песка — 650 кг, гравия (гранитного) — 1185 кг, В/Ц=0,55, с осадкой конуса 4—5 см. Бетон с таким количеством воды имеет невысокую морозостойкость, поэтому было интересно попытаться увеличить ее.

Снижение морозостойкости при пропаривании в этом случае особенно наглядно проявляется вследствие ухудшения условий для распределения воздуха — пятой части бетонной смеси, расширяющегося при нагревании свежееотформованных образцов в процессе пропаривания. В этом случае развитие контракции цементной составляющей бетона и развитие в связи с этим вакуумных полостей в капиллярах формирующегося цементного камня отстает от расши-

Таблица XIII.11

№ п.п.	Вибрирование бетонной смеси	Условия твердения	Предел прочности образцов до замораживания и оттаивания, кг/см ² ($\cdot 10^{-1}$ МПа)	Количество циклов испытания, замораживания и оттаивания						Примечание		
				30		50		70			Оценка, баллы	Предел прочности образцов до замораживания (числитель) и после замораживания (знаменатель), кг/см ² ($\cdot 10^{-1}$ МПа)
				Оценка, баллы	Предел прочности образцов до замораживания (числитель) и после замораживания (знаменатель), кг/см ² ($\cdot 10^{-1}$ МПа)	Оценка, баллы	Предел прочности образцов до замораживания (числитель) и после замораживания (знаменатель), кг/см ² ($\cdot 10^{-1}$ МПа)	Оценка, баллы	Предел прочности образцов до замораживания (числитель) и после замораживания (знаменатель), кг/см ² ($\cdot 10^{-1}$ МПа)			
1**	Однократное	Пропаривание	175	6	310/138	4	306/—	—	—	Сняты после 47 циклов		
2**	Многократное*	»	255	9	355/366	8	—	4	425/367	Сняты после 100 циклов		
3	Однократное	Без пропаривания	244	10	—	8	300/200	4	278/126	Сняты после 70 циклов		
4	Многократное*	То же	320	10	—	10	333/214	8	295/213	Сняты после 100 циклов		

* Многократное вибрирование проводилось 7 раз по 1 мин с интервалами в 30 мин на лабораторной виброплощадке в формах 10×10×10 см при амплитуде 0,35 мм.

** Температура замораживания —25° С, режим пропаривания образцов № 1 и 2: 2+6+8 при температуре 80° С.

рения воздуха, который частично выходит, создавая в структуре цементного камня и в текстуре бетона дефектные места, в которые легко поступает вода при замораживании и оттаивании. Как было сказано, бетоны с высоким содержанием воды при повторном многократном вибрировании лишь в незначительной степени улучшают свои свойства.

Увеличение общего времени повторного вибрирования с улучшением режима уплотнения (встряхивания) за счет уменьшения перерывов между очередными вибрированиями связано с частичным удалением из образцов свободной воды и позволяет значительно повысить технологические свойства бетона. Благодаря частичному удалению воды в процессе многократного вибрирования (требующего 6—8 ч дополнительного времени) после пропаривания свежесформованной бетонной смеси в структуре новообразований из цементного теста создается значительно больше вакуумных полостей в капиллярах, что обеспечивает диспергирование расширяющегося воздуха, образование микроамортизаторов и резкое повышение морозостойкости бетонов. Естественно, для получения морозостойких бетонов выбор цемента с оптимальными свойствами предусматривается как основа для обеспечения указанных условий в твердении бетона.

Рассматриваемая здесь задача повышения качества бетона отличается от опытов по повторному вибрированию смеси. Эффект повторного вибрирования возможен лишь при многократном применении. Неправильны попытки судить об эффекте повторного уплотнения по одному, двум и даже трем приемам без учета сказанного о многократности и времени, когда повторное вибрирование должно производиться. Отметим также, что закономерность $R_6 = f(B/C, R_u, \text{т. р.})$ при многократном повторном вибрировании остается в силе, однако в этом случае надо сравнивать бетоны одного метода уплотнения.

Уплотнение бетонной смеси вслед за приготовлением позволяет относительно рыхлый материал привести в уплотненное состояние, разместив в пустотах между мелким и крупным заполнителем цементное тесто, разжиженное вибрированием. Вибрирование пластичных смесей, содержащих избыток воды (не удерживаемой на поверхности цементных зерен, каменных материалов и в межзерновом пространстве), приводит к частичному расслоению смеси, что значительно снижает однородность бетона. Если в ходе процесса гидролиза и гидратации цемента тесто систематически самоуплотняется за счет развития поверхности активных минералов, слагающих его, и отделения части воды, не удерживаемой цементом, то вибрирование помогает этому процессу.

Электронно-микроскопический анализ цементного камня подвергаемых и неподвергаемых повторному вибрированию бетонов обнаруживает различие их структур, указывая на процесс модифицированного кристаллообразования в цементном камне повторно вибрированных бетонов. Следовательно, исходная общая пористость предопределяется не только количеством воды в бетоне, но и ее

распределением в бетонной смеси после приготовления и в очередной момент уплотнения. Сказанное вытекает из сущности химических и физических процессов, которые непрерывно протекают при твердении цементного камня. Подбирая состав, не надо забывать, что только повторное многократное вибрирование обеспечит целесообразное уменьшение водоцементного отношения* в цементном камне, позволит наилучшим образом использовать в формирующемся цементном камне эффект контракции с образованием капилляров с воздушными амортизаторами. Последние и обеспечивают морозостойкость бетона на длительное количество циклов. По этой причине повторное вибрирование вслед за первичным уплотнением смеси даже при значительной длительности (в несколько десятков минут) после тиксотропного разжижения смеси не может быть эффективно из-за несжимаемости воды, которая в полном объеме, соответствующем составу бетона, находится в цементном тесте. Эффект от доуплотнения системы цементное тесто — контактная зона с поверхностью заполнителей удается получить только после миграции части воды из теста внутрь кристаллической решетки продуктов гидратации и отсечки воды от теста после седиментации концентрированной цементной суспензии.

Нами не рассматривается изготовление железобетонных конструкций из смесей, для которых вибрирование служит только побудителем для распределения смеси в объеме формы (опалубки). Действительно, любое увеличение содержания воды в бетонной смеси приводит не только к снижению прочности (и замедлению ее роста во времени), ухудшению использования цемента в бетоне, но и к возникновению ряда неустраняемых при твердении цемента дефектов в структуре цементного камня и текстуре бетона. С другой стороны, столь же неоправданно уменьшать содержание воды в бетонной смеси, если средства формования не соответствуют ее пластичности-жесткости. Во многих случаях бетоны из жестких смесей при неверном выборе вибраторов менее однородны, чем бетоны из пластичных смесей, так как даже незначительное вибрирование (не говоря уже о многократном повторном вибрировании) обеспечивает хорошее уплотнение. В табл. XII.12 и XII.13 приведены итоги повторного многократного и обычного стандартного вибрирования смесей двух составов, показывающие его решающее значение для качества изделий (конструкций), а на рис. XII.2 — плиты после испытания.

Как плита, так и кубы твердели в естественных условиях с защитой бетона от испарения влаги слоем систематически увлажняемых опилок. Первые 7 сут. плиты твердели при -8°C . В плане площадь каждой плиты, занятая грузом, составляла $3,5 \times 1,65$ м (пролет в свету между опорами и ширина плит). На плиту № 1 (рис. XII.2, а) в один прием было положено 10 т груза, после чего сделан перерыв на 15 ч; за этот период прогиб не изменился. Даже после нагрузки в 29 т на 8 сут. плита не разрушилась, прогиб не увеличился. С несколько меньшей нагрузкой плита простояла длительный период без увеличения прогиба.

* В бетоне может оставаться то же количество воды, которое было введено. Однако ее миграция из структуры цементного теста в область контактов с заполнителем позволяет говорить об уменьшении В/Ц.

Плиту № 2 (рис. XII.2, б) нагружали в течение 2 сут.: в 1 сут. — 8 т, во 2 сут. — 14 т. При нагрузке 12 т начали появляться первые трещины около опор с каждой стороны по диагонали плиты. По мере роста нагрузки увеличивались и трещины. При нагрузке 16 т наблюдались отколы кусков бетона с боковых частей и основания плиты. При нагрузке 22 т появился сильный прогиб и дальнейшее нагружение пришлось прекратить. Через 14 ч после нагружения в 22 т перекрытие обрушилось в направлении диагонали плиты и балок. По результатам испытания видно, что бетон со значительно меньшим расходом цемента (200 кг против 300) позволяет при многократном повторном вибрировании получить железобетонную конструкцию с большей несущей способностью [71], сократить время пропаривания или расход цемента на 50—60 кг без снижения прочности бетона и получить изделия с заданными техническими параметрами.

В табл. XII.14 приведены результаты опытов по многократному повторному вибрированию, осуществленных на цементах различного химико-минералогического состава и тонкости помола.

Таблица XII.12

Вибрирование бетонной смеси *	Содержание цемента в 1 м ³ бетона, кг	В/Ц	Осадка конуса, см	Предел прочности при сжатии через 105 сут., МН/м ²
Многократное повторное с интервалами между вибрированием (плита № 1)	200	0,95	3—4	290
Однократное вибрирование (плита № 2)	300	0,66	4—6	266

* Бетонная смесь на портландцементе, гранодиоритовом щебне, нагрузка равномерно распределенная чугунными отливками.

Таблица XII.13

Нагрузка, т	Прогиб, мм		Средний прогиб, мм	Нагрузка, т	Прогиб, мм		Средний прогиб, мм
	справа	слева			справа	слева	

Плита № 1

5	8	4	6,0	20,0	41	23	32,0
10	18	9	13,5	25,0	50	29	37,5
15	30	15	22,5	29,0	55	30	42,5

Плита № 2

3	—	—	3,5	13,5	20	22	21,0
4	—	—	5,0	15,0	25	28	26,5
6	—	—	9,0	16,5	29	36	32,5
8	—	—	12,0*	18,0	32	44	38,0
10	—	—	15,0	22,0	75	114	94,5
12	15	19	17,0				

* При нагрузке 12 т в середине пролета появилась трещина, при нагрузке 19,6 т — вторая трещина (рис. XII.2).

Опыты показывают, что бетон любого состава при оптимальных условиях уплотнения и многократном повторном вибрировании имеет разный рост прочности. При этом отмечается роль интерва-

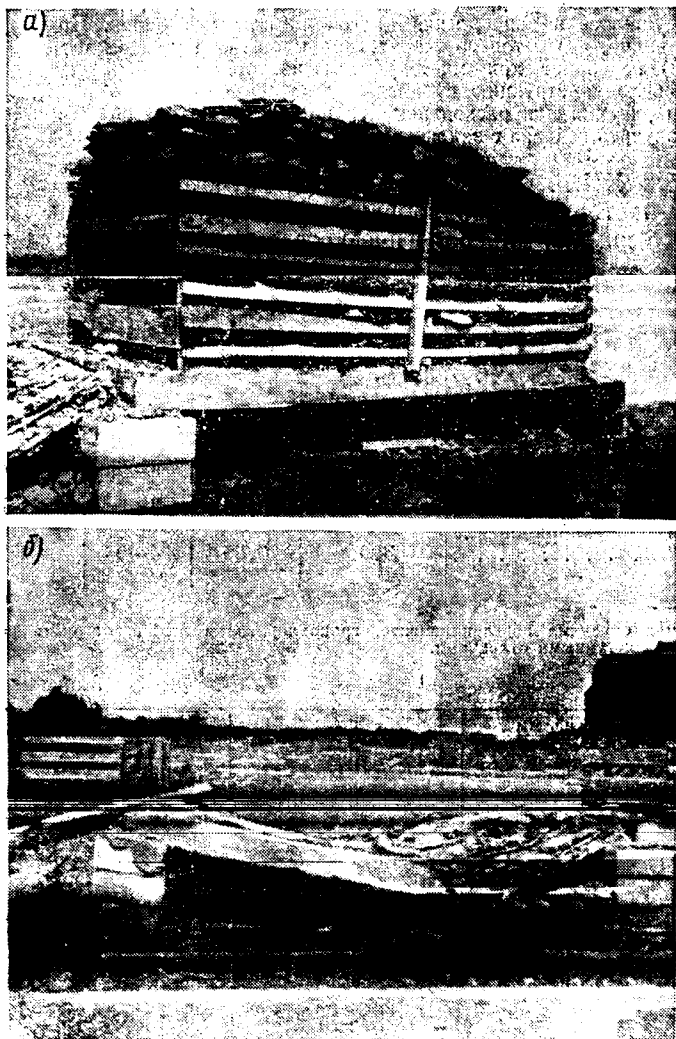


Рис. XII.2. Испытание железобетонных плит

лов вибрирования, подбор числа которых и продолжительность прямым образом зависят от кинетики загустевания цементного теста в бетоне. Наилучший результат достигнут при постепенном сокращении интервалов между очередными уплотнениями по мере загустевания смеси. Однако теория и практика применения повтор-

№ п.п.	В/Ц	Осадка конуса, см	Предел прочности при сжатии образца эталона		Предел прочности при сжатии через 7 сут. твердения							
					кг/см ² (·10 ⁻¹ МПа)	%	кг/см ² (·10 ⁻¹ МПа)	%	кг/см ² (·10 ⁻¹ МПа)	%	кг/см ² (·10 ⁻¹ МПа)	%
					Количество вибрирований							
			кг/см ² (·10 ⁻¹ МПа)	%	8 раз	16 раз	24 раза	32 раза				
1	1,00	1—3	42,0	100	75,6	180,0	93,8	223,0	102,5	244,0	118,3	283,0
2	1,14	15—18	17,8	100	43,7	254,4	33,9	203,6	47,5	266,8	76,9	432,0
3	0,86	1—3	62,4	100	99,7	160,0	133,9	215,0	185,3	298,0	188,2	302,1
4	1,00	15—18	46,2	100	76,7	166,0	116,6	252,0	132,8	287,0	134,5	291,0
5	0,71	1—3	119,4	100	119,8	94,9	155,6	130,1	201,5	168,3	194,5	162,8
6	0,74	15—18	64,5	100	131,3	203,8	—	151,7	235,0	184,6	286,1	—
7	0,85	3—5	70,7	100	105,7	150,0	129,4	183,0	165,8	232,5	163,3	231,0

Примечания: 1. Оптимальное время вибрирования каждый раз — 1 мин с перерывом в 15 мин. 2. Цементы для образцов № 1—4 и 5—7 различные.

ного вибрирования еще не доведены до степени их нормативной разработки.

§ 73. СНиП на технологию производства бетонных работ

В СНиПе особо отмечается важность систематического контроля состава бетонной смеси, (для чего в конечном счете необходима широкая автоматизация процесса приготовления бетонной смеси на всех ее этапах). Для получения качественного бетона необходимо применение высококачественных заполнителей, нележалого цемента, использование эффективных способов перемешивания смесей с обеспечением от расслаивания, в частности, и по причине замены части воды ПАВ, неорганическими добавками, уплотнением с эффективными вибромеханизмами, тщательным и длительным уходом за твердеющим бетоном. В СНиПе рекомендуются численные значения удобоукладываемости бетонной смеси с условным разделением конструкций на несколько разновидностей: подготовка под фундаменты, полы, основания дорог и аэродромов, покрытия дорог и аэродромов, конструкции, бетонируемые в скользящей опалубке. Рекомендуемые осадки бетонной смеси доходят до 8 см, а для особых случаев бетонирования в скользящей опалубке без применения вибраторов — до 10 см. Нижний предел, равный 0 см, надо понимать как предел осадок при уплотнении бетонной смеси, лежащих в интервале 20—30 с. Эти указания даны с учетом обязательного применения пластифицирующих веществ, в данном случае с. д. б. в соответствии с указаниями СН 406—70.

Перевозку бетонной смеси необходимо осуществлять по хорошим дорогам, чтобы избежать расслоения бетонной смеси.

В СНиПе нормируется продолжительность перемешивания смесей (от 60 до 120 с), которая зависит от величины замеса, типа смесителя и пластичности (жесткости) смесей. При этом для принудительного смешивания это время равно 60 и 80 с и не связано с вместимостью смесителя. При приготовлении смесей с высокой степенью жесткости, которые в этом СНиПе не рассматриваются, время смешивания должно уточняться на месте работ. Особое внимание при транспортировании смесей должно быть обращено на очистку тары после разгрузки каждой очередной порции перевезенной смеси. Способы перевозки неотделимы от качества смеси, которое должно быть стабильным (смесь должна быть подвижной, удобоукладываемой и формуемой как и до ее перевозки). Следовательно, тара должна быть плотной и не допускать потери растворной части и цементного теста; смесь должна быть защищена от атмосферных воздействий (дождя, снега, влияния температуры, в том числе и от прямого воздействия солнечных лучей и ветра).

При транспортировании бетонной смеси в автобетоносмесителях, перемешивающих сухую смесь с водой при движении к месту укладки, условия перемешивания ограничены следующими требованиями: 30 мин — начало перемешивания от момента загрузки сухих компонентов, что связано с возможной реакцией цемента и влаги на поверхности заполнителей (это должно уточняться на месте работы) и числом оборотов смесителя на автомобиле, которое должно обеспечить качество смешивания (число оборотов должно быть не менее 70 и не более 300).

СНиП («Бетонные и железобетонные конструкции») на производство бетонных и железобетонных работ включает сведения о производстве работ с тяжелым бетоном (особо тяжелым, легким, кислото- и щелочестойким, для подводного бетонирования, торкретирования, цементации температуро-усадочных строительных швов и бетонирования в скользящей опалубке). Указания СНиПа носят характер принципиальных требований, освещающих существо выполнения технологических пределов и на месте работ должны детализироваться в соответствии с их особенностями.

Для осуществления бетонных и железобетонных работ необходимы этапы производства по технологическим пределам (опалубочные, арматурные и собственно бетонные работы) и организация их. Организация работ связана с предвидением всего их хода на период строительства объекта. Сюда входят вопросы химической технологии, обеспечения оборудованием и машинами, условия твердения бетона.

Для опалубочных работ характерна важность широкого применения инвентарных многократно обрачиваемых опалубок и инвентарных подмостей. Отдельные технологические разработки могут потребовать индивидуальных решений, которые надо выполнять только по проектам (простейшие конструкции балок, колонн, плит и аналогичных им деталей сооружений выполняются по эскизам).

Виды опалубки в СНиПе дифференцированы на: разборно-пе-

реставные весом до 60 кг — мелкощитовые, инвентарные; тяжелее 60 кг — крупнощитовые, устанавливаемые с помощью механизмов; скользящие, состоящие из ряда элементов и поднимаемые домкратами; подъемно-переставные разных конструктивных принципов действия; горизонтально-перемещаемые или катучие на тележке или полозьях; блок-формы пространственной конструкции с каркасом и щитами и несъемные опалубки, оставляемые на месте бетонных работ и выполняемые из металлической сетки, металлических и железобетонных плит, вводимых в расчет сечения бетонируемой конструкции.

В СНиПе для каждого случая применения опалубки даны рекомендации, направленные не только на разумное использование материалов в опалубке, но, главным образом, и на осуществление высококачественного производства бетонных и железобетонных работ. Опалубка должна быть технологичной, т. е. должна допускать многократное применение при минимальных затратах на ее ремонт, удобную подачу в нее смеси, ее снятие с затвердевшего бетона при высоком качестве распалубливаемой поверхности конструкций и, наконец, очистку [14] и подготовку к новому циклу бетонирования. То же касается и поддерживающих лесов и креплений к ним.

В СНиПе изложены условия заготовки арматуры, получения ее из стержней или высокопрочной проволоки, а также прядей объемных арматурных элементов железобетонных конструкций (см. § 36—37), ее транспортировки к месту установки в опалубку. Сборка арматурных элементов производится, как правило, сваркой (см. § 35 и 36). Стыкование стержней, сеток, каркасов на месте бетонирования надо осуществлять по рабочим чертежам с выполнением требований СНиП II-B.1—62 и СН 393—69. В СНиПе дан норматив на допускаемые отклонения при установке арматуры. Кроме чисто расчетных — очень важных в этой части требований для надежной работы железобетона особое внимание уделяют положению арматуры близ наружной зоны бетона. Уменьшение, как и увеличение, защитного слоя недопустимо. В первом случае арматура с течением времени будет подвергаться коррозии, во втором на поверхности бетона образуются трещины, также способствующие появлению коррозии.

В СНиПе даны требования к материалам, известные из многочисленных ГОСТов, с дополнениями по процедуре определения их качества, условиям хранения и выбора; уточняется максимальный размер крупного заполнителя при подборе состава бетона. Максимальный размер не должен превышать $\frac{3}{4}$ наименьшего расстояния в свету между арматурой — стержнями, пучками, прядями и т. д. и в то же время зависит от типа бетоносмесителя, типа и вместимости дозаторов. Например, при использовании гравитационных смесителей допустима крупность зерен до 120 и 150 мм, а для смесителей принудительного действия — до 40 и 70 мм в зависимости от вместимости смесителя.

Работы должны производиться в полном соответствии с требованиями СНиПа.

ИЗГОТОВЛЕНИЕ СБОРНЫХ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ

§ 74. Виды сборного железобетона и область его применения

Промышленность сборного железобетона относительно молода. Еще в начале 40-х годов было мало заводов по его производству, имели они относительно небольшую мощность, ограниченную номенклатуру продукции, строились из нестандартных деталей с оборудованием и механизмами, не обеспечивающими достаточно высоких разрешающих технологических характеристик *. Впоследствии была осуществлена широкая программа развития промышленности сборного железобетона в СССР. С 1950 до 1975 г. объем сборного железобетона вырос примерно в 100 раз. Больше 60% сборного железобетона используется в жилищно-гражданском строительстве [54]. Заводы и специализированные домостроительные комбинаты ныне выпускают больше 200 тыс. м³ сборного железобетона в год.

Идея сборного железобетона исключительно плодотворна, так как способствует превращению строительного производства (строительства промышленных предприятий, инженерных сооружений на транспорте и в энергетике, жилищного строительства, мелиорации и ирригации) в комплексный хорошо механизированный процесс сборки (монтажа) сооружений из элементов, деталей, изделий и конструкций высокой заводской готовности. Однако неверно считать, что сборный железобетон во всех случаях может заменить монолитный бетон (железобетон). Строительство ряда сооружений не требует такой замены, вызывает удорожание и не повышает их эксплуатационных характеристик. Надо отметить, что стоимость сборного железобетона требует дальнейшей творческой работы для ее снижения. То же касается и решения задач по резкому повышению качества этих прогрессивных деталей и, в частности, точности формы и размеров (уменьшения величины допуска), приближения их внешнего вида к полной готовности без последующей отделки.

Область применения сборного железобетона из года в год расширяется. В частности, гидростроители в качестве большого эксперимента при строительстве Саратовской ГЭС применили в значительном объеме сборный железобетон с отдельными элементами в 240 т. Естественно, это требует специального оборудования, большегрузных платформ, кранов, цехов по изготовлению сборного железобетона. Сказанное служит примером широких возможностей в применении заводского железобетона и заслуживает пристального внимания проектировщиков, организаторов производства и технологов-строителей. Без подобного новаторского экспериментирова-

* Подразумевается использование таких средств производства на каждом технологическом переделе, которые не обеспечивали бы выпуск продукции с минимальным расходом цемента высоких марок и минимально возможными затратами.

ния чисто технологические вопросы новых направлений в строительстве не решаются. Некоторые принципиальные недостатки в развитии сборного железобетона связаны с рассредоточением этой промышленности по отдельным министерствам и организациям.

Анализ, проведенный специалистами Института экономики Гостроя СССР, показывает, что благодаря внедрению сборного железобетона резко сократилась потребность в лесоматериалах, металлических конструкциях, монолитном железобетоне, кирпиче и некоторых других материалах. Внедрение сборного железобетона резко сократило затраты труда, принесло высокий экономический эффект, повысило квалификацию строительных рабочих, ускорило темп строительства и увеличило его масштаб, улучшило условия труда и культуру работ, повысило классность сооружений (в том числе этажность жилых домов) и др. Перечисленные важные для народного хозяйства страны преимущества от широкого применения сборного железобетона в свою очередь помогли решению задач, поставленных пятилетними планами.

Развивая указанную область производства, нельзя оставлять без внимания производство монолитного железобетона и бетона. В настоящее время изготовление сборного железобетона производится со значительно более высоким расходом цемента по сравнению с аналогичными конструкциями, выполняемыми непосредственно на месте работ. Необходимость получения в короткие сроки бетона 70 и 100%-ной марочной прочности при систематическом росте марочной прочности бетона в проектных решениях требует применения тепловлажностной обработки, режимы которой сокращаются.

Успехи этой промышленности следует связать и со специализацией по виду выпускаемых конструкций, как это осуществлено в транспортном строительстве, где предприятия выпускают только железнодорожные шпалы или преимущественно пролетные строения для мостов, опоры линий электрификации и т. д. Широкому внедрению в железнодорожное строительство сборного железобетона способствовало массовое изготовление железобетонных шпал, которые еще в 1950—1958 гг. проходили стадию широких натурных экспериментов [16], а ныне изготавливаются на серии специализированных заводов. Столь же быстрыми темпами развивалось производство пролетных строений мостов и опор контактной сети.

Анализ преимущества сборного железобетона по сравнению с монолитным бетоном и железобетоном имеет один существенный недостаток: сборный железобетон изготавливают специализированные предприятия, а монолитный укладывают подразделения, не имеющие кадров высокой квалификации и не всегда использующие прогрессивные приемы. Сравнение объектов массового применения бетона (дорожного, гидротехнического) показывает, что в таких местах монолитный бетон (железобетон) имеет свои неоспоримые преимущества. В конструкциях опор, балок, перемычек, плит перекрытий, стеновых панелей монолитный железобетон не-

смог конкурировать со сборным из-за необходимости установки опалубки и подмостей, медленного твердения, погодных условий твердения бетона.

Сборный железобетон имеет самое широкое применение во всех видах строительства: жилищном, промышленном, гидротехническом, сельскохозяйственном, коммунальном, культурно-бытовом, транспортном.

Из сборного железобетона изготавливают следующие изделия: пролетные строения мостов, обделку тоннелей, водопропускные трубы, опоры различного назначения, колонны, балки, перемычки, массивы-гиганты, стеновые панели и блоки, железобетонные каркасы различного назначения, шпалы, перекрытия, резервуары, рудничные крепления, открытые крановые и разгрузочные эстакады и др.

В сборном железобетоне марки тяжелого бетона для различных конструкций назначают в соответствии с требованиями СНиП II-B.1—62. Максимальная марка бетона равна 600 (бетон анкерных стаканов, торцевых шайб под анкера), минимальная проектная марка — 150 (стенка монолитных круглых резервуаров и труб при напряжении только кольцевой и спиральной арматуры).

Особое значение для снижения стоимости сборного железобетона имеет унификация деталей и конструкций. Опыт показывает, что многие разнотипные детали и изделия после одного-двух лет изготовления при неполной амортизации металлических форм снимаются с производства, хотя срок их эксплуатации значительно выше (не менее 5 лет). С другой стороны, использование унифицированного каркаса из сборного железобетона в одних случаях будет полноценным при существующих нормативных нагрузках, а в других — нет. По-видимому, унификация деталей также должна проводиться с определенной дифференциацией элементов каркаса по нагрузкам. Нецелесообразно изготовление меньшего числа типоразмеров деталей из сборного железобетона, так как это связано с перерасходом бетона и арматуры. Технологичность процесса содержит большое число составляющих и не должна ограничиваться рассмотрением только одной стороны вопроса — бортоснастью для изготовления изделий. Независимо от вида и типа деталей и изделий решение этого вопроса связано с условиями формирования смеси и скоростью твердения бетона. Оба этих вопроса нуждаются в дальнейшем развитии и зависят от средств уплотнения и видо-марок цемента. В этом направлении ведутся исследования, позволившие в определенной мере усовершенствовать технологию работ.

Сборно-монолитный железобетон целесообразно применять по следующим причинам: при дальности перевозок и относительно небольшому объему сборных конструкций, когда нерационально строить заводы по их изготовлению на месте строительства; вблизи на полигонах или мест монтажа, а также прямо на участках, где будут собирать конструкции из деталей. В последнем случае значительно упрощается изготовление железобетона, так как не требуются подмости, сложная опалубка, подача бетонной смеси на

разные уровни и т. д. Применение сборно-монолитного железобетона особенно оправдывает себя в осенне-зимний период.

Предварительно напряженный железобетон [14, 16, 31, 35, 40, 45, 49] является исключительно прогрессивным его видом. Он наиболее рационален в стационарных условиях, учитывая специфику технологического передела — армирования конструкций высокопрочной напрягаемой арматурой и снижение до минимума брака на этом переделе. Под браком понимают отказы при изготовлении напрягаемой арматуры, выражающиеся в последующем нарушении ее сцепления с бетоном в так называемых зонах анкеровки концов арматурных элементов; получении меньшего предварительного напряжения арматуры по сравнению с его прежней величиной; в ряде случаев неравномерном обрыве арматуры — ее проскальзывании в захватных приспособлениях [6], понижении трещиностойкости конструкций при эксплуатации, последующей коррозии высокоуглеродистой арматурной стали, снижении морозостойкости из-за плохого контакта арматуры и бетона и т. д.

Армирование предварительно напряженных железобетонных конструкций характеризуется разнообразным технологическим оборудованием и организацией работ.

В технологии изготовления такого железобетона есть два принципиально различных приема: 1) натяжение арматуры через специально устраиваемые каналы — отверстия в затвердевшем бетоне; 2) натяжение арматуры на упоры до бетонирования с последующей передачей этого натяжения на бетон, затвердевший до проектной прочности, меньшей, чем марочная прочность. Упоры имеют различное устройство, что связано с технологической схемой производства бетонных работ и с особенностями элемента. В частности, для многих бетонируемых конструкций изготавливают силовые формы, в которых натяжение арматуры передается на ее борта или на поддон (формы для двутавровых балок, решетчатых опор линий электрификации железных дорог и ряда других элементов). Для качества сборного предварительно напряженного железобетона особое значение имеет способ отпуска натяжения на бетон, что надо учитывать при конструировании металлических форм (например, при переменном сечении бетонируемого элемента, где после спуска натяжения особенно сказывается уменьшение его длины, соответствующее величине предварительного обжатия элемента).

Существует ряд способов распалубки элементов из сборного железобетона: 1) выступы и впадины на силовых бортах и поддонах устраивают с плавными переходами (угол наклона к продольной оси конструкции составляет $30-45^\circ$) — в этом способе соответственно увеличению объема бетонируемого элемента увеличивается и объем бетона, что недопустимо; 2) вторичная оттяжка арматуры на специальном стенде, куда помещают распалубливаемый элемент, арматура на таком стенде оттягивается при передаваемом на форму усилии, равном $50-70\%$ от усилия контролируемого натяжения — этот способ увеличивает затраты труда, требует дополнительное оборудование; 3) бетонируемый элемент имеет «плавающие»

формообразователи, которые при передаче натяжения с формы на твердеющий бетон могут незначительно смещаться по отношению к длине формы, ее бортов вместе с забетонированным элементом, этот способ также имеет недостаток, связанный со стоимостью и сложностью «плавающих» деталей, их быстрым износом и необходимостью применения дополнительного усилия по распалубке, так как не полностью снимается заклинивание забетонированного элемента в силовой бортонастке; 4) продольные стенки бортонастки забетонированного элемента с прочностью, допускающей передачу напряжения арматуры на бетон без снятия натяжения с упорных устройств, отводят разными приемами* на некоторое расстояние от бетона (в конструкциях длиннее 13 м надо создать пространство между бетоном и формой примерно 15—20 мм).

Кроме рассмотренных способов бетонирования напряженно армированных элементов практикуют предварительное натяжение отдельных струн или пучков из высокопрочной проволоки, стержневой арматуры на упоры стендов и непрерывное армирование на поворотных столах, а также применяют специальные механизмы (например, при изготовлении труб — наливочные механизмы и станки).

Особенности указанного технологического передела весьма многообразны по механизмам, оборудованию, металлическим формам, деталям, применяемым в этих работах, и должны изучаться по специальным руководствам. Это касается и техники натяжения высокопрочной арматуры, которая также разнообразна. Существуют способы прямого механического натяжения арматуры — гидродомкратами, электротермическим и смешанным натяжением (электротермическим и механическим).

Расчет и проектирование форм для сборного железобетона имеют решающее значение для точности размеров элементов и существенно влияют на их стоимость. По этой причине в НИИЖБе в течение ряда лет этой работой занимается группа исследователей [31, 40], классифицировавшая все виды металлических форм, применяемых в промышленном, гражданском и жилищном строительстве, по способу производства сборного железобетона, геометрической характеристике изделий, конструктивным особенностям форм. Такая классификация позволяет выделить при проектировании форм главные условия. Например, выбирая технологию изготовления сборного железобетона конвейерным или агрегатно-поточным способом, легко убедиться в высокой оборачиваемости форм и, следовательно, рассчитать парк форм (сказанное касается также использования силовых неподвижных форм). Другим примером высокой оборачиваемости форм может быть технология приготовления однотипных, однородных деталей (например, шпал) на длинных виброплощадках в форме на группу деталей при их продолжительном использовании.

* Этот способ разрабатывался в ЦНИИС Минтрансстроя. Особенности технологического передела — распалубки деталей исследователи справедливо связывают не только со сроками службы форм, но и с долговечностью железобетона.

Рассматривая взаимосвязь и между другими этапами изготовления напряженного железобетона, можно показать, сколь важно для разработки оптимальных решений каждого технологического передела не допускать их назначения вне такой связи. К показателям классификации целесообразно было бы отнести и затраты труда на использование форм (начиная с подготовки к бетонированию и кончая очисткой и смазкой форм). В частности, анализ деталей показывает на целесообразности применения многоячеечных форм (например, для шпал, бортовых камней).

Основной вид классификации форм по технологии производства изделий: стандовой, агрегатно-поточной и конвейерной. Для агрегатно-поточного и конвейерного способов запроектированы формы для изделий плоских со съёмными бортами, для автоклавного твердения бетона, линейных решетчатых конструкций с горизонтальным вибрированием и с криволинейной поверхностью. Для стандового способа запроектированы неподвижные формы, воспринимающие и не воспринимающие усилия при натяжении арматуры, а также другие виды форм (для решетчатых, крупных пустотелых и объемных тонкостенных и других изделий).

Смазки для форм. Так как распалубка влияет не только на трудоемкость выполняемых работ, но и на качество поверхности бетона и долговечность форм, имеют значения приемы обработки поверхности форм перед укладкой бетонной смеси [14]. Применяют смазки на основе минеральных масел (в частности, отработанные смазки двигателей внутреннего сгорания), в том числе масла на основе парафина, доведенные до рабочей консистенции такими растворителями, как керосин, соляровое масло и др. Анализ роли смазки форм на отдельных технологических переделах изготовления изделий позволяет выявить различное влияние физико-химических характеристик смазок. Отметим, что многие из ранее применявшихся смазок снимались с поверхности форм при загрузке в них смесей. Действительно, повышение вязкости смазок мешает их равномерному распылению, сказывается на толщине наносимого слоя, усложняет процесс их нанесения. Снижение вязкости по мере нагрева металла при пропаривании бетона ухудшает распалубливание форм, так как поверхность изделий слипается с поверхностью металла. Следовательно, смазки не могут иметь универсальные свойства по причинам, связанным с влиянием на них технологических факторов производства работ.

Рассмотрим в общем виде физико-химические основы вопроса, касающегося эмульсионных смазок — наиболее интересных и безопасных для использования, а также дешевых, так как они на 80—90% состоят из воды. Поверхность раздела двух жидкостей, составляющих эмульсию, в основном и определяет ее свойства, поэтому уточним силы, действующие на границы раздела ее фаз. Границы раздела фаз, в частности, в эмульсии — источник силового поля по причине различия их молекулярных сил (сил поверхностного слоя жидкости, на которые со стороны нижележащего слоя этой жидкости воздействуют молекулярные силы неполярной жид-

кости). Капельки такой эмульсии имеют размер около 0,5—5 мкм, что создает их неустойчивость из-за значительного избытка энергии на границе раздела фаз с такой высокоразвитой поверхностью.

Однако по своей природе эмульсии самопроизвольно во всех случаях * при постоянных температуре и объеме без внешних воздействий повышают устойчивость за счет систематического уменьшения избытка свободной энергии в поверхностном слое. Этот процесс в конечном счете приводит к их разрушению. При этом можно иметь две промежуточные стадии до разрушения эмульсии: 1) более быстрый процесс разрушения, так как протекает за счет слияния капелек дисперсной фазы (уменьшается поверхность раздела фаз Δs при постоянном исходном значении σ — величины поверхностного натяжения); 2) стадия замедленного относительно первой стадии расслоения эмульсий, так как проходит через ее временную стабилизацию (уменьшается поверхностное натяжение $\Delta\sigma$ при постоянном значении площади поверхностного слоя эмульсии). Кроме этих в весьма общем виде изложенных кинетических факторов механизма разрушения эмульсий существуют также и термодинамические. Зная механизм повышения стабильности эмульсий, следует его использовать и в создании разнообразных эмульсионных смазок. Для этой цели предложены три способа, связанных с уменьшением поверхностного натяжения в эмульсиях.

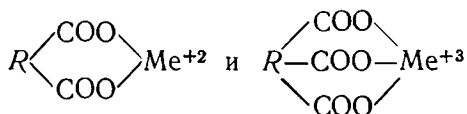
Первый способ заключается в повышении температуры смазки, что связано с резким уменьшением поверхностного натяжения. При снижении величины поверхностного натяжения от обычной величины до десятых долей эмульсия становится достаточно стабильной для использования.

Второй способ состоит в применении ПАВ, значительно снижающих поверхностные натяжения (величину σ), обладающих повышенной вязкостью (таких веществ — стабилизаторов в эмульсионные смазки вводят 5—10% по отношению к непрерывной среде — маслу в эмульсиях обратного типа «вода в масле» **). К таким стабилизаторам надо отнести вещества с асимметричным строением молекул (спирты, кислоты, их соли, различные мыла и ряд других соединений). Используя указанную ориентацию молекул ПАВ, реализуют исключительно выгодную в энергетическом плане переориентацию молекул эмульсий на границе раздела фаз (полярные группы добавок, т. е. растворимые в полярных жидкостях, будут погружены в полярную фазу эмульсии; неполярные группы добавок, т. е. растворимые в неполярных гидратах, например, в углеводородах, — в ее неполярную фазу). Степень ориентации молекул ПАВ на границе раздела фаз функционально связана с их концентрацией. Степень концентрации сказывается и на изменении сил при-

* См. Дерягин Б. В., Кротова Н. А. Адгезия. Исследования в области прилипания и клеящего действия. М., АН СССР, 1949.

** Все эмульсии делят на два типа: прямые — масло в воде, в которой дисперсионная среда — вода, а дисперсная фаза — капельки масла, и обратные — вода в масле, в которой дисперсионная среда — масло и дисперсная фаза — капельки воды. Термин «масло» в этом случае условен — это неполярная жидкость.

тяжения между неполярными группами молекул, следовательно, связана с изменением плотности их «упаковки» и более строгой ориентации. Также важен факт преобладающего значения той или другой группы (гидрофильной — полярной, или олеофильной гидрофобной — аполярной), составляющей стабилизаторы, применяемые для эмульсионных смазок. Преобладание гидрофильных групп приведет к образованию эмульсий — смазок первого типа — масло в воде; преобладание олеофильных групп приведет к образованию эмульсий — смазок второго типа — воды в масле. В первом типе эмульсий в качестве стабилизатора применяют мыла — соли высших жирных кислот натрия, калия, аммония с общей формулой $R - COOMe^{+1}$ (в них полярная группа преобладает над неполярной, поэтому они гидрофильны). При использовании кальциевых солей высших жирных кислот получают обратные эмульсии, как и при использовании добавок — солей двух- и трехвалентных металлов с формулой общего вида



Теоретические разработки этого вопроса также показывают, что недопустимо значительное преобладание любого из свойств добавок (их гидрофильности или гидрофобности), любой группы молекул в добавке, так как в этом случае молекулы теряют ценное качество — дефиальность, практически полностью погружаясь в какую-либо (соответствующую) фазу эмульсии.

Третий способ состоит в использовании химических реакций между веществами — дисперсионной средой и дисперсной фазой. Этим способом получены смазки прямого и обратного типов, основанные на базе кислого синтетического эмульсола ЭКС (такой эмульсол получается путем введения в веретенное масло до 10% синтетических жирных органических кислот — кубовых остатков). Смазка получается при смешении ЭКС с водой, в которой растворена известь или кальцинированная сода. В итоге реакции между жирными кислотами, находящимися в эмульсоле, и указанным раствором (гидратом окиси кальция или натрия) на границе раздела этих жидкостей образуются мыла соответствующего состава и снижается поверхностное натяжение. Необходимо учитывать химический состав воды, так как электролиты в отличие от органических веществ увеличивают поверхностное натяжение и тем больше, чем выше их содержание в растворе. Чтобы сохранить стабильность эмульсий и предотвратить их разрушение, при изготовлении эмульсионных смазок (на прямой эмульсии) используемую воду надо смягчать, что снижает в ней концентрацию растворенных электролитов.

По ходу технологических процессов для оценки качества смазок важна проверка по следующим периодам ее поведения: I — удобст-

ва и качества слоя смазки при нанесении на поверхность холодных форм; II — при заполнении форм бетонной смесью и далее при уплотнении интенсивным вибрированием; III — при твердении, в том числе при пропаривании бетона вплоть до его охлаждения при разных режимах твердения; IV — при очистке от смазки. Как правило, смазки пригодны только для однократного использования. Оптимальный состав смазки должен удовлетворять всем требованиям, которые заложены в каждом из указанных периодов. Для примера укажем, что анализ стоимости смазывания и очистки формы-кассеты (за один оборот) при применении трех смазок показывает, как изменяется стоимость работ: для петролатумно-соляровой она составляет 5,3 коп., нигрольно-мыльной — 3,5 коп. и ОЭ-2 — 1,4 коп. на 1 м² изделия. Разница в стоимости связана: 1) с необходимостью осуществления неоднократной профилактической очистки разделительных стенок кассетной формы (например, для петролатумно-соляровой смазки — через 8 оборотов, а для смазки ОЭ-2* — после 100 оборотов); 2) с неодинаковой стоимостью смазок; 3) с различной трудоемкостью очистки форм.

От качества смазки зависят сроки эксплуатации форм и качество поверхностного слоя железобетонных изделий. Составы смазки также надо выбирать, учитывая способы формования изделий (в вертикальном или горизонтальном положениях). Опыты применения смазки ОЭ-2 показали, что она хорошо удерживается даже на поверхностях с отрицательным уклоном (конусах, ребрах и им подобных поверхностях форм). Для горизонтальных поверхностей исключается необходимость их механической очистки при последующих бетонированиях. Смазка не расслаивается до 10 дней. Работы, связанные с получением различных смазок, и выявление их эффективности поставили такие новые вопросы, как изменение поверхностного слоя форм путем использования новых металлов, сплавов, легирования стали, использования органических полимерных облицовок, использования твердых неорганических неметаллических покрытий, замену металлических форм на формы из пластмасс, учитывая особенность таких материалов — отсутствие адгезии бетона к ним. Даже эти краткие сведения о смазках при массовом изготовлении сборного железобетона показывают, сколь важно для технолога-строителя изучение данного вопроса.

Проектирование бетонной смеси и бетона. Как известно, при проектировании бетона любого вида (независимо от наличия или отсутствия в нем арматуры, а также вида и особенностей армирования) основной характеристикой материала служит марочная прочность при сжатии через 28 сут. твердения. В случае воздействия на бетон агрессивных вод требуется, чтобы марочная прочность не уменьшалась. Сборный железобетон тех же марок, что и монолитный железобетон (бетон), используется вслед за изготов-

* Состав смазки ОЭ-2 (по объему): 20% эмульсола ЭКС (механической взвеси кубовых остатков в веретенном масле), 70% насыщенного раствора извести при 60° С, 10% солярового масла.

лением, т. е. его прочность, допускающая транспортирование и монтаж конструкций под нагрузку, должна быть получена за короткие сроки в камерах пропаривания. Это существенное различие в сроках получения высокой прочности бетона связано не только с повышенным расходом цемента, но и с рядом особенностей, вызываемых твердением бетона при ускоренных режимах пропаривания [см. § 59]. Надо отметить особенности, которые возникают при проектировании смеси и бетона для предварительно напряженного железобетона.

Первая и главная особенность — относительно небольшие сечения бетонируемых элементов. Например, в двутавровых опорах линий электропередач стенки двутавра имеют толщину в свету 50 мм при значительном насыщении бетонируемого объема напрягаемой арматурой. Следовательно, для такого высокомарочного бетона смеси должны быть достаточно пластичными, высокой формуемостью (не должны расслаиваться при уплотнении и отделять воду) при относительно небольших размерах крупного заполнителя (см. § 29), хотя уменьшение максимального размера его зерен приводит к увеличению расхода воды в смеси. Бетон в предварительно напряженной конструкции работает как «тиски», зажимающие металлическую напрягаемую арматуру. Неизменяемость свойств в таких бетонах еще в большей степени, чем в монолитных или сборных с обычной арматурой, должна строго регламентироваться в технических условиях и осуществляться при изготовлении предварительно напряженных деталей. По этой причине нельзя согласиться с обычной практикой подбора состава для таких деталей.

Приведем несколько примеров для доказательства сказанного. Как известно, морозостойким считается такой бетон, который при испытании на заданное число циклов не снижает марочной прочности больше чем на 25% (см. § 66). Естественно, что снижение прочности бетона, имеющего неравномерность в ее распределении по материалу детали, приведет к потере контакта напряженной арматуры с бетоном, в теле которого прошли деструктивные процессы. В любом бетоне с течением длительного времени проявляется ползучесть, связанная с природой цементного камня. Это свойство имеет прямое отношение к расчету предварительно напряженного железобетона. Значения деформаций ползучести разных бетонов различаются как по численным значениям, так и по существу. По этой причине особенно в последний период в разных местах проводится достаточно широкое изучение этого свойства и кинетики процесса ползучести. Однако нормативные показатели ползучести не отражают всех ее особенностей и требуют особого внимания при проектировании таких бетонов.

Работа бетона как «тисков» для напряженной арматуры только тогда эффективна, когда приданное ей натяжение сохраняется в полной мере, т. е. неизменен контакт ее поверхности с бетоном. Однако легко убедиться на простых опытах, как исчезает эффект натяжения арматуры [74], например, при многократном совместном действии воды и мороза. Следовательно, важно получить такие

бетоны, которые при пропаривании не теряли морозостойкости и не снижали адгезии с арматурой.

Из сказанного в § 59 известно, что все бетоны на портландцементных (за исключением особо подобранных бетонов, твердевших с применением мягких режимов) снижают качество после пропаривания. В этом случае сказывается различие в кинетике развития процесса контракции у цементов, твердеющих в естественном и ускоренном режимах, что было показано при рассмотрении причин снижения морозостойкости бетонов, твердевших в различных условиях (см. табл. X.4 и X.5).

При прочих равных условиях в изменении сцепления арматуры с бетоном решающее значение играет водоотделение цемента, которое не нормируется. При укладке пластичных смесей вода, отделившаяся от цементного теста, размещается под зернами заполнителя и арматурой, вследствие этого не только резко снижается контакт между цементным камнем и поверхностями указанных материалов, но предопределяется образование слабых мест, где при воздействии агрессивных факторов возникают разрушения деталей из железобетона.

Приемы повышения качества цементного теста в направлении, необходимом для надежной работы железобетона, были рассмотрены выше. Они являются общими для любого вида бетона. Различие лишь в том, что в предварительно напряженных конструкциях процессы разрушения бетона при нарушении свойств, необходимых для его надежной работы, возникают значительно раньше, чем в обычном бетоне. Следовательно, в проектах деталей из предварительно напряженных конструкций нужно с особым вниманием отражать всю совокупность строительно-технических требований на смеси и бетон. Это в полной мере относится к любому виду долговечного бетона.

Отметим, что в ряде случаев краткие сроки службы бетона бордюрных камней, дорожных и аэродромных покрытий, предварительно напряженных пролетных строений мостов и некоторых других конструкций неверно объясняют природой бетона как строительного материала. Такая ошибка связана только с констатацией действительных фактов быстрого разрушения конструкции, качество которых не соответствовало условиям их работы в конкретных средах. К сожалению, последнее обстоятельство, связанное с необходимостью проектирования бетонов по комплексной марке (см. § 53), не учитывается. Сказанное о трактовке причин недолговечности бетона, качество которого для тех или других случаев не отвечает требованиям комплексной марки, высказывающими эти ошибочные суждения, объясняется принципиальной невозможностью получения долговечного бетона, не нацеливая на решение этой важной задачи и приносит весьма крупный ущерб народному хозяйству.

Передовой опыт, базирующийся на капитальных разработках ученых, доказывает, что проектируя бетон по комплексной марке (с учетом всех свойств, влияющих на устойчивую работу бетона), можно получать долговечные бетоны практически в любых усло-

виях. Ранее сказанное о важности глубокого знания свойств цемента должно быть основой для выбора цемента. Опыт кафедры дорожно-строительных материалов МАДИ показывает, что одной из видов-марок цемента для сборного железобетона является шлакопортландцемент соответствующих марок. Соответствие марок — это удовлетворение зависимости $R_n = kR_{б.пр}$ по аналогии с $R_n = kR_{б28}$.

Как видно из этих зависимостей, для сборного железобетона нужно проверять соотношения между марками цемента и бетона в условиях его твердения, аналогичных режиму твердения бетона. Оптимальные результаты дает шлакопортландцемент с высоким содержанием гранулированного шлака оптимальных составов для клинкерной части, смешиваемой с ним, с высокой тонкостью помола при $s \approx 4000 \text{ см}^2/\text{г}$ (см. § 13). Несомненно, что для долговечности конструкции в такие бетоны с целью защиты арматуры следует вводить не только добавки, которые позволяют снижать расход воды (пластифицирующие гидрофильные добавки), но и добавки, регулирующие воздухоовлечение при длительной «сработке» микробетона Юнга, чтобы возникли капилляры с воздушными буферами (см. § 11), а также произошла их гидрофобизация на базе длительного процесса выделения газовой фазы специальными добавками, а также добавки, ингибирующие возможность коррозии арматуры, в частности, арматуры в зоне, наиболее близкой к внешней поверхности детали. Эта часть бетона со временем постепенно карбонизируется, в ней уменьшается показатель рН бетона, что может привести к коррозии металла. Несомненно, в требованиях к качеству бетона должны быть увязаны толщина и плотность защитного слоя. Следовательно, каталогизация свойств цемента, а не ограниченные сведения о его стандартности, являются основой для правильного назначения и применения цемента в строительном производстве, что должно быть отражено в технических требованиях стандарта.

Ранее сказанное о роли регулирования процесса контракции в твердеющем бетоне имеет прямое отношение к качеству поверхности изделий. Чем больше на поверхности мелких неровностей — дырочек, тем хуже использован цемент в процессе твердения в части создания пассивных капилляров, в которых находится поджатый воздух.

§ 75. Технологические пределы при изготовлении сборного железобетона и оборудование заводов

Перед рассмотрением процессов изготовления изделия сборного железобетона остановимся на существенно важном вопросе, связанном с технологией работ, по которому имеются различные мнения. Опыт показывает, что любой технологический предел должен обязательно заканчиваться проверкой в технологическом комплексе. Иная постановка вопроса в отрыве от технологической цепочки при внедрении новых приемов работ, в том числе новых машин и оборудования, во многих случаях дискредитирует отдельные разработ-

ки и предложения, мешает совершенствованию и развитию новых приемов в технологии бетона. Кажущаяся простота технологических переделов при изготовлении сборного железобетона — причина значительного количества нереализованных предложений, авторы которых не учитывают специфики бетона.

Действительно, по прочности контрольного кубика и объемной массе тяжелого бетона нельзя судить о прочности изделия или о любом другом техническом свойстве бетона [75]. На примере шпал с напряженной арматурой, которые формовались из одной бетонной смеси, на одной виброплощадке, видно, что морозостойкость их значительно отличается (как по числу циклов, так и по местам разрушения).

Следовательно, изменение состава бетонной смеси по ходу технологического процесса условий формирования, уплотнения, режима твердения, ухода за твердеющим бетоном отражается на бетоне. Это подтверждает теоретические положения о влиянии различных факторов, в том числе случайных, в силу нестабильности свойств исходных компонентов бетонной смеси, которые изложены в ряде параграфов учебника.

Задача технологов — систематически работать над созданием машин и оборудования, проведением оперативного контроля качества исходных материалов в полном соответствии с теоретическими положениями, которые лежат в основе науки о бетоне и технологии его приготовления. Изучение причин неоднородности бетонов должно лежать в основе подхода к любому проектированию предприятий по изготовлению сборного железобетона. Технология, которая строится без учета этого основного технического принципа, не может считаться прогрессивной.

Неоднородность бетона также затрудняет разработку более экономичных конструкций. Отсутствие объективного анализа причин неоднородности бетонов не позволяет быстро и правильно решать технические задачи, связанные с выбором оптимальных приемов изготовления сборного железобетона в масштабе страны. Как это осуществлено во многих отраслях народного хозяйства, необходимо от решения частных вопросов технического развития той или иной отрасли в отдельных ведомствах перейти к решению комплексной задачи их технического перевооружения на всех технологических переделах, осуществляя последние в большом производственном масштабе в хорошо организованных заводах-лабораториях для сборного железобетона и на полигонах.

Дальнейшее развитие предприятий сборного железобетона будет из года в год резко возрастать. Этот рост не столько связан с развитием существующих заводов, сколько со строительством новых предприятий. Без наличия научно организованной производственной проверки каждого нового проектного решения в указанных заводах-лабораториях будут вновь допущены ошибки, которые во многих случаях невозможно предвидеть, если ограничивать решение задачи технологической разработки только одной проектной стадией, без тщательной опытной проверки.

Таблица XIII.1

Марка дозатора	Тип дозатора	Размер порций (кг) для двух бетономесителей		Дополнительные сведения
		425 или 500 л	по 1200 л	
АВДЦ-425г АВДЦ-1200	Автоматический для цемента	От 40 до 120	От 100 до 300	Для уменьшения пыления на верхней и нижней частях имеются брезентовые чехлы
АВДЖ-425 и АВДЖ-1200	То же, для жидкостей (воды, растворов, с. д. б. и электролитов)	От 20 до 200	От 20 до 200	Вместо воды дозируется любой раствор
АВДИ-425 и АВДИ-1200	То же, для песка, гравия (щебня)	От 80 до 600	От 200 до 1200	Дозаторы предназначены для последовательного отмеривания двух фракций песка и гравия (щебня) с максимальным размером до 140 мм

Примечание. Кроме указанных марок, выпускаются дозаторы по массе порционного действия для бетономесителей емкостью 2400 и 4500 л. Это рычажные весоизмерительные приборы с переменным отношением плеч.

Свойства бетона — это функция многих параметров, среди которых параметры, связанные с твердением даже одного и того же цемента, в свою очередь, зависят от качества технологического периода. В таком направлении и рассмотрим организацию каждого из них: дозирование и смешивание компонентов бетонной смеси, подготовку форм и монтаж арматуры в формах, транспортирование бетонной смеси и ее распределение в формах, уплотнение — формирование бетонной смеси, твердение бетона, распалубливание и отгрузку изделий.

Дозирование и смешивание компонентов бетонной смеси. Для дозирования применяют полуавтоматическое или автоматическое взвешивание материалов на один замес с учетом их влажности. Точность дозирования составляет: для цемента и воды $\pm 1\%$, для заполнителей $\pm 2\%$ при длительности дозирования каждого замеса не более 45 с. Существуют два способа смешивания — периодический и непрерывный, поэтому соответственно этому имеются дозаторы периодического и непрерывного действия. Для дозирования цемента выпускается серия дозаторов, выдающая взвешенные порции цемента на замес — от минимальной в 40 кг до максимальной в 700 кг. Подробные сведения о марках дозаторов, выпускаемых

промышленностью, можно получить в работах [18, 41, 44, 45]. Дозаторы рассчитаны для работы на инвентарных заводах с двумя бетоносмесителями указанных загрузочных емкостей. Как видно из табл. XIII.1, габаритные размеры дозаторов одного и того же технологического назначения различны.

Заполнители в зависимости от количества фракций (одна, две и три) отвешиваются на дозаторах соответствующего исполнения (одно-, двух- и трехфракционного). Для этого бункера-питатели, в которых хранится запас материалов, имеют соответствующее число отсеков. Фракции заполнителей взвешиваются последовательно — одна за другой, что увеличивает продолжительность стмеривания материалов на каждый замес. Подача порций материала на весы осуществляется с помощью релейной системы автоматики.

В дозатор входит: загрузочное устройство, весовые механизмы, аппаратура управления затворами и весовыми механизмами. Дозаторы заполняются под давлением силы тяжести материала (гравитационные) или с помощью питателя. Дозаторы с полуавтоматическим управлением (а ранее и ручным) могут обслуживать не более двух бетоносмесителей только при их линейном расположении на одном уровне. Автоматические дозаторы позволяют резко увеличить производительность труда и на одном комплекте обеспечить работу до 4—5 бетоносмесителей при их размещении вокруг общего центра. Подробные сведения о конструкции дозаторов, их автоматизации и работе по совершенствованию аппаратуры даны в специальной литературе [18, 45].

Опыт работы с дозаторами показывает, что неравномерность состава бетонной смеси часто связана с систематической их переналадкой из-за одновременного выпуска каждым заводом нескольких составов бетона. Следующим шагом в повышении качества бетона должна быть работа завода по заданной программе.

Исключение влияния оператора на выдачу бетонной смеси проектного состава и обеспечение бесперебойной работы дозаторов с необходимой точностью — первый шаг в технологической цепочке производства бетонной смеси с высоким коэффициентом однородности. Такое производство бетонной смеси устранил возможность бесконтрольного увеличения содержания в смеси воды. Научно организованное управление составом и очередностью выдачи бетонной смеси не только значительно повысит ее однородность, но и резко улучшит использование транспортных средств.

Смешивание компонентов бетонной смеси аналогично изложенному в § 68. Особенности смешивания компонентов бетонной смеси состоят в том, что значительное количество сборного железобетона изготавливают с применением крупного заполнителя, максимальный размер которого (из-за относительно небольших сечений деталей и большого количества арматуры) значительно меньше, чем заполнителя, используемого для конструкций. Кроме того, для получения бетона высоких марок следует применять жесткие смеси, в которых ограничивается содержание воды. Для перемешивания таких смесей пригодны смесители только принудительного дейст-

вия. Следует иметь в виду, что расслоение смеси в силу небольших размеров сечения деталей сборного железобетона вызывает неоднородность смеси, не связанную с работой дозаторов. Жесткие смеси перемешивают дольше (160—180 с) смесей пластичных (60 с).

Нельзя изменять условия перемешивания смесей за счет модернизации смесителей до того момента, пока они не будут регламентированы нормативными документами. Известны предложения об улучшении качества перемешивания смесей на смесителях принудительного действия. Например, вибрирование смесей во время перемешивания, т. е. виброперемешивание. Для изготовления монолитных бетонных и железобетонных конструкций был применен принцип разделения операций по смешиванию компонентов на стадии. Вместо перемешивания всех компонентов в смесителе, перемешивается только растворная часть (цемент+вода+песок). В одном из отдельных способов бетонирования — «погружения в раствор» в опалубку подают растворную смесь, в которую при ее тиксотропном разжижении засыпают заполнитель (в нашем случае при использовании внутренних вибраторов с частотой колебания 3000 кол/мин размер зерен допускается от 20 мм), а в другом (ранее применявшемся) в засыпанный гравий или щебень заливают растворную смесь. Как следует из этих описаний, в первом способе не было расслаивания бетонной смеси при транспортировании (на ленточных транспортерах) и упрощалось приготовление бетонной смеси в больших количествах, так как стадия перемешивания в смесителях заменялась погружением крупного заполнителя в растворную смесь. В этом случае как бы совмещаются две операции: смешивание и уплотнение, которое приводит растворную смесь в состояние тиксотропного разжижения и зерна крупного заполнителя погружаются в такой раствор — смешиваются с ним. Однако это неравноценно перемешиванию в смесителях всех компонентов с последующим уплотнением смесей вибрированием.

Если после предварительного перемешивания удастся использовать крупный заполнитель с полным набором стандартных фракций выше 5 мм, то в случае отдельной укладки по способу «погружения в раствор» этого сделать не удастся, так как мелкие фракции не погружаются в вибрируемый раствор. Крупные фракции при этом способе должны пройти в растворе больший путь, а следовательно, нельзя произвольно выбирать толщину слоев растворной смеси и крупного заполнителя. И, наконец, работа вибраторов должна быть надежной, иначе не произойдет смешивания*.

Указанный способ представляет интерес при массовом бетонировании и позволяет отказаться от трудоемкого процесса смешивания крупного заполнителя с растворной частью бетона. Вибрирование как промежуточный процесс (после перемешивания смесь вновь подвергается механическим воздействиям) не может быть признано целесообразным, так как вибрация разрушает материалы

* Сказанное в особой степени относится к приемам пакетного вибрирования.

и, в частности, механизм самого вибратора; она воздействует и на детали смесителя, постепенно его разрушая. По этой причине любые предложения, связанные с улучшением того или другого технологического эффекта при производстве бетонных работ, следует проверять не только по прямым показателям качества полученного материала — бетона (раствора), но и по надежной и стабильной работе тех агрегатов, которые позволяют его повысить.

Способ раздельного бетонирования проверен, начиная от массовых лабораторных до полигонных работ, и подтвердил сказанное о равноценности качества этого способа с обычным способом работ. Несомненно, в случае применения раздельного способа поверхность зерен не должна быть загрязнена. Надо иметь в виду, что перед началом выпуска смеси, а также по ходу работы завода необходима проверка выхода бетона. Для этого объем любого замеса замеряют в уплотненном состоянии. В случае необходимости корректируют дозы материалов, составляющих бетонную смесь.

Транспортирование бетонной смеси. На заводах сборного железобетона возможность расслоения бетонной смеси практически сведена на нет. Однако и здесь способ транспортирования должен быть увязан с условиями формирования бетонной смеси. Действительно, объем замеса может превышать объем, который укладывается в форму для железобетонной детали (конструкции) или оказаться малым для ее заполнения. Такое соответствие и не обязательно. Обязателен учет времени укладки смеси из каждого замеса, так как решающее значение имеет снижение формуемости спустя определенный период, прошедший после изготовления смеси. Это время условно связывают со сроками схватывания цемента (см. § 9). Известно, что сроки схватывания цемента при стандартном определении отличаются от сроков его схватывания в бетонной смеси в силу разного содержания в них воды и различия температур помещения, в котором производится бетонирование, и лаборатории, где испытывался цемент. В жестких бетонных смесях В/Ц теста нормальной густоты значительно ближе по значению к В/Ц теста в жестких смесях, а температура помещения в ряде случаев может быть выше 15—20°С (стандартной температуры, при которой определяются сроки схватывания цемента). Поэтому сначала следует весьма обстоятельно решать вопрос о возможных сроках выдерживания бетонной смеси в форме до полного заполнения или о применении двукратного вибрирования одной части смеси, или многократного повторного вибрирования отдельных объемов ее, но с обязательным учетом химического связывания отдельных замесов смеси, засыпаемых в форму в единый монолит при последующем повторном вибрировании.

Смесь из раздаточного бункера бетоносмесителя, куда она поступает после окончания смешивания, загружается в соответствующую емкость — бадью, опрокидывающийся ковш, ленту транспортера, трубы для пневматранспортирования и т. д. Первые две емкости загружают с помощью следующих транспортных механизмов — мостовых кранов, позволяющих с необходимой гибкостью,

не занимая площадей цеха, подавать смесь в любое место изготовления деталей; автокар; самоходных бетонораздатчиков; автопогрузчиков с опрокидным ковшом; электропогрузчиков. В табл. XIII.2 приведены некоторые сведения о грузоподъемности, наибольшей высоте, на которую можно поднять емкость со смесью, и скорости подъема емкости.

Таблица XIII.2

Характеристика транспортных механизмов	Автопогрузчики			Электропогрузчики			Электрораки	
	4ПМЗ	400З	400В	400В	4МПА-6	КВЗ-02	ЭКБС-750	ЭК-2
Грузоподъемность, т	3	5	10	5	0,5	1,5	0,75	0,2
Наибольшая высота, на которую можно поднять емкость, м	3	4	4,5	7	2	2,75	2,1	—
Скорость подъема, м/мин	12	8,5	6,5—10,0	5,5	≤10	4,25	—	—

Учитывая характеристики формуемых деталей, объем и ассортимент выпускаемой продукции, схемы производства, используемые на заводе (стендовую, конвейерную, агрегатно-поточную, смешанную технологии), рассчитывают и подбирают транспортные средства, а также увязывают их с остальными механизмами и оборудованием для технологического процесса.

Следует учитывать еще один важный показатель, который оценивал бы транспортные средства с точки зрения загрузки формы смесью разной пластичности (жесткости) и обеспечения при этом ее стабильности (нераспаиваемости). Этот показатель различен для разных средств.

В последнее время все больший размах приобретает автоматизация раздачи бетонной смеси [18], сблокированная в одну систему с ее приготовлением. Бетонная смесь необходимой марки подается к постам формирования, оборудованным бетонораспределителями. Должны быть автоматизированы и последующие технологические переделы. Автоматизация процесса транспортирования смеси наиболее проста для транспортирования в бадах, ковшах, вагонетках, режим работы которых может соответствовать режиму работы бетономесителей периодического действия.

Формование бетонной смеси — уплотнение в опалубке или форме определенного геометрического очертания и размеров до заданных технических свойств бетона. Рассмотрим задачи, возникающие при формировании смеси, и процесс ее уплотнения. Необходимо отличать уплотнение смеси при изготовлении контрольных образцов кубов на лабораторных виброплощадках от уплотнения смеси при изготовлении деталей (конструкций), в том числе крупногабаритных из сборного (и монолитного) бетона (железобетона). В первом случае уплотняется небольшой объем смеси любого состава на стандартных виброплощадках, в одних и тех же условиях, строго выверенных и отработанных.

Получение образцов с раковистой поверхностью или иными дефектами — признак неуплотняемости смеси и необходимости ее корректирования. При этом легко определить, какие из них ближе по составу к неуплотняющейся смеси, а какие хорошо уплотняются. Неуплотняемость смеси в изделиях различных геометрической формы, габаритов, массы при разной насыщенности арматурой очень часто зависит не только от состава смеси, но и от условий вибрирования (типа вибратора, места приложения источников колебания к уплотняемой смеси, максимальной крупности заполнителя и т. д.). Например, эффект вибрирования смеси различен при использовании синхронизированных виброплощадок, наружных навесных вибраторов, крепящихся к форме или устанавливаемых на уплотненной смеси и названных поверхностными, различных типов внутренних вибраторов.

При применении внутренних вибраторов [11] необходимо правильно выбрать место установки — назначить радиус их действия, за пределами которого смесь остается неуплотненной, так как цементное тесто не приобретает текучести, связанной с его тиксотропным разжижением*. Лаборатория в процессе проектирования бетона, не ограничиваясь при выборе пластичности-жесткости только одним лабораторным экспериментом, обязана проверить ее соответствие условиям производства работ. Надо учитывать, что показатель достаточности вибрирования смеси по появлению влаги на поверхности детали не является объективным критерием ее уплотнения.

Завершенность уплотнения определяется совокупностью показателей: продолжительность вибрирования, осуществляемого в полном соответствии с назначенной схемой расстановки вибраторов внутренних, наружных или тех и других (или установки формы на виброплощадке и особенности крепления формы к ней, использованию пригруза), а не по продолжительности вибрирования образца на лабораторной виброплощадке. При этом необходимо полное соответствие проекту: состава смеси по всем показателям расположения и закрепления арматуры и, наконец, выделение влаги на поверхности точно в назначенный срок, соответствующий окончанию вибрирования смеси. Более раннее образование на поверхности цементного молока является признаком начала расслоения и требует изменения состава смеси или, в крайнем случае, ее повторного многократного вибрирования, чтобы удалить отделяющуюся воду из уплотняемой смеси.

В некоторых монографиях, технологических наставлениях и памятках имеются указания по вопросу достаточности времени вибрирования жестких смесей только по прекращению ее оседания и появлению блеска на поверхности, а пластичных смесей — по появлению цементного раствора на поверхности уплотняемой смеси. Указанные признаки связаны с тиксотропным разжижением не всего объема, а только части уплотняемой смеси.

* Сказанное относится к смеси, которая при указанных условиях вибрирования тиксотропно разжижается.

Чем пластичнее смесь, тем ближе к максимальной степени ее уплотнения признак выделения раствора с появлением блеска на поверхности уплотняемой смеси. Следовательно, указанный визуальный признак показывает окончание уплотнения смесей высокой степени пластичности (8—10 см). Выше этой осадки конуса показано уплотнять смеси с применением вибрирования, так как при возникновении колебаний частиц мгновенно наступает их расслоение. При этом в смеси происходит не только разделение составляющих ее частиц по высоте уплотняемого слоя, но и протекает миграция воды в верхние слои уплотняемой толщи, т. е. происходит расслоение — седиментация цементного теста, изменение В/Ц бетона по слоям. Это хорошо видно при использовании ультразвуковых и кондуктометрических приемов контроля уплотнения (рис. XIII.1). Сущность процесса уплотнения смеси при вибрировании изложена ранее в § 72. Бетон, полученный из смеси со случайной степенью уплотнения (недоуплотненный бетон), имеет свойства, которые всегда ниже запроектированных и не могут быть оценены без прямых испытаний. Следовательно, такой бетон нельзя использовать в строящихся объектах.

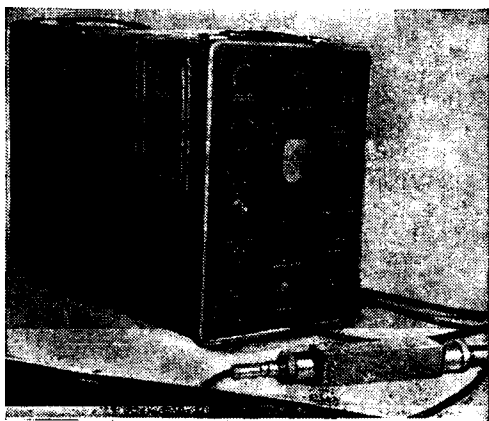


Рис. XIII.1. Ультразвуковой метод контроля бетона

Уход за твердеющим бетоном. Пропаривание производят в тоннельных и ямных устройствах — камерах, кассетах, под колпаком и при повышенных давлениях в автоклавах [35, 38, 39]. Если в монолитном бетоне (железобетоне) под словом уход понимается обеспечение твердения бетона при сохранении в нем всей воды затвердения при любых положительных температурах внешней среды, то для сборного бетона (железобетона) сказанное относится к твердению в искусственно создаваемой тепловлажностной среде.

К сожалению, очень часто твердение бетона ускоряется за счет искусственного повышения температуры внешней (паровоздушной) среды с испарением влаги из бетона. Резко увеличивается пористость бетона даже при обычном изменении относительной влаги воздуха. Опыт показывает, что в результате нарушения влажности воздуха затвердевший бетон не только имеет пониженную прочность по сравнению с эталоном (твердевшим в стандартных условиях), но и все другие низкие технические свойства. Следовательно, все камеры или другие устройства, в которых производится пропаривание, должны быть оборудованы автоматическими система-

ми, следящими за обеспечением теплового режима, заданного лабораторией, и необходимой влажности воздуха [18, 35, 45]. При технически необоснованном сокращении времени пропаривания для повышения с/ема продукции с единицы площади пола камер резко ухудшаются технические свойства деталей, несмотря на повышение в них содержания цемента для получения бетонов заданной марки. Такое увеличение расхода цемента нарушает технические условия и наносит ущерб народному хозяйству, не позволяя произвести большее количество бетона из такого же количества выпускаемого цемента.

Для выполнения плана предприятия должны иметь соответствующее количество камер пропаривания, чтобы не допускать снижения качества бетона и перерасход цемента. Также недопустимо неразумное удлинение режима пропаривания, так как снижается объем продукции без каких-либо положительных результатов для повышения ее качества, которое уже было оптимизировано для заданного, более короткого, режима тепловлажностной обработки. Автоматизация последней включает не только общее время пропаривания, но каждый его этап, что особенно важно для этого процесса (выдержку детали перед подъемом температуры — длительность ее подъема, изотермический прогрев и снижение температуры — охлаждение детали).

Существуют следующие схемы регулирования режима пропаривания: 1) частичное регулирование, при котором задается лишь продолжительность процесса и максимальная температура (при которой протекает изотермический процесс); 2) полное или программное регулирование. При проектировании автоматизированных систем за основной параметр следует принимать температуру камеры, а также относительную влажность воздуха.

Направленное формирование структуры цементного камня со свойствами, заданными проектом, обеспечивает систематическое многолетнее твердение бетона в любых условиях его работы и, следовательно, его надежную долговечную работу. Зимой горячие детали нельзя выносить из помещений цеха на воздух. Резкий перепад температур приводит к появлению трещин в бетоне. В табл. IX.16 были приведены некоторые сведения о качестве бетона, пропаренного по разным режимам в производственной камере пропаривания. Режим твердения при прочих равных условиях и определяет его качество.

Недопустимо нарушать режим твердения независимо от условий твердения (обычные температуры наружного воздуха в любой период года, положительные температуры или пропаривание в камерах и автоклавах). Нарушение режима — это испарение из бетона влаги, что, в конечном счете, приводит к одному из видов его разрушения. Анализ результатов испытания пропаренных образцов бетона на двух цементах с близкими минералогическими составами (один содержал гидравлическую добавку — трепел, что видно из показателя нормальной плотности цемента) позволяет сделать следующие выводы.

Используя для изготовления деталей жесткие смеси, при некоторых режимах пропаривания удается получить бетон с гарантированным пределом прочности в $0,9 R_{28}$ (см. табл. IX.16), при этом наибольший результат показывают образцы цемента, содержащие гидравлическую добавку (образцы № 14 — $0,98 R_{28}$ по сравнению с $0,93 R_{28}$ у образцов № 51).

Даже относительно небольшое увеличение содержания воды (например, 15 л в 1 м^3 бетона) не позволяет получать бетон с указанной прочностью; исключение выдержки бетона, сокращение срока пропаривания при наиболее высоких температурах, в данном случае в 80°C (и близких к ней), также отражается на показателях предела прочности образцов, испытанных вслед за окончанием пропаривания (образцы № 2, 7 и 11).

Резкое сокращение режима пропаривания бетонов из жестких смесей (образцы № 1 и 10) не позволяет получать высокую относительную прочность вслед за окончанием пропаривания (для обоих составов получена относительная прочность у пропаренных образцов бетона, в среднем равная $0,51 R_{28}$); дальнейшее твердение бетона в нормальных условиях позволяет получить прочность, практически равную прочности бетона, твердевшего без пропаривания. Следует учитывать, что получение после пропаривания по такому короткому режиму прочности, близкой к прочности бетона, твердеющего 28 сут. в нормальных условиях, связано с тем, что у бетонов из жестких смесей при пропаривании незначительны дефекты в структуре цементного камня и в текстуре бетона благодаря применению смесей с относительно невысоким содержанием воды (135 л при содержании цемента в 460 кг).

§ 76. Приготовление бетонной смеси с применением мокрого помола клинкера

Метод получения цементного теста заданного состава путем мокрого помола в мельницах клинкера и необходимых добавок (минеральных, гипса, пластификаторов, гидрофильных ПАВ, электролитов) разработан СоюзДорНИИ и НИИЦемент и осуществлен в полупроизводственном масштабе в Москве на опытной помольной установке. Успешное выполнение работ позволило рекомендовать мокрый помол для широкого внедрения в производство.

Опытная установка включала: 1) двухкамерную шаровую мельницу диаметром 1,5 м с электродвигателем 120 кВт, со скоростью вращения 27 об/мин (длина первой камеры 1,97 м, шары диаметром 35—75 мм и общей массой 4,8 т; длина второй камеры — 3,5 м, металлические цилиндры-цильпебсы диаметром 18—20 мм, длиной 30 мм, общей массой 6,5 т); 2) три тарельчатых питателя типа ТП-750; 3) ленточные транспортеры, подающие материалы от склада до бункеров над мельницей; 4) два шламосмесителя вместимостью по 2 м^3 с электродвигателями по 2,8 кВт для вращения лопастей, перемешивающих шлам; 5) два насоса С-232 производительностью по $6 \text{ м}^3/\text{ч}$ для перекачки шлама; бачок объемом 1 м^3 и два

дозировочных бачка для отмеривания дозы шлама на каждый замес (бачки были расположены над бетоносмесителями); 6) трубопроводы диаметром 65 и 75 мм для транспортирования шлама от шламосмесителей к бачку бетоносмесителя; 7) дробилки для предварительного дробления кусков крупного клинкера перед размолом.

Для разных схем помола необходимо подбирать соответствующее оборудование. В частности, особое внимание требует конструирование выгрузочной футеровки (в выгрузочной цапфе); на мельницу была поставлена футеровка от другой мельницы Ш-1М. Хорошие результаты достигнуты при замене на мельнице входной футеровки гладкой конусной футеровкой, при этом привод можно установить с любой стороны мельницы, меняя направление ее вращения. Рассмотрим предпосылки, послужившие основанием для внедрения нового вида помола клинкера, и особенности этой технологии.

Мокрый помол позволяет:

1) резко снизить потери цемента от его распыливания при транспортировании, начиная с выдачи из мельницы и кончая перемешиванием в бетоносмесителе; по нашим опытам они не больше 0,1 %;

2) устранить снижение активности цемента от лежания*, так как производится помол в водной среде с последующим приготовлением теста;

3) значительно снизить расход электроэнергии на помол — примерно на 25 %;

4) упростить транспортирование и хранение клинкера; его можно перевозить в открытых баржах, полувагонах и хранить под открытым небом сколько угодно лет при любых погодных условиях;

5) практически решить вопрос о широком использовании местных минеральных материалов как активных, так и не вступающих в реакцию с цементом (молотого карбонатного материала, минеральных строительных отходов, кирпичного боя, золы ТЭЦ и других материалов);

6) значительно улучшить условия труда работающих на помоле;

7) устранить затруднения, связанные с необходимостью хранить на строительных площадках цементы разнообразных видов и марок, которые в ряде случаев для упрощения работ смешиваются (ссыпаются в одни емкости), что вызывает перерасход цемента;

8) размалывать цемент быстрее, чем по обычному способу на тех же мельницах и при той же затрате электроэнергии;

9) значительно выравнивать минералогический состав цемента, что видно на резком повышении сульфостойкости и морозостойкости бетонов (а также уменьшения их ползучести).

В табл. XIII.3 приведены результаты испытания на морозостойкость растворных кубов состава 1 : 3 на вольском песке. Из табл. XIII.3 видно значение тонкого измельчения клинкера в цементное

* Лежание цемента включает потерю активности вследствие адсорбции влаги и CO_2 воздуха на поверхность его зерен, в том числе когда цемент горячий при выпуске из мельницы.

тесто. При этом вводится значительно больше гипса, чем в случае обычного заводского помола клинкера. Результаты испытания цементов с таким высоким содержанием гипса подтверждают значение условий формирования структур цементного камня, в котором содержится глиноподобный компонент — гидратированный трехкальциевый алюминат.

Более тонкий мокрый помол клинкера способствует большему вскрытию трехкальцевого алюмината и образованию с гипсом высокоосновной формы гидросульфоалюмината $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \times \times 3\text{CaSO}_4 \cdot 31\text{H}_2\text{O}$. Даже несulfатостойкий цемент с 11% минерала C_3A при введении больших доз гипса в цементное тесто мокрого

Таблица XIII.3

Расчетный минералогический состав клинкера, %				Вид помола	В/Ц	Предел прочности при сжатии, кг/см ² (10 ⁻¹ МПа)			Внешний вид		
C ₂ S	C ₃ S	C ₃ A	C ₄ AF			Эталон после 28 сут. твердения	Количество циклов испытания				
							50	100	200		
51	22	11	11	Сухой	0,35	58	24	—	—	После 56 циклов образцы сняты с испытания	—
51	22	11	11	Мокрый	0,37	137	156	295	—	Трещины после 164 циклов, углы и ребра разрушены	После 397 циклов сняты с испытания
55	18	6/5	17	Сухой	0,33	126	131	146	225	Начало разрушения углов и ребер после 200 циклов	После 534 циклов сняты с испытания
55	18	6/5	17	Мокрый	0,41	208	259	272	369	Изменений нет после 200 циклов	После 500 циклов изменений нет, после 900 циклов небольшое разрушение углов и ребер

Примечание. Все образцы содержат 20% двуводного гипса и 0,2% с. с. б.

помола резко увеличивает свою морозостойкость. Разрушение растворяемых образцов — результат совместного действия двух агрессивных воздействий — замораживания воды и последующего связывания гидратирующего алюмината с гипсом в период, когда произошло упрочнение образцов за счет формирования структур из силикатных минералов.

В цементе, содержащем до 6% минерала C_3A , когда цементное тесто еще находится в упруго-вязко-пластичном состоянии, при мокром помоле успевает связаться с гипсом практически все количество этого минерала. Несмотря на наличие в данном составе большего количества воды ($V/D=0,41$ против 0,33 у образцов на цементе сухого помола) морозостойкость их значительно выше. Разрушение образцов на этом низкоалюминатном цементе также является следствием двух агрессивных воздействий. Следовательно, можно предполагать, что не разрушение бетонов на сульфатостойких портландцементных соединениях является результатом: а) блокировки гидросульфаталюминатных соединений новообразованиями из силикатных минералов; б) недостаточных сроков воздействия на бетоны, приготовленные на таких цементах, агрессивной сульфатной среды.

Образцы мокрого помола на сульфатостойких клинкерах имеют, несомненно, более высокие технические свойства. Результаты испытаний убедительно доказывают роль отдельных минералов клинкера в образовании структур с различными свойствами, правильность отнесения бетонных работ к химической технологии и роль строителя в обеспечении проектных решений при условии, что техника производства бетонных работ сочетает науку о химии цемента и технологии бетона с организацией на их основе прогрессивных приемов бетонирования.

Организация работ только тогда имеет право называться прогрессивной, когда потенциальные возможности цемента, дефицитного и дорогостоящего (по трудоемкости) материала, будут использованы с максимальным эффектом. Основой для такого использования является организация направленного структурообразования цементного камня. Однако неверно считать, что мокрый помол клинкера можно применять при несовершенной организации производства. Мокрый помол должен быть ведущим технологическим переделом, которому подчиняется весь производственный ритм. Действительно, при помоле клинкера необходимо получившееся цементное тесто сразу же использовать в растворо- и бетоносмесителях. Возможен помол шлама с торможением процессов схватывания цементного теста, что связано с дополнительными трудностями, и его обычно не применяют.

Приготовление шлакопортландцемента и цемента с золой ТЭЦ осуществляют по двухстадийной схеме. В этом случае производят помол большого количества гранулированного шлака, золы или других минеральных материалов и далее при помоле клинкера смешивают их с цементным тестом. Следовательно, остановка мельницы с разогретым в ней шламом* из клинкера вызывает его загустевание, требует промывки мельницы, что влечет за собой потери вяжущего. Отсюда ритм производства связан с ритмом непрерывно и надежно работающей мельницы. Для исключения всяких потерь цемента в виде шлама, происходящих по любым непредвиденным

* Шлам разогревается в результате резко возрастающей температуры воздуха из-за трения металлических шаров и цилиндров по футеровке мельницы.

причинам, целесообразно организовывать отбор воды от шлама, предварительно «разжиженного» промывными водами, путем его вакуумирования и затем использовать сгущенное до заданного В/Ц тесто в производстве.

При начале опытных работ, когда бетонная смесь на цементе мокрого помола выдавалась в автосамосвалы, потеря шлама по случайным причинам (в основном из-за задержки в подаче автомобилей, развозивших смесь в Москве) составила в односменную работу 1,25% и в двухсменную 0,6% от количества выпущенного цемента.

При проектировании мокрого помола клинкера надо иметь в виду, что сточные воды из цеха помола, как и из любых мест, должны подаваться в особые приямки с таким объемом отстойников, которые обеспечивают их осветление от зерен цемента. Слив неосветленных вод в короткий срок забивает цементной пастой канализационные трубы.

Теоретической основой для использования мокрого помола клинкера [48, 70, 72, 74] явился анализ приготовления бетонной смеси. Действительно, от момента ее замешивания до уплотнения проходит достаточно времени, чтобы в процесс бетонирования можно было вписать процесс помола клинкера. Анализ (см. § 8, 9 и 46) сроков схватывания цементов разнообразного минералогического состава и возможности регулирования их позволил автору данного учебника сформулировать положение о твердении цемента (о его гидролизе и гидратации) как о процессе, протекающем заторможено. Одной из причин различной степени торможения этого процесса является наличие в цементе мгновенно реагирующего с водой минерала C_3A . Учитывая сказанное и дальнейшее развитие технологии приготовления бетонов с гидрофильными пластифицирующими добавками, организация помола клинкера мокрым способом способствует процессу производства работ. Правильная точка зрения на необходимость организации работ с минимальной затратой труда на строительной площадке не имеет оснований для отказа от реализации этого приема. Действительно, цемент до его смешивания с водой является полуфабрикатом. Твердение цемента — длительный процесс. Хранение цемента и применение его снижает эффективность использования и резко ухудшает условия труда в запыленных помещениях.

Мокрый способ помола клинкера хорошо вписывается в технологический процесс и является более простым, чем сухой помол клинкера на цементных заводах. Эффективность мокрого помола клинкера основана на понижении прочности материала в водной среде вследствие расклинивающего действия пленок воды при всестороннем обжатию в дефектах твердого тела, в нашем случае клинкерных частиц. Этот эффект был открыт акад. П. А. Ребиндером. Приведенные сведения о мокром помоле были проверены экономическими расчетами.

Многолетний опыт применения сборного железобетона в широком масштабе показал, что не всегда и не везде монолитный бетон следует заменять сборным. При производстве сборного железобе-

тона повышается расход цемента (что не будет иметь места при мокром помоле), применяется пропаривание для ускорения твердения и ряд других мероприятий, удорожающих сборный железобетон. При этом было незаслуженно ослаблено внимание к научным работам по технологии монолитного железобетона.

Применение сборного или монолитного бетона (железобетона) должно иметь технико-экономическое обоснование. При этом следует учитывать: особенности возводимого сооружения, прогрессивность технических решений, заложенных в проект, климатические условия, наличие или отсутствие базы для изготовления того и иного вида бетона (железобетона), сопоставление себестоимости и цен на материалы и полуфабрикаты для монолитного или сборного бетона (железобетона), систему ценообразования в строительстве и производительности труда, условия размещения рабочей силы, возможность ее получения по профессиям и численности, возможность снижения сметной стоимости, целесообразности отказа от унификации объемно-планировочных решений, различных параметров сооружения и его конструктивных деталей, выгод, связанных с более полным использованием преимуществ неразрезных систем, более гибких архитектурных решений и др.

Из этого перечисления видно, что при решении принципиальных вопросов по выполнению народнохозяйственных планов рассмотрение столь важной области строительного производства нельзя ограничивать узким кругом вопросов. Расчет эффективности и области рационального использования в строительстве бетона того и другого вида должны лежать в основе их выбора. Область применения каждого вида не должна и не может связываться только с названием детали и конструкций, за исключением некоторых специфических по характеру изготовления (например, шпал, балок, колонн, опор контактной сети, линий связи и электрификации и некоторых других). Удешевление сборного железобетона и повышение его качества связано с углублением специализации заводов и, в частности, с использованием технологии работ, допускающей широкое применение различных марок бетона*.

§ 77. Отпускная прочность и заводская готовность элементов и деталей из железобетона

Кроме ранее принятой отпускной прочности после пропаривания конструкции, равной 70% от марки бетона, по показателю прочности при сжатии в последнее время с ростом выпуска бетона (железобетона) стали учитывать отпускную прочность, равную 100% от марки бетона вслед за окончанием пропаривания. Анализ работы большого числа заводов, изготавливающих сборный железобетон, показывает, что получение конструкции 100%-ной отпускной прочности связано со значительным расходом цемента, не оправдано и

* Это допускается лишь при использовании мокрого помола клинкера.

вызвано недостаточным вниманием отдельных лиц, проектирующих объекты, к экономике строительства и, в частности, к экономии цемента.

Величина отпускной прочности бетона определяется: а) расчетными условиями, связанными с транспортированием деталей после их изготовления; б) то же, но для их монтажа; в) сроками нагружения смонтированных деталей до эксплуатационных нагрузок. Несомненно, и время года также должно учитываться при назначении величины отпускной прочности бетона.

Сказанное подтверждает важность использования при изготовлении сборного железобетона таких видов-марок цемента, которые после пропаривания, при расходе цемента, равном расходу для той же марки бетона, твердеющего в стандартных условиях, показывали бы марочную прочность для случая 70% отпускной прочности и 100% — для остальных случаев. В последнее время ведутся работы в области исследования цементов, позволяющих получать бетоны с указанными пределами прочности при отгрузке на строительную площадку. Однако неверно считать, что можно получить высокую отпускную прочность бетона только за счет применения высококачественных цементов специальных составов для ускоренных режимов твердения, не используя при этом чистые фракционированные заполнители, комплексные добавки, в том числе ускоряющие твердение без коррозии арматуры, а также оборудование и средства производства деталей, позволяющие формовать наиболее жесткие бетонные смеси. Дальнейшее совершенствование производства сборных железобетонных изделий связано с укрупнением специализированных предприятий (где резко снижается его себестоимость).

Опыт показывает, что строителям приходится затрачивать много труда на доведение деталей до состояния, годного для сдачи объектов в эксплуатацию. Неточность в геометрических размерах деталей отражается на качестве сборки конструкций (например, сборка высотного каркаса из таких деталей создает различие в отметках дверных проемов выносных лестничных маршей, неровность поверхностей потолка из сборных плит и другие дефекты зданий); вызывает необходимость выполнения большого объема штукатурных и малярных работ непосредственно на строительстве. Практическая ценность быстрой сборки деталей из сборного железобетона при этом частично теряется, что особенно сказывается в холодный период, когда увеличиваются любые работы строительного производства, тем более отделочные. По этой причине дальнейшее развитие сборного железобетона нельзя отрывать от повышения качества и заводской готовности деталей, исключающих указанные или аналогичные дефекты при сборке и подгонке деталей, а также дополнительные и трудоемкие работы. Заводская готовность деталей непосредственно связана не только с совершенствованием технологических процессов, но и с улучшением возведения домов силами домостроительных комбинатов, т. е. монтажа деталей непосредственно с колес автомобилей.

§ 78. Охрана труда

Работы на строительстве и в цехах подсобных предприятий, в том числе и на складах сырья (каменных материалов, цемента, арматуры, готовой продукции), должны быть организованы так, чтобы не возникли несчастные случаи. Особенно серьезно надо относиться к выполнению такелажных работ, к работе с вибромеханизмами, резке и сварке арматуры, прогреву бетона, его распалубке.

Основные положения по технике безопасности в строительстве изложены в СНиП III-A.11—70. Администрация, технический персонал и рабочие предприятий должны быть хорошо знакомы с правилами ведения работ, иметь соответствующие удостоверения. Для совершенствования столь необходимых знаний по технике безопасности предприятиями организуется обучение. В указанном СНиПе в приложении 2 приведен перечень профессий рабочих, занятых на строительно-монтажных работах, к которым предъявляются повышенные требования по охране труда.

При организации работы заводов товарной смеси и сборного железобетона особое внимание должно уделяться вентиляции помещений, в том числе от пыли, пара и загрязняющих воздух испарений различных веществ. В СНиПе имеется специальный раздел по технике безопасности при приготовлении и транспортировании бетонной (растворной) смеси, в котором указаны условия, обеспечивающие безопасность работы со шнековыми и другими машинами, установками вентилей паропроводов, смонтированными в местах, легко доступных для подхода к ним, быстрого выключения острого пара, регулярного осмотра транспортеров, трубопроводов, кранов с бадьями, с помощью которых транспортируется бетонная растворная смесь, и их гидравлического испытания через каждые три месяца давлением, в 1,5 раза превышающим рабочее давление, ежедневного осмотра перед началом смены манометра на растворонасосах и ряда других указаний. Технологические разработки, в которых не предусматривается охрана труда работающих лиц, недопустимы к реализации. Также недопустимо проявление невнимания к указаниям правил по технике безопасности, что может в итоге повлечь за собой несчастный случай с любыми, даже самыми тяжелыми последствиями для людей.

§ 79. СНиП на производство сборного железобетона

Выпуск железобетонных деталей и требования к ним регламентируются СНиП III-B.3—62 * «Бетонные и железобетонные конструкции сборные. Правила производства и приемки монтажных работ». Монтаж сборных конструкций допускается лишь при полном их соответствии рабочим чертежам, проекту организации работ и соблюдении СНиП III-A.11—70 «Техника безопасности в строительстве». Важность производства монтажных работ вообще и, в частности, из железобетонных изделий потребовала выпуска в свет СНиП III-A.6—62 «Организационно-техническая подготовка к строительству. Основные положения».

ЛИТЕРАТУРА

1. Астреева О. М. Петрография вяжущих материалов. М., Госстройиздат, 1959.
2. Байков А. А. Труды в области вяжущих веществ и огнеупорных материалов. Собрание трудов. Т. V. М., Изд-во АН СССР, 1948.
3. Банн Ч. Кристаллы, их роль в природе и науке. М., «Мир», 1970.
4. Беликов Б. П. [и др.]. Упругие свойства породообразующих минералов и горных пород. М., «Наука», 1970.
5. Белянкин Д. С. [и др.]. Петрография технического камня. М., Изд-во АН СССР, 1952.
6. Богин Н. М. Повышение надежности процессов производства предварительно напряженных железобетонных конструкций. М., Стройиздат, 1969.
7. Болдырев А. С., Воронин П. А. Цементная промышленность Канады. М., Стройиздат, 1964.
8. Бутт Ю. М., Тимашев В. В. Портландцементный клинкер. М., Стройиздат, 1967.
9. Викторов А. М. Строительная петрография. М., «Высшая школа», 1968.
10. Викторов А. М. Стойкость карбонатного строительного камня. М., «Высшая школа», 1968.
11. Гольдштейн Б. Г., Петрунькин Л. П. Глубинные вибраторы для уплотнения бетона. М., «Машиностроение», 1966.
12. Горчаков Г. И. [и др.]. Повышение морозостойкости бетона в конструкциях промышленных и гидротехнических сооружений. М., Стройиздат, 1965.
13. Десов А. Е. Вибраторы для бетона. М., Машгиз, 1949.
14. Довжик О. И., Ратинов В. Б. Эффективные смазки для форм в производстве сборного железобетона. М., Стройиздат, 1966.
15. Дир У. А. [и др.]. Породообразующие минералы. М., «Мир», 1965.
16. Золотарский А. Ф. [и др.]. Железобетонные шпалы. М., Трансжелдориздат, 1959.
17. Залесский Б. В. Физико-механические свойства горных пород и их значение для геологической теории и практики. М., «Наука», 1964.
18. Зеличенко Г. Г. Автоматизация предприятий строительной индустрии. М., «Высшая школа», 1965.
19. Иванов Ф. М. Защита железобетонных транспортных сооружений от коррозии. М., «Транспорт», 1968.
20. Инструкция по производству бетонных работ в зимнее время с применением комплексной добавки нитрата кальция и мочевины (НКМ). М., ВНИИСТ, 1972.
21. Инструкция по проектированию. Признаки и нормы агрессивности водосреды для железобетонных и бетонных конструкций (СН 249—63). М., Госстройиздат, 1963.
22. Сборник (группа авторов). Канал Москва—Волга. Бетонные работы. Ответственный за выпуск С. В. Шестоперов. М., Госстройиздат, 1941.
23. Кашкаров К. П. Ударные методы и эффективность их применения для контроля прочности и однородности бетона в изделиях. М., Стройиздат, 1965.
24. Кинд В. В. Коррозия цемента и бетона в гидротехнических сооружениях. М., Госэнергоиздат, 1955.
25. Корнилович Ю. Н. Исследование прочности растворов и бетонов. Кисв, Госстройиздат УССР, 1960.
26. Кувыкин Б. А. Современные методы проектирования состава бетона. «Москва-Волгострой», 1934, № 1, 2.
27. Кудинов А. И. Приборы для технического контроля при производстве бетонных и железобетонных работ и сборных железобетонных конструкций. М., Госстройиздат, 1963.

28. Лахи Ф. Полевая геология. М., «Мир», 1966.
29. Лермит Р. Проблемы технологии бетона. М., Госстройиздат, 1959.
30. Лещинский М. Ю., Скрамтаев Б. Г. Испытание прочности бетона. М., Стройиздат, 1973.
31. Либерман Л. А. [и др.]. Стальная опалубка сборного железобетона. М., Стройиздат, 1968.
32. Ли Ф. М. Химия цемента и бетона. М., Госстройиздат, 1961.
33. Лодочников В. Н. Краткая петрология. М., Госгеолтехиздат, 1956.
34. Малюга И. Г. Составы и способы приготовления цементного раствора (бетона) для получения наибольшей крепости. СПб, 1895.
35. Марьямов Н. Б. Тепловая обработка изделий на заводах сборного железобетона (процессы и установки). М., Стройиздат, 1970.
36. Механическое оборудование для производства вяжущих строительных материалов. М., «Машиностроение», 1969.
37. Миклашевский П. М. Вибрирование бетонной смеси. Изд-во строительства Москва — Волгострой, 1937.
38. Миронов С. А. Теория и методы зимнего бетонирования. М., Госстройиздат, 1956.
39. Миронов С. А., Малинина Л. А. Ускорение твердения бетона. М., Стройиздат, 1964.
40. Михайлов В. В. Предварительно напряженные железобетонные конструкции. М., Стройиздат, 1963.
41. Могилевич В. М. Организация и технология дорожно-строительных работ в зимнее время. М., «Высшая школа», 1971.
42. Москвин В. М., Рояк Г. С. Коррозия бетона при действии щелочей цемента на кремнезем заполнителя. М., Стройиздат, 1962.
43. Некрасов В. В. Изменение объема системы при твердении гидравлических вяжущих. «Известия АН СССР», 1945, № 6.
44. Полосин-Никитин С. М. Механизация дорожных работ. М., «Транспорт», 1974.
45. Борщ И. М. [и др.]. Проектирование заводов сборного железобетона (технологические процессы). Киев, «Будівельник», 1968.
46. Применение мелких песков в бетоне и методы подбора состава бетона. Статьи и сообщения участников совещания по применению мелких песков. М., Стройиздат, 1961.
47. Ратинов В. Б., Иванов Ф. М. Химия в строительстве. М., Стройиздат, 1969.
48. Ребиндер П. А., Логинов Г. И. Физико-механические основы эффективности мокрого помола вяжущих материалов. Труды совещания ВНИТО строителей. «Вестник АН СССР», 1951, № 10, 47.
49. Рекомендации по приготовлению железобетонных изделий с применением электроразогрева бетонной смеси в заводских условиях. ВНИИЖелезобетон. М., Стройиздат, 1972.
50. Рекомендации по проведению пооперационного контроля качества при изготовлении и изготовленных бетонных и железобетонных изделий неразрушающими методами. М., Стройиздат, 1970.
51. Розанов Ю. А. О рациональном методе исследования морозостойкости каменных горных пород. Труды института геологических наук АН СССР. Вып. 13, М., Изд-во АН СССР, 1958.
52. Рояк С. М., Рояк Г. С. Специальные цементы. М., Стройиздат, 1969.
53. Руководство по укладке бетонной смеси с применением вибраторов. М., Дориздат, 1950.
54. Состояние и перспективы развития бетона и железобетона. Тезисы докладов. VII Всесоюзная конференция по бетону и железобетону. М., Стройиздат, 1972.
55. Справочник физических констант горных пород. М., «Мир», 1969.
56. Татаринов П. М. [и др.]. Курс нерудных месторождений. Часть вторая. Л. — М., Главная редакция геологоразведочной и геодезической литературы, 1935.

57. Технологические правила производства бетонных работ при возведении гидротехнических сооружений. ВСН 009—67, МЭиЭ СССР. Л., «Энергия», 1968.
58. Бутт Ю. М. [и др.]. Технология вяжущих веществ. М., «Высшая школа», 1965.
59. Токарев П. Я. Связь реакционной способности заполнителей для бетона с генетическими и петрохимическими особенностями горных пород. Тольятти, ВНИИНефуд, 1972.
60. Указания по применению бетона с добавкой концентратов сульфитно-дрожжевой бражки. СН 466—70. Госстрой СССР, М., Стройиздат, 1970.
61. Феднер Л. А. Многократное повторное вибрирование бетонной смеси в процессе выдержки перед пропариванием. Вып. 31. М., Труды МАДИ, 1971.
62. Френкель И. М. Основы технологии тяжелого бетона. М., Стройиздат, 1966.
63. Физико-механические свойства горных пород. Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии АН СССР. М., «Наука», 1964.
64. Шестоперов С. В. [и др.]. Цементный бетон в дорожном строительстве. М., Дориздат, 1950.
65. Шестоперов С. В. [и др.]. Цементный бетон с пластифицирующими добавками. М., Дориздат, 1952.
66. Шестоперов С. В. Типовые составы бетона. «Москва — Волгострой», 1935, № 7.
67. Шестоперов С. В., Защепин А. Н. Новые исследования в области цементного бетона. М., Дориздат, 1949.
68. Шестоперов С. В. О повышении выхода бетона из цемента. «За экономию материалов», 1952, № 3.
69. Шестоперов С. В., Любимова Т. Ю. Зависимость механических свойств мономинерального вяжущего — трехкальциевого алюмината от влажности образцов. Доклады АН СССР. Т. 86, № 6. М., Изд-во АН СССР, 1952.
70. Шестоперов С. В. Долговечность бетона. М., Автотрансиздат, 1955.
71. Шестоперов С. В. К вопросу производства быстротвердеющих, долговечных и эффективных бетонов для сборных железобетонных конструкций. «Бетон и железобетон», 1958, № 10.
72. Шестоперов С. В. Долговечность бетона. М., Автотрансиздат, 1960.
73. Шестоперов С. В. Высокие марки цемента и их применение в строительстве. Сборник «Химия и технология некоторых специальных видов цемента». Издание Красноярского краевого правления ВХО им. Д. И. Менделеева, 1963.
74. Шестоперов С. В. Долговечность бетона транспортных сооружений. М., «Транспорт», 1976.
75. Шестоперов С. В. Новые представления по проблеме долговечности бетонов. Материалы конференции «Проблемы прогрессивной технологии строительных материалов». Издание Красноярского краевого правления ВХО им. Д. И. Менделеева, СибНИИцемента и Красноярского Политехнического института, 1965.
76. Шестоперов С. В. Дорожно-строительные материалы. М., «Высшая школа», 1969 и 1976.
77. Шестоперов С. В. Контроль качества бетона транспортных сооружений. М., «Транспорт», 1969.
78. Шехтер А. Б. [и др.]. Электронно-микроскопическое исследование влияния поверхностно-активной добавки на кристаллизацию гидратов минералов цементного клинкера. Доклады АН СССР. Т. 89, № 1, М., Изд-во АН СССР, 1953.
79. Химия цементов. Под ред. Х. У. Тейлора. М., Стройиздат, 1969.
80. Юнг В. Н. Основы технологии вяжущих веществ. М., Промстройиздат, 1951.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Стр.

Введение	3
<i>Раздел первый. Материалы для приготовления бетона</i>	
<i>Глава I. Вяжущие материалы</i>	8
§ 1. Общие сведения	8
§ 2. Краткая характеристика технологии производства вяжущих материалов	9
§ 3. Химические составы вяжущих материалов	12
§ 4. Минералогические составы вяжущих материалов	13
§ 5. Активные минеральные или гидравлические добавки	20
§ 6. Гранулированные доменные шлаки	22
§ 7. Мелкокомолотые минеральные добавки	24
§ 8. Процессы взаимодействия вяжущих с водой	26
§ 9. Нормальная густота и сроки схватывания цементного теста. Равномерность изменения объема	38
§ 10. Марка и активность цемента	41
§ 11. Микробетон Юнга и контракция цементов	47
§ 12. Методы испытания цементов	50
§ 13. Портландцемент и цементы на его основе	55
§ 14. Глиноземистый цемент и цементы на его основе	70
§ 15. Тампонажные цементы	81
§ 16. Белые и цветные цементы	83
§ 17. ГОСТы и СНИПы на вяжущие материалы	86
<i>Глава II. Вода для затворения бетонной (растворной) смеси и вода-среда</i>	96
§ 18. Вода для затворения смеси	96
§ 19. Вода-среда	99
<i>Глава III. Песок — мелкий заполнитель</i>	102
§ 20. Пределы содержания песка в бетоне	102
§ 21. Минералогические составы песка	113
<i>Глава IV. Гравий (щебень) — крупный заполнитель</i>	117
§ 22. Пределы содержания гравия (щебня) в бетоне	117
§ 23. Гравийно-песчаная смесь и гравий	117
§ 24. Щебень	119
§ 25. Генезис гравийно-песчаных материалов	121
§ 26. Петрографический состав гравия (щебня)	125
§ 27. Форма и поверхность зерен гравия (щебня)	132
§ 28. Зерновой состав гравия (щебня)	135
§ 29. Фракционирование гравия (щебня)	145
§ 30. Влияние крупного заполнителя на водонепроницаемость и сцепление бетона с цементным камнем	152
§ 31. Влияние прочности крупного заполнителя на прочность бетона	155
§ 32. Влияние морозостойкости крупного заполнителя на морозостойкость бетона	159
§ 33. Влияние реакционной способности крупного заполнителя на технические свойства бетона	167
§ 34. ГОСТы и СНИПы на крупный заполнитель	172

Глава V. Арматурная сталь	177
§ 35. Арматура и ее виды	177
§ 36. Поставка, приемка и контроль качества арматурной стали	180
Раздел второй. Бетон (раствор) — искусственный каменный материал	183
Глава VI. Проектирование бетона (раствора)	183
§ 37. Бетонная смесь и бетон	183
§ 38. Проектирование бетонной смеси и бетона	184
§ 39. Определение параметров, учитывающих условия работы бетона	187
§ 40. Определение параметров, учитывающих условия производства работ	189
§ 41. Зональность бетона в конструкциях. Методы подбора и расчет состава бетона	192
Глава VII. Бетонная (растворная) смесь	203
§ 42. Технологические пределы	203
§ 43. Роль гипса в процессе загустевания смесей и твердения портландцемента и цементов на его основе	209
§ 44. Управление процессом формирования свойств бетонной смеси	221
§ 45. Регулирование сроков схватывания цемента	224
§ 46. Поверхностно-активные вещества	236
§ 47. Электролиты	245
§ 48. Формуемость бетонной смеси	248
§ 49. Этапы контроля качества бетонной смеси	250
§ 50. Свежесть цемента, выраженная показателем потепл. при прокаливании	251
§ 51. ГОСТы и СНИПы на бетонную смесь	259
Глава VIII. Бетон (раствор)	260
§ 52. Классификация бетона	260
§ 53. Комплексная марка бетона	262
§ 54. Прочность бетона	265
§ 55. Технические свойства бетона	280
§ 56. Определение количества воды в бетоне	282
Глава IX. Твердение бетона (раствора)	284
§ 57. Сущность процесса твердения бетона	284
§ 58. Влияние влажности воздуха на процессы твердения бетона	291
§ 59. Температурный фактор в твердении бетонов	300
§ 60. Твердение бетона при отрицательных температурах	324
Глава X. Разрушение бетона (раствора)	336
§ 61. Влияние агрессивной среды на состояние бетона	336
§ 62. Разрушение бетона в водной среде	337
§ 63. Разрушение бетона в воздушных средах при стабильных и переменных температурах	345
§ 64. Разрушение бетона при переменном воздействии воды и отрицательных температур	346
Глава XI. Строительно-технические свойства бетона (раствора)	363
§ 65. Свойства бетона и их взаимосвязь	363
§ 66. Марки бетона по прочности, морозостойкости, водонепроницаемости, химической стойкости	365
§ 67. ГОСТы и СНИПы на бетоны	367

Раздел третий. Технология бетонных работ

Глава XII. Приготовление, транспортирование, укладка и уплотнение бетонной (растворной) смеси	369
§ 68. Приготовление бетонной смеси	369
§ 69. Транспортирование бетонной смеси	372
§ 70. Укладка и распределение бетонной смеси	377
§ 71. Различные приемы уплотнения бетонной смеси	381
§ 72. Повторное многократное вибрирование бетонной смеси	388
§ 73. СНиП на технологию производства бетонных работ	395
Глава XIII. Изготовление сборных железобетонных конструкций	398
§ 74. Виды сборного железобетона и область его применения	398
§ 75. Технологические пределы при изготовлении сборного железобетона и оборудование заводов	409
§ 76. Приготовление бетонной смеси с применением мокрого помола клинкера	419
§ 77. Отпускная прочность и заводская готовность элементов и деталей из железобетона	424
§ 78. Охрана труда	426
§ 79. СНиП на производство сборного железобетона	426
Литература	427

*Сергей Владимирович
Шестоперов*

ТЕХНОЛОГИЯ БЕТОНА

Редактор В. Г. Чванов. Редактор издательства Н. Н. Попова.
Художник Ф. И. Гальцев. Худож. редактор Т. А. Дурасова. Техн.
редактор Э. М. Чижевский. Корректор Р. К. Косинова

ИБ № 656

Т—03118 Сдано в набор 14/VII—76 г. Подп. к печати 10/II—77 г.
Формат 60×90^{1/16} Бум. тип. № 1. Объем 27 печ. л. Усл. п. л. 27
Уч.-изд. л. 31,47 Изд. № СТР-272 Тираж 25.000 экз. Цена 1 р. 40 к. Зак. № 1118
План выпуска литературы издательства
«Высшая школа» (вузы и техникумы) на 1977 г. Позиция № 134
Издательство «Высшая школа»,
Москва, К-51, Неглинная ул., д. 29/14,
Московская типография № 8 Союзполиграфпрома
при Государственном комитете Совета Министров СССР
по делам издательств, полиграфии и книжной торговли,
Хохловский пер., 7.