НИИЖБ Госстроя СССР

Руководство

по подбору составов тяжелого бетона



Москва 1979

gost.e-ecolog.ru

НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ
БЕТОНА И ЖЕЛЕЗОБЕТОНА
ГОССТРОЯ СССР
(НИИЖБ)

РУКОВОДСТВО
ПО ПОДБОРУ СОСТАВОВ ТЯЖЕЛОГО БЕТОНА

МОСКВА СТРОЙИЗДАТ 1979

УДК 666.972.7.031.1

Рекомендовано к изданию решением секции заводской технологии бетона и железобетона НТС НИИЖБ Госстроя СССР.

Руководство по подбору составов тяжелого бетона/НИИ бетона и железобетона Госстроя СССР. — М.: Стройиздат, 1979. — 103 с.

Руководство содержит основные положения и рекомендации по подбору составов тяжелого бетона различного назначения как для изготовления сборных конструкций, так и для монолитного строительства.

Изложены требования к материалам, приведены справочные данные о предельных значениях водоцементного отношения и расхода цемента, даны вспомогательные таблицы, графики и номограммы. Приведены четыре метода и даны примеры подбора составов бетона и их корректирования.

Предназначено для инженерно-технических работников заводов железобетонных изделий, строительных и проектных организаций.

Табл. 47, рис. 14.

Р $\frac{30213-437}{047(01)-79}$ Инструкт.-нормат., I вып. — 46—79. 3203000000

© Стройиздат, 1979

ПРЕДИСЛОВИЕ

Настоящее Руководство составлено к пп. 4.10 и 4.11 главы СНиП III-15-76 «Бетонные и железобетонные конструкции монолитные» и содержит рекомендации по выбору материалов и подбору составов тяжелого бетона различных назначения и марок, включая высокопрочный, особотяжелый и напрягающий, по прочности, самонапряжению, морозостойкости, долговечности и подвижности бетонной смеси.

В Руководстве приведены четыре метода (в том числе ускоренный метод оценки активности цемента в бетоне и назначение его состава, а также математико-статистический метод), позволяющие решить задачу подбора рационального состава бетона для заводов сборного железобетона и монолитного строительства как при наличии подробных данных о составляющих материалах, так и при отсутствии их, в частности при отсутствии сведений об активности цемента.

Использование одного из изложенных методов позволяет подобрать состав бетона для проверки его опытным затворением с последующей корректировкой подвижности смеси, содержания песка, прочности и других свойств бетона. Четвертый метод подбора состава бетона с применением математико-статистических методов применяется для решения задачи подбора ряда составов бетонов нескольких марок по прочности, морозостойкости, водонепроницаемости и др. при различной подвижности смеси.

Настоящее Руководство разработано НИИЖБ Госстроя СССР (д-р техн. наук *Л. А. Малинина*, кандидаты техн. наук *В. М. Медведев* и *В. П. Сизов* при участии д-ра техн. наук, проф. *В. В. Михайлова*, кандидатов техн. наук *М. И. Бруссера, И. М. Красного, А. В. Лагойды, О. Е. Королевой, С. Л. Литвера, Э. Г. Соркина, В. П. Петрова, В. Г. Довжика, Л. И. Будогянца*, инженеров *В. Ф. Хардиной* и *В. А. Загурского*).

В Руководстве использованы материалы НИИЖБ Госстроя СССР (доктора техн. наук *С. А. Миронов* и *И. М. Френкель*), МИСИ им. В. В. Куйбышева Министерства высшего и среднего образования СССР (доктора техн. наук, профессора *Ю. М. Баженов* и *Г. И. Горчаков*, кандидаты техн. наук *Л. А. Алимов* и *В. В. Воронин*), Союздорнии Минтрансстроя СССР (канд. техн. наук *А. М. Шейнин*), ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева Минэнерго СССР (кандидаты техн. наук *Ц. Г. Гинзбург* и *В. Б. Судаков*).

Все замечания и пожелания просьба направлять по адресу: 109389, Москва, 2-я Институтская, д. 6, НИИЖБ.

1. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

1.1. Руководство устанавливает порядок выбора материалов (составляющих) для бетона и методы подбора составов тяжелого бетона различных марок по прочности на сжатие, водонепроницаемости, морозостойкости и другим свойствам бетонов, приготовляемых на цементах различных видов и марок и тяжелых заполнителях, применяемых для изготовления сборных конструкций и возведения монолитных сооружений.

1.2. Методика, изложенная в Руководстве, обеспечивает получение бетонной смеси требуемой подвижности или жесткости и бетона с заданными свойствами.

1.3. Подбор составов бетона производится с учетом исходных данных раздела 3 настоящего Руководства одним из трех методов:

а) расчетно-экспериментальным — по формулам и графикам или таблицам, когда имеются данные об активности цемента и качестве заполнителей (раздел 4);

б) ускоренным, когда отсутствуют данные об активности цемента и качестве заполнителей (раздел 5);

в) по таблицам, графикам и номограммам, когда имеются подробные данные по качеству составляющих бетон материалов (раздел 6).

Три метода позволяют решить задачу по подбору номинального (лабораторного) состава бетона для пробных замесов на сухих материалах.

1.4. Подобранные (расчетные) составы бетона корректируются на опытных замесах по подвижности смеси и оптимальному количеству песка в смеси заполнителей, проверяются на прочность и другие свойства бетона в соответствии с техническим заданием и после уточнения их передаются на производство.

1.5. Производственные составы бетона рассчитываются с учетом фактической влажности заполнителей, применяемых при приготовлении бетона, путем корректировки количества воды затворения и влажных заполнителей.

1.6. В разделе 9 изложены принципы подбора и корректирования состава бетонов с применением математико-статистических методов, позволяющих решить задачу подбора составов бетонов ряда марок по прочности, морозостойкости, водонепроницаемости и др. при различной подвижности (жесткости) смесей.

1.7. Составы особых видов бетонов должны подбираться с учетом рекомендаций, приведенных в прил. 2 настоящего Руководства.

2. ТРЕБОВАНИЯ К МАТЕРИАЛАМ ДЛЯ ПРИГОТОВЛЕНИЯ БЕТОНА

2.1. Материалы для приготовления бетона должны отвечать всем требованиям, изложенным в государственных и отраслевых стандартах на эти материалы.

При несоответствии отдельных составляющих бетон материалов требованиям ГОСТ и ТУ необходимо провести их испытание в бетонах и дать технико-экономические обоснования целесообразности их применения.

ЦЕМЕНТ

2.2. Виды и марки цемента должны отвечать требованиям ГОСТ 10178—76 и ГОСТ 22266—76.

Рациональные марки цементов для бетона различных марок приведены в табл. 1.

Выбор вида цемента для различных условий работы конструкций рекомендуется принимать по табл. 2.

2.3. Для бетонов низких марок при наличии цементов высокой активности следует применять добавки золы-уноса ТЭЦ, молотого кислого граншлака, активные минеральные добавки естественного происхождения, добавки природного мелкозернистого маршаллита или молотого песка.

2.4. Во всех случаях следует применять отдельные или комплексные добавки поверхностно-активных веществ, позволяющие повысить подвижность бетонных смесей, экономить цемент и улучшить структурные свойства затвердевшего бетона, его коррозионную стойкость и морозостойкость.

Выбор и назначение добавок рекомендуется производить по табл. 3. Снижение водопотребности бетона при введении добавки СДБ приведено в табл. 4.

ПЕСОК

2.5. Песок для бетона должен отвечать требованиям ГОСТ 8736—77; ГОСТ 10268—70* и дополнительным требованиям ГОСТ 17539—72, ГОСТ 8424—72*, ГОСТ 4797—69*, а также главы СНиП III-15-76.

2.6. Помимо природных песков, удовлетворяющих требованиям указанных ГОСТов, допускается после соответствующих испытаний, технико-экономических обоснований и согласования с вышестоящей организацией применять более мелкие пески, отсев каменной мелочи, получаемой от дробления породы на щебень, мелкозернистые отходы промышленности: золошлаковую смесь из отвалов тепловых электростанций, дробленый шлак, удаляемый из топок котлов после гидравлической обработки, и др.

На основе золошлаковой смеси из отвалов ТЭЦ взамен песка и щебня может быть получен мелкозернистый бетон марок М 400—М 500.

КРУПНЫЙ ЗАПОЛНИТЕЛЬ

2.7. В качестве крупного заполнителя в бетоне могут быть использованы материалы как естественного, так и искусственного происхождения.

2.8. Крупный заполнитель для бетона должен отвечать требованиям ГОСТ 8267—75, ГОСТ 10260—74*, ГОСТ 8268—74*, ГОСТ 10268—70* и дополнительным требованиям ГОСТ 17539—72, ГОСТ 5578—76, ГОСТ 8424—72*, ГОСТ 4797—69*.

2.9. Допускается также применение промышленных отходов и хвостов, получаемых при переработке и обогащении руд черных и цветных металлов, асбеста, различных флюсов, шлаков и др., после проведения испытаний и технико-экономических обоснований.

2.10. Не допускается применять щебень из осадочных пород с примесью мергеля или аморфного кремнезема, разрушающихся при воздействии атмосферных агентов или щелочей, содержащихся в цементе.

Таблица 1

Марка бетона	М 150	М 200	М 250	М 300	М 350	М 400	М 450	М 500	М 600 и выше
Марка цемента по ГОСТ 10178—76	М 300	М 300—М 400	М 300—М 400	М 400—М 500	М 400—М 500	М 500—М 600	М 500—М 600	М 500—М 600	М 600

Примечание. При необходимости применения цемента высокой активности для бетонов низких марок по прочности следует применять добавки: молотого доменного гранулированного шлака, золы-уноса тепловых электростанций или активные минеральные добавки естественного происхождения.

Таблица 2

Условия работы конструкций	Вид цемента						
	портландцемент	портландцемент с минеральными добавками	шлакопортландцемент	сульфатостойкий портландцемент[1]	сульфатостойкий портландцемент с минеральными добавками	сульфатостойкий шлакопортландцемент	пуццолановый портландцемент
Внутри зданий с относительной влажностью воздуха:							
до 60%	Р / Р[2]	Р	Р / Р[3]	Д	Д	Д	Н
более 60%	Р / Р	Р	Р / Р	Д	Д	Д	Д
На открытом воздухе (при воздействии атмосферных условий)	Р / Р	Р	Д[3]	Д	Д	Д[3]	Н
При воздействии сред, агрессивных по содержанию сульфатов	Н / Н	Н	Д[3] / Д	Р	Р	Р	Р
То же, при одновременном систематическом попеременном замораживании и оттаивании или увлажнении и высыхании	Н / Н	Н	Д[3] / Д	Р	Д	Д[4]	Н
При действии сред, агрессивных по содержанию сульфатов, при необходимости обеспечения пониженного тепловыделения	Н / Н	Д	Р / Д	Р	Д	Р	Р
В подземных и гидротехнических (и внутри массивных) сооружениях	Д / Н	Д	Д / Н	Н	Н	Н	Р
В зоне переменного действия воды и мороза (гидросооружений, облицовки каналов, открытых емкостей)	Д / Н	Н	Н / Н	Р	Д	Н	Н

[1] Сульфатостойкие цементы ввиду их дефицитности следует применять с ограничением только там, где они действительно необходимы.

[2] Под чертой приведены данные для быстротвердеющего портландцемента и шлакопортландцемента.

[3] Применение шлакопортландцементов для бетонов, к которым предъявляются требования по морозостойкости, допускается при введении порообразующих добавок.

[4] При работе в условиях пониженных положительных температур необходимо учитывать рост прочности особенно при применении шлакопортландцемента и пуццоланового портландцемента, а в сухую и жаркую погоду особенно в южных районах страны необходимо обеспечить тщательный уход за свежеуложенным и твердеющим бетоном.

Примечание. В таблице даны следующие обозначения: Р — рекомендуется; Д — допускается; Н — не допускается.

Таблица 3

Добавка	Количество добавки от массы цемента в расчете на сухое вещество, %	Цель применения
СДБ (пластифицирующая)	0,1—0,25—0,5	Для улучшения подвижности смеси и качества бетона, экономии цемента, замедления загустевания смеси и продления времени перекрытия слоев при укладке
СНВ (воздухововлекающая)	0,01—0,025	Для повышения морозостойкости бетона
$М_1$, АМН (пластифицирующие и воздухововлекающие)	0,05—0,2	То же
ГКЖ-94 (микрогазообразующая)	0,04—0,1	»
СДБ+СНВ (комплексная пластифицирующая и воздухововлекающая)	0,2+0,02	Для улучшения подвижности смеси и повышения морозостойкости бетона

Примечания: 1. При применении пластифицированного цемента допускается вводить воздухововлекающую добавку СНВ в количестве до 0,02% массы цемента.

2. При применении гидрофобного цемента допускается вводить пластифицирующую добавку в количестве до 0,2%.

3. Более подробные данные приведены в «Рекомендациях по применению химических добавок в бетоне» (М., Стройиздат, 1977).

Таблица 4

Подвижность смеси *ОК*, см	Жесткость смеси *Ж*, с		Снижение водопотребности бетонной смеси, %, при расходе цемента, кг/м³		
	по техническому вискозиметру	по ГОСТ 10181—76	300	400	500
—	30—100	8—25	—	6	8
0—2	20—30	5—8	6	8	10
2—5	10—20	3—5	7	9	11
5—7	—	—	8	10	12
10—12	—	—	9	11	13
12—15	—	—	10	12	14
16—20	—	—	10	12	15

2.11. Не допускается применять природную гравийно-песчаную смесь без ее рассева на песок и гравий, а также гравий, содержащий в своем составе зерна глинистого сланца, легкоразрушающиеся при насыщении их водой и замораживании.

2.12. Наибольшая крупность щебня и гравия должна приниматься в соответствии с указаниями главы СНиП III-15-76. Заполнители для особо тяжелых бетонов приведены в прил. 2 настоящего Руководства.

ДОБАВКИ МИНЕРАЛЬНЫЕ, УСКОРИТЕЛИ ТВЕРДЕНИЯ И ПРОТИВОМОРОЗНЫЕ

2.13. Добавки, улучшающие свойства бетонной смеси и структуру затвердевшего бетона, дающие экономию цемента или ускоряющие твердение, должны применяться в соответствии с указаниями главы СНиП I-В.2-69 «Вяжущие материалы неорганические и добавки для бетонов и растворов», а также «Руководства по применению химических добавок к бетону» (М., Стройиздат, 1975) и «Рекомендаций по применению химических добавок в бетоне» (М., Стройиздат, 1977).

ВОДА ДЛЯ ЗАТВОРЕНИЯ И ПОЛИВКИ БЕТОНА

2.14. Для приготовления бетонной смеси и поливки бетона в процессе твердения допускается применять любую воду (из хозяйственного водопровода, рек или естественных водоемов), имеющую водородный показатель pH не менее 4 и содержащую минеральные соли не более 5000 мг/л, в том числе не более 2700 мг/л сульфатов (в пересчете на SO_4'').

2.15. Не разрешается применять болотные и сточные (бытовые и промышленные) воды без их очистки.

2.16. Допускается применение оборотной воды и конденсата из камер пропаривания при содержании в них остатков смазки не более 0,1% по массе (после проверки в бетоне).

2.17. Морскую воду с содержанием солей не более 3,4% разрешается применять для изготовления бетонной смеси и поливки бетона массивных неармированных конструкций в тех случаях, когда может быть допущено появление высолов на их поверхности.

3. ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ ДЛЯ РАСЧЕТА И ПОДБОРА СОСТАВА БЕТОНА

3.1. Задание на расчет (проектирование) и подбор состава бетона дается в проекте сооружения, в проекте организации работ или нормативных документах и должно содержать следующие данные:

а) проектную марку бетона к определенному возрасту, требуемую долю марочной прочности к заданному сроку (распалубочную, передаточную прочности), устанавливаемые по ГОСТ 10180—74, а также марки по водонепроницаемости (В), морозостойкости (Мрз), истираемости, коррозионной стойкости и др. с указанием срока достижения требуемых свойств или ограничения значения $В/Ц$;

б) подвижность (см) или жесткость (с), определяемые по ГОСТ 10181—76;

в) вид и наибольшую крупность заполнителя, число и размеры фракций, на которые будет разделяться заполнитель при приготовлении бетонной смеси;

г) вид и марку цемента при испытании по ГОСТ 310.4—76.

Таблица 5а

При воздействии морской и пресной воды

Условия службы бетона	*В/Ц* для бетона железобетонных конструкций (немассивных)		*В/Ц* для наружной зоны массивных гравитационных сооружений	
	в морской воде	в пресной воде	в морской воде	в пресной воде
В зоне переменного горизонта воды при климатических условиях:				
особо суровых	0,42	0,47	0,45	0,48
суровых	0,45	0,5	0,47	0,52
умеренных	0,5	0,55	0,55	0,56
В частях сооружений, постоянно находящихся под водой:				
напорных	0,55	0,58	0,56	0,58
безнапорных	0,6	0,62	0,62	0,62
Во внутренних зонах сооружений	Принимается из условий обеспечения водонепроницаемости, прочности, ограничения тепловыделения, изменения объема, но не выше 0,75			

Таблица 5б

При воздействии жидких агрессивных сред

Среда и характеристика плотности	Марка по водонепроницаемости	Предельное *В/Ц*
При воздействии жидких агрессивных сред на конструкции гидротехнических сооружений и промышленных зданий и сооружений в соответствии с требованиями ГОСТ 4795—68 и главы СНиП II-28-73 для бетонов:		
нормальной плотности	В-2	$В/Ц \leqslant 0,7$
	В-4	$В/Ц \leqslant 0,6$
повышенной плотности	В-6	$В/Ц \leqslant 0,55$
особоплотных	В-8	$В/Ц \leqslant 0,45$
	В-12	$В/Ц \leqslant 0,4$

Примечание. При укладке бетона в изделия методами ударной технологии марка бетона по водонепроницаемости при указанных *В/Ц* повышается на одну ступень.

3.2. Ограничения *В/Ц* для бетона, применяемого в различных условиях, приведены в табл. 5, «а» — «в».

3.3. Наибольшая крупность заполнителей в зависимости от видов бетонируемых элементов и способов подачи смеси к месту укладки назначается по табл. 6.

Таблица 5в

При переменном действии воды и мороза

Марка бетона по морозостойкости (Мрз), циклы	*В/Ц*, не более
100	0,6
200	0,55
300	0,5
400	0,45
500	0,4

Примечание. Для повышения морозостойкости бетона рекомендуется применять добавки СДБ, СНВ, ГКЖ-10, 11 и 94, эмульбит, комплексную СДБ+СНВ и др. по специальным рекомендациям.

Таблица 6

Вид конструкций и способ укладки бетонной смеси	Допускаемая *НКЩ*
Плиты покрытий, перекрытий	Не более $^1/_2$ толщины плиты
Балки, колонны, рамы	Не более $^3/_4$ наименьшего расстояния между стержнями арматуры
Укладка бетонной смеси в скользящую опалубку	Не более $^1/_6$ наименьшего размера поперечного сечения конструкции
Подача бетонной смеси по хоботам и бетононасосами	Не более $^1/_3$ диаметра и при содержании лещадки не более 15%

3.4. Соотношение фракций крупного заполнителя в смеси принимается по табл. 7.

Таблица 7

НКЩ, мм	Соотношения между фракциями, %, при размере фракций, мм				
	5—10	10—20	20—40	40—80	80—120
10	100	—	—	—	—
20	35	65	—	—	—
40	45—60		40—55	—	—
80	25—35		25—35	30—50	—
120	15—25		15—25	25—35	15—45

Примечания: 1. При необходимости зерновой состав смеси крупного заполнителя уточняется экспериментально по наибольшей плотности и объемной насыпной массе с учетом местных технико-экономических возможностей.

2. Для бетона марки до М 300 рекомендуется (см. ГОСТ 8267—75) рядовой крупный заполнитель (гравий, карбонатный щебень и др.); для марки М 400 — улучшенный крупный заполнитель (мытые щебень, щебень из гравия, гравий); для марок М 500—М 600 — высококачественный крупный заполнитель (гранитный и базальтовый щебень, щебень из плотного известняка, доломита и песчаника после опытной проверки); для марки М 600 и выше — особовысококачественный щебень из незатронутых выветриванием прочных изверженных пород с шероховатой поверхностью излома при дроблении (мелкокристаллические граниты и др.).

3.5. Подвижность и жесткость бетонной смеси устанавливаются по табл. 8 и уточняются в проектах организации работ (в зависимости от характера и размеров конструкций, степени армирования, способа транспортирования, уплотнения смеси) в соответствии с требованиями ГОСТ 4795—68, ГОСТ 8424—72*, ГОСТ 7473—76, главы СНиП III-15-76 и СН 386-74.

3.6. Количество вовлеченного воздуха по объему уплотненной смеси должно быть в пределах величин, приведенных в табл. 9.

3.7. Предел капиллярной пористости морозостойкого бетона должен быть не более значений, указанных в табл. 10.

3.8. Минимально допустимые количества цемента в бетонах в зависимости от условий работы конструкций и подвижности смеси приведены в табл. 11 и 12.

РОСТ ПРОЧНОСТИ БЕТОНА ВО ВРЕМЕНИ

3.9. При возведении сооружений, воспринимающих расчетную нагрузку в возрасте более 28 сут (который обычно принимают при подборе состава бетона), например 90 или 180 сут, следует учитывать рост прочности бетона к этим срокам, что дает экономию цемента.

3.10. Рост прочности бетона во времени зависит от минералогического состава клинкера, вещественного состава цемента, *В/Ц* и условий выдерживания бетона.

В табл. 13 приведены осредненные значения коэффициентов прироста прочности бетонов на цементах различных типов, твердеющих на открытом воздухе при положительных температурах в возрасте 90 и 180 сут. При низких положительных температурах рост прочности бетона замедляется, что необходимо учитывать при загрузке конструкций.

3.11. Расход воды при подборе состава бетона рекомендуется принимать в зависимости от подвижности смеси, вида и крупности заполнителя по табл. 14.

Таблица 8

Конструкции	Способ укладки бетонной смеси			
	с вибрацией			без вибрации
		Ж,с		
	ОК, см	по ГОСТ 10181—62	по ГОСТ 10181—76	ОК, см
Сборные железобетонные на жестких смесях с немедленной распалубкой	0	90—35	20—10	—
Подготовка под фундаменты и полы, дорожные и аэродромные покрытия	1—2	35—25	10—6	2—3
Массивные неармированные и с редко расположенной арматурой	2—4	25—15	6—4	3—6
Каркасные железобетонные (плиты, балки, колонны)	4—8	15—10	4 и менее	6—12
Железобетонные с густо расположенной арматурой (бункера, силосы и др.)	8—10	10—5	Менее 2	12—15
Кассеты и элементы для объемно-сборного домостроения	12—18	—	—	—
Буронабивные сваи, шахтные стволы	16—20	—	—	—
Конструкции, сильно насыщенные арматурой и закладными деталями (стены АЭС, швы, штрабы, пазухи и т. п.), препятствующими укладке пластичных смесей с вибрированием	20—24	—	—	—

Таблица 9

Вид сооружений	Количество вовлеченного воздуха, % по объему	
	допускаемое	требуемое
Гидротехнические при *НКЩ*, мм:		
40	Не более 5	—
80	» » 4	—
120	» » 3	—
Дорожные однослойные и верхний слой двухслойных покрытий	—	5—6
Нижний слой двухслойных покрытий	—	3,5—4,5

Таблица 10

Марка бетона по морозостойкости (Мрз), циклы	Капиллярная пористость бетона, %			
	нормального твердения		пропаренного	
	ССПЦ	БТЦ	ССПЦ	БТЦ
100	6,2	5,2	5,2	4,2
200	4,7	4	3,5	2,5
300	4	3	2,5	2,5
500	2	—	2	—

Примечание. Отношение контракционной пористости к капиллярной должно быть не менее 0,25.

Таблица 11

Условия работы конструкций	Расход цемента, кг/м³, при уплотнении	
	вибрацией	без вибрации
Бетон, находящийся в соприкосновении с водой, подверженный частому замерзанию и оттаиванию	240	265
Бетон, не защищенный от атмосферных воздействий	220	250
Бетон, защищенный от атмосферных воздействий	200	220

Таблица 12

Бетонная смесь	$\frac{Ж, с}{ОК, см}$	Расход цемента кг/м³, при НКЩ, мм			
		10	20	40	70
Особо жесткая	$\frac{12}{—}$	160	150	140	130
Жесткая	$\frac{5—12}{—}$	180	160	150	140
Малоподвижная	$\frac{—}{2—4}$	200	180	160	150

Продолжение табл. 1

Бетонная смесь	$\frac{Ж, с}{ОК, см}$	Расход цемента, кг/м³, при НКЩ, мм			
		10	20	40	70
Подвижная	$\frac{—}{4—12}$	220	200	180	160
Литая	$\frac{—}{12 \text{ и более}}$	250	220	200	180

Таблица 13

Тип цемента	Вид и минералогический состав цемента	Значения коэффициента K по отношению к R_{28} в возрасте, сут	
		90	180
I	Алюминатный портландцемент ($C_3A \geqslant 12\%$)	1,05	1,1
II	Алитовый портландцемент ($C_3S > 50\%$; $C_3A \leqslant 8\%$)	1,05	1,1
III	Пуццолановый портландцемент, шлакопортландцемент с содержанием шлака до 40%	1,05	1,25
IV	Белитовый портландцемент и шлакопортландцемент с содержанием шлака более 50%	1,1	1,3

Примечания: 1. Усредненные значения K для 90 и 180 сут принимаются соответственно 1,2 и 1,3.

2. Значения K могут устанавливаться по формуле $R_n = R_{28} \frac{\lg n}{\lg 28}$ (где n — возраст бетона, сут). Полученными данными можно пользоваться для ориентировочных расчетов, так как формула справедлива только при твердении бетона в нормальных условиях.

3. Расчетная прочность при подборе состава бетона принимается для бетона каркасных конструкций на обычном портландцементе (I—II типа) марки 300 при загружении в возрасте 90 сут:

$$R_{28} = \frac{300}{1{,}05} = 286 \text{ кгс/см}^2.$$

4. То же, для массивных конструкций, загружаемых в возрасте 180 сут: $R_{28} = \frac{300}{1{,}3} = 230$ кгс/см².

Таблица 14

ОК, см	Ж, с, по ГОСТ 10181—76	Расход воды, л/м³, при крупности гравия и щебня, мм							
		гравий				щебень			
		10	20	40	70	10	20	40	70
—	40—50	150	135	125	120	160	150	135	130
—	25—35	160	145	130	125	170	160	145	140
—	15—20	165	150	135	130	175	165	150	145
—	10—15	175	160	145	140	185	175	160	155
2—4	—	190	175	160	155	200	190	175	170
5—7	—	200	185	170	165	210	200	185	180
8—10	—	205	190	175	170	215	205	190	185
10—12	—	215	205	190	180	225	215	200	190
12—16	—	220	210	197	185	230	220	207	195
16—20	—	227	218	203	192	237	228	213	202

Примечания: 1. Расход воды приведен для смеси на портландцементе с $НГЦТ=26—28\%$ и на песке с $М^{п}_{кр}=2$.

2. При изменении нормальной густоты цементного теста на каждый процент в меньшую сторону расход воды уменьшается на 3—5 л, в бо́льшую сторону — увеличивается на 3—5 л/м³.

3. При изменении модуля крупности песка на каждые 0,5 в меньшую сторону расход воды увеличивается на 3—5 л, в бо́льшую сторону — уменьшается на 3—5 л.

4. РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ СПОСОБ ОПРЕДЕЛЕНИЯ СОСТАВА ТЯЖЕЛОГО БЕТОНА

4.1. Расчет и назначение исходного состава тяжелого бетона производится в следующем порядке:

а) определяется $В/Ц$ в зависимости от требуемой прочности, срока и условий твердения бетона либо на основе предварительных опытов, устанавливающих зависимость прочности бетона от этого фактора и активности цемента (с применением местных заполнителей), либо ориентировочно по формулам:

при $В/Ц \geqslant 0,4$ . . . . . $$В/Ц = \frac{AR_{ц}}{R_{б}+0,5AR_{ц}} \qquad (1)$$

при $В/Ц < 0,4$ . . . . . $$В/Ц = \frac{A_1R_{ц}}{R_{б}-0,5A_1R_{ц}} \qquad (2)$$

Значения коэффициентов A и A_1 берут по табл. 15.

Таблица 15

Заполнители бетона	A	A_1
Высококачественные	0,65	0,43
Рядовые	0,6	0,4
Пониженного качества	0,55	0,37

б) определяется расход воды по требуемой подвижности бетонной смеси на основании результатов предварительных испытаний (рис. 1, см. табл. 14). Графики на рис. 1 получены для бетона на гравии, песке средней крупности с водопотребностью песка 7% и при расходе портландцемента до 400 кг/м³ бетона. При использовании песка с водопотребностью менее 7% расход воды необходимо уменьшать на 5 л на каждый процент уменьшения водопотреб-

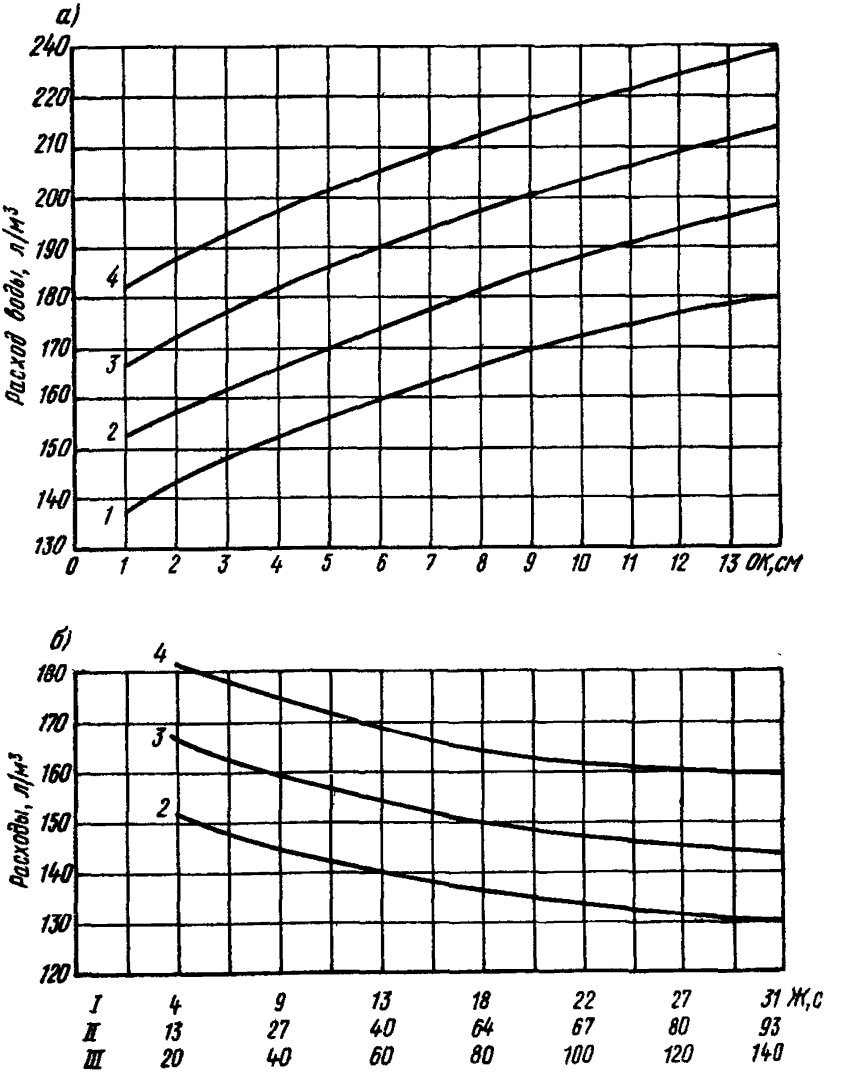

Рис. 1. Водопотребность бетонной смеси, приготовленной на гравии крупностью 1—80; 2—40; 3—20 и 4—10 мм

а — пластичные смеси; *б* — жесткие смеси; определение жесткости: *I* — по ГОСТ 10181—76; *II* — по техническому вискозиметру; *III* — по упрощенному способу

ности. При применении щебня и пуццоланового цемента расход воды следует соответственно увеличивать на 10—15 л. При расходе цемента свыше 400 кг/м³ расход воды необходимо увеличивать на 1 л на каждые 10 кг цемента сверх 400 кг. Методика определения водопотребности песка и крупного заполнителя приведена в прил. 1 настоящего Руководства;

в) находится расход цемента по формуле

$$Ц = B : B/Ц. \qquad (3)$$

Если расход цемента на 1 м³ бетона окажется ниже допускаемого нормами (см. табл. 11 и 12), то необходимо увеличить его до требуемой нормы или ввести тонкомолотую добавку. Последняя нужна в тех случаях, когда активность цемента слишком высока для бетона данной марки;

г) устанавливается коэффициент раздвижки α для пластичных бетонных смесей по табл. 16.

Таблица 16

Расход цемента, кг/м³	α при $B/Ц$					
	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8
250	—	—	—	1,26	1,32	1,38
300	—	—	1,3	1,36	1,42	—
350	—	1,32	1,38	1,44	—	—
400	1,31	1,4	1,46	—	—	—
500	1,44	1,52	1,56	—	—	—
600	1,52	1,56	—	—	—	—

Примечания: 1. При других значениях $Ц$ и $B/Ц$ коэффициент α находится интерполяцией.

2. При использовании мелкого песка с водопотребностью более 7% коэффициент α уменьшают на 0,03 на каждый процент увеличения водопотребности песка. Если применить крупный песок с водопотребностью менее 7%, коэффициент α увеличивают на 0,03 на каждый процент уменьшения водопотребности песка.

Для жестких бетонных смесей при расходе цемента менее 400 кг/м³ коэффициент α принимают равным 1,05—1,15, в среднем 1,1. Значения α меньше 1,05 принимают в случае использования мелких песков. Для жирных составов жестких смесей с расходом цемента более 400 кг/м³ коэффициент α назначают не менее 1,1;

д) определяется расход щебня (или гравия) по формуле

$$Щ = \frac{1000}{\frac{\alpha V_{\text{пус.щ}}}{\gamma_{\text{нас.щ}}} + \frac{1}{\gamma_{\text{щ}}}}; \qquad (4)$$

е) определяется расход песка по формуле

$$П = \left(1000 - \frac{Ц}{\gamma_{\text{ц}}} - B - \frac{Щ}{\gamma_{\text{щ}}}\right)\gamma_{\text{п}}. \qquad (5)$$

Пример 1. Требуется подобрать состав бетона марки М 300 с подвижностью бетонной смеси по осадке конуса 4—5 см. Материалы: портландцемент активностью 375 кгс/см², песок средней крупности с водопотребностью 7% и плотностью 2,63 кг/л. Гранитный щебень с предельной крупностью 40 мм, плотностью 2,6 кг/л, объемной насыпной массой 1,48 кг/л, пустотностью 0,43. Принимаем среднее значение коэффициента $A=0{,}6$ (заполнители рядовые удовлетворяют соответствующим стандартам, твердение бетона в естественных условиях).

Определяется:

$$B/Ц = \frac{0{,}6 \cdot 375}{300 + 0{,}5 \cdot 0{,}6 \cdot 375} = 0{,}54;$$

по графикам (рис. 1, *а*)—ориентировочный расход воды 178 кг/м³;
$Ц = 178 : 0{,}54 = 330$ кг/м³;
по табл. 16 — коэффициент $\alpha = 1{,}38$ (по интерполяции);

$$Щ = \frac{1000}{\frac{0{,}43 \cdot 1{,}38}{1{,}48} + \frac{1}{2{,}6}} = 1270 \text{ кг/м}^3;$$

$$П = \left(1000 - \frac{330}{3{,}1} - 178 - \frac{1270}{2{,}6}\right) 2{,}63 = 600 \text{ кг/м}^3;$$

Расчетная объемная масса бетонной смеси составляет $\gamma^{т}_{б.с} = 330 + 178 + 600 + 1270 = 2378$ кг/м³.

Пример 2. Требуется подобрать состав бетона марки М 300 с жесткостью 11—12 с по ГОСТ 1018—76. Материалы те же, что и в примере 1.

Определяется:

$$B/Ц = \frac{0{,}6 \cdot 375}{300 + 0{,}5 \cdot 0{,}6 \cdot 375} = 0{,}54;$$

по графикам рис. 1, *б* — ориентировочный расход воды 150 кг/м³;

$$Ц = 150 : 0{,}54 = 278 \text{ кг/м}^3;$$

Коэффициент α для жесткой бетонной смеси при умеренном расходе цемента принимаем равным 1,1.

$$Щ = \frac{1000}{\frac{1{,}1 \cdot 0{,}43}{1{,}48} + \frac{1}{2{,}6}} = 1420 \text{ кг/м}^3.$$

$$П = \left(1000 - \frac{278}{3{,}1} - 150 - \frac{1420}{2{,}6}\right) 2{,}63 = 565 \text{ кг/м}^3.$$

4.2. Экспериментальную проверку состава бетона производят в следующем порядке:

а) приготовляют пробный замес бетонной смеси и определяют осадку конуса или жесткость. Если подвижность смеси отвечает заданной, то из нее изготовляют контрольные образцы. При этом оп-

ределяют массу уложенного и уплотненного бетона. Затем образцы испытывают в заданные сроки;

б) на каждый срок испытания готовят не менее трех образцов. Приемы укладки и уплотнения образцов должны соответствовать требованиям ГОСТ 10180—74.

Образцы в течение 1 сут хранят в формах в помещении с температурой от 16 до 20° С, затем освобождают от форм, маркируют и до момента испытания хранят во влажной среде в специальной камере или в периодически увлажняемом песке, опилках и т. д. Перед испытанием тщательно осматривают образцы, измеряют грани (с точностью до 1 мм), взвешивают;

в) если при изготовлении пробного замеса подвижность смеси отличается от заданной или если действительная прочность бетона при сжатии отличается от заданной более чем на 5—8%, то следует внести коррективы в состав бетона. Методика корректирования состава бетона по подвижности смеси, содержанию песка и прочности бетона при сжатии изложена в разд. 8 настоящего Руководства.

5. УСКОРЕННЫЙ СПОСОБ ОЦЕНКИ КАЧЕСТВА ЦЕМЕНТА В БЕТОНЕ И НАЗНАЧЕНИЕ СОСТАВА БЕТОНА

5.1. При отсутствии данных об активности имеющегося цемента рекомендуется применять ускоренный способ оценки качества цемента в бетоне и назначения состава бетона требуемой марки.

5.2. Для ускорения оценки качества цемента в бетоне и одновременного назначения состава бетона требуемой марки используется линейная зависимость прочности бетона от цементно-водного отношения. Делают затворение трех составов бетона с $В/Ц$ от 0,7 до 0,36 или соответственно с $Ц/В$ от 1,43 до 2,8. Изготовляют контрольные образцы, которые пропаривают или выдерживают в условиях нормальной температуры и влажности, испытывают на сжатие в суточном или ином возрасте и по полученным данным строят график зависимости $R_б$ от $Ц/В$. Использование накопленных данных и графика позволяет установить $Ц/В$ для получения требуемой прочности бетона в заданное время, на основе которого и определяется состав бетона.

5.3. В зависимости от наибольшей крупности применяемого щебня или гравия и размера контрольных образцов подготавливают необходимое количество материалов для изготовления девяти контрольных образцов трех разных составов (по три образца из каждого состава), как указано в табл. 17.

5.4. Указанный в табл. 17 расход материалов достаточен для изготовления по одной серии образцов (по 3 шт.) трех составов для испытания их в один срок (например, через 12 ч после пропаривания или в возрасте 2, 7 или 14 сут нормального хранения). При необходимости испытания бетона еще в два срока, например после пропаривания и дополнительного твердения 27 сут, а также в возрасте 28 сут нормального твердения, количество заготовляемых материалов должно быть утроено.

5.5. Для уточнения составов бетона по прочности, подвижности смеси или по содержанию песка рекомендуется заготовить дополнительное количество материалов.

5.6. Подготовленное количество цемента просеивают через сито с 64 отв/см² и оставшиеся комки удаляют. Просеянный цемент помещают в жесткую тару с плотно закрывающейся крышкой.

Таблица 17

Ребро куба, см / объем, л	НК заполнителя, мм	Число фракций крупного заполнителя	Расход щебня, кг/%, при размере фракции, мм					Расход, кг		Общая масса материала, кг	Объем плотно уложенной смеси, л
			5—10	10—20	20—40	40—70	всего	песка	цемента		
10/1	10	1	12/100	—	—	—	12/100	7	5	24	10
10/1	20	1	6/50	6/50	—	—	12/100	7	5	24	10
15/3,38	40	2—3	—	20*/50	20/50	—	40/100	24	17	81	34
20/8	70—80	2—3—4	—	58*/60	—	38/40	96/100	56	40	192	80
20/8	70—80	3—4		29/30	29/30	38/40	96/100	56	40	192	80

* Щебень или гравий может быть применен одной (5—10, 5—20, 5—40 мм), двух (5—10 и 10—20; 5—20 и 20—40; 5—40 и 40—70 мм), трех (5—10, 10—20 и 20—40 или 5—20, 20—40 и 40—70 мм) или четырех (5—10, 10—20, 20—40 и 40—70 мм) фракций.

Тонкость помола цемента определяют по ГОСТ 310.2—76.

5.7. Необходимое количество щебня и песка просушивают, рассеивают по фракциям, удаляют оставшиеся куски крупнее предельных размеров и складывают в чистую тару — ящики или закрома, например:

песок просеивают через сито ∅ 5 мм;

щебень фракции 5—10 мм через сито ∅ 10 мм
» » 10—20 мм и 5—20 мм через сито ∅ 20 мм
» » 20—40 » » » » ∅ 40 »
» » 40—70 » » » » ∅ 70 »

5.8. Определяют водопоглощение щебня (гравия), для чего из разных фракций отбирают по 3—5 или более кусков общей массой не менее 1 кг, взвешивают, укладывают их на решето и погружают в воду, уровень которой должен быть выше слоя замачиваемой пробы на 5—7 см. Через 0,5 ч решето с пробой извлекают из воды, дают воде стечь, спустя 0,5—1 ч обтирают мягкой тканью куски щебня, определяют их массу и вычисляют водопоглощение по формуле

$$W_{щ} = \frac{P_2 - P_1}{P_1} 100, \qquad (6)$$

где $W_{щ}$ — водопоглощение щебня, %;

P_1 — масса щебня до погружения в воду, кг;
P_2 — масса влажного щебня, кг.

5.9. После подготовки материалов приготовляют три состава бетонной смеси: 1-й состав с $Ц/В=1{,}43$; 2-й состав с $Ц/В=2$ и 3-й состав с $Ц/В=2{,}8$.

5.10. Расход материалов на замес, из которого может быть отформовано три серии образцов по три кубика размером 10×10×10 см каждого состава бетонной смеси, приведен в табл. 18.

Таблица 18

Состав	$\frac{Ц/В}{В/Ц}$	Расход материалов, кг, на один замес для изготовления девяти образцов размером 10×10×10 см				
		цемента	песка	крупного заполнителя сухого	воды основной	воды на поглощение крупным заполнителем
1	$\frac{1{,}43}{0{,}7}$	2,5	8,3	13,5	1,74	$\frac{13{,}5}{100} W_{щ}$
2	$\frac{2}{0{,}5}$	3,6	7,5	12,3	1,8	$\frac{12{,}3}{100} W_{щ}$
3	$\frac{2{,}8}{0{,}36}$	7,7	4,5	10,6	2,73	$\frac{10{,}6}{100} W_{щ}$

Примечания: 1. Расход материалов на замес, приведенный в таблице, дан с некоторым избытком примерно на 10—11 л уплотненного бетона.

2. Для образцов-кубов с ребром 15 или 20 см расход каждого материала находят умножением расхода, приведенного в табл. 18, на объем большого куба, т. е. соответственно на 3,4 и 8 л, как указано в табл. 17.

5.11. Отвешенные на замес материалы для каждого состава перемешивают вручную или в смесителе и устанавливают для перемешанной смеси объемную массу, подвижность, осадку конуса или жесткость.

Подвижность смеси в трех приведенных составах может получиться несколько различной. Однако это не окажет влияния на прочность бетона, если смесь каждого состава будет хорошо уплотнена в формах.

5.12. Из каждого состава бетонной смеси формуют девять образцов-близнецов. Смесь уплотняют на стандартной виброплощадке до полного прекращения ее оседания, выравнивания и появления на всей поверхности цементного раствора. На форму какой-либо краской, стойкой к влажным и температурным условиям, наносят номер состава, из которого в этой форме изготовлены образцы, или навешивают металлическую бирку с выбитым номером состава.

5.13. После изготовления и 2-ч выдержки шесть образцов каждого состава помещают в формах в пропарочную камеру, где подвергают тепловой обработке при атмосферном давлении по следующему режиму:

а) если бетонная смесь приготовлена на портландцементе: 3 ч — подъем, 6 ч — выдержка при температуре изотермического прогрева 80—85° С и 2 ч — охлаждение;

б) если бетонная смесь приготовлена на шлакопортландцементе или пуццолановом портландцементе: 3 ч — подъем, 8 ч — выдержка при температуре изотермического прогрева 90—95° С и 2 ч — охлаждение.

Три оставшихся образца каждого состава выдерживают в форме в течение 1 сут при комнатной температуре.

На заводах железобетонных изделий пропаривание может производиться по принятому на заводе режиму.

5.14. Через 12 ч с момента отключения пара образцы извлекают из форм, переносят метку с формы на каждый образец и испытывают на сжатие три из шести пропаренных образцов по ГОСТ 10180—74.

Три оставшихся пропаренных образца каждого состава и три образца, не подвергавшихся пропариванию, по освобождении из форм помещают в камеру нормального хранения для испытания в возрасте 28 сут.

5.15. Результаты испытания на сжатие кубов разных размеров должны быть приведены к прочности кубов с ребром 15 см, для чего их прочность надо умножить:

на 0,91, если был испытан куб с ребром 10 см;

» 1,05 » » » » » » 20 ».

Завод или строительная площадка могут установить для своих прессов и форм другие переводные коэффициенты согласно ГОСТ 10180—74.

5.16. По результатам испытания образцов на сжатие выводят среднюю прочность бетона каждого состава по ГОСТ 10180—74

5.17. Для построения зависимости $R_б = f(Ц/В)$ (где $R_б$ — прочность бетона после тепловой обработки) по горизонтальной оси откладывают значение $Ц/В$, а по вертикальной — прочность в

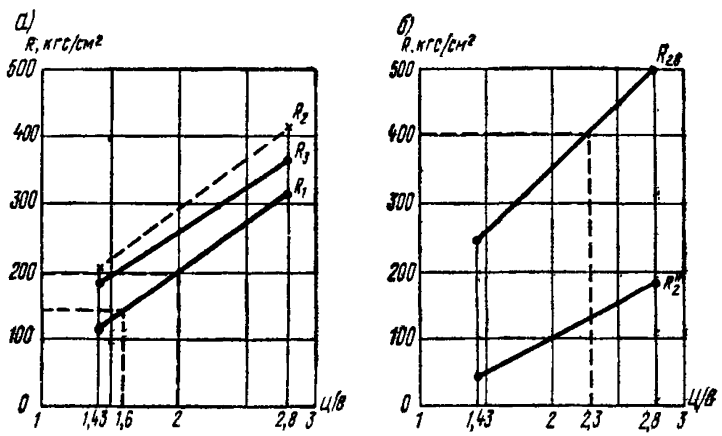

Рис. 2. Прочность бетона в зависимости от цементно-водного отношения

а — при пропаривании и нормальном твердении: R_1 — испытанного через 12 ч после отключения пара; R_2 — испытанного через 27 сут последующего нормального твердения; R_3 — нормального твердения в возрасте 28 сут; *б* — при нормальном твердении: $R_2^н$ — в возрасте 2 сут; $R_{28}^н$ — в возрасте 28 сут

кгс/см². На рис. 2, *а* откладывают три точки, абсциссы которых показывают *Ц/В*, а ординаты — полученную среднюю прочность, приведенную к прочности куба с ребром 15 см. Через отложенные точки проводят прямую, которая и является графическим изображением искомой функции.

В случае, если прямая не проходит через три точки и какая-нибудь из них по ординате отклоняется от возможного расположения на проводимой прямой с той же абсциссой более чем на 10%, опыт должен быть повторен.

Пример построения функции $R_1=f(Ц/В)$ приведен на рис. 2, *а*.

5.18. На заводах железобетонных изделий построение функции $R_1=f(Ц/В)$ достаточно для выбора *Ц/В* и для получения бетона заданной прочности.

Если по остывании требуется, например, прочность бетона, равная 70%-ной проектной марки 200, т. е. необходимо найти *Ц/В* для прочности 140 кгс/см², то через точку прочности 140 кгс/см² на оси ординат проводят прямую параллельно оси абсцисс до пересечения с прямой R_1. Абсцисса точки пересечения дает искомую величину $Ц/В=1{,}6$ (см. рис. 2, *а*).

Если бы требовалось обеспечить полную проектную прочность сразу после остывания, линию, параллельную абсциссе, пришлось бы провести через точку ординаты 200 кгс/см². В этом случае $Ц/В=2$.

5.19. Для строительных площадок, когда требуемая прочность, как правило, должна быть обеспечена к возрасту 28 сут, построение функции $R_1=f(Ц/В)$ недостаточно. Необходимо построить функцию $R_3=f(Ц/В)$; с этой целью следует воспользоваться значениями *М*, приведенными в графах $R_3=f(R_1)$ (табл. 19), подсчитать величины R_3 при каких-либо двух значениях *Ц/В*, например 1,43 и 2,8.

5.20. Если при испытании образцов после их пропаривания и остывания получены прочности для построения R_1 при $Ц/В=1{,}43$—115 кгс/см² и при $Ц/В=2{,}8$—310 кгс/см², то при тех же значениях *Ц/В* для построения R_3 имеем (см. табл. 19)*:

при $Ц/В=1{,}43$ . . . . . $R_3=115\dfrac{158}{100}=182$ кгс/см²

при $Ц/В=2{,}8$ . . . . . $R_3=310\dfrac{120}{100}=372$ »

На рис. 2, *а* проведена прямая $R_3=f(R_1)$.

5.21. В тех случаях, когда интерес представляет прочность пропаренного бетона через 27 сут последующего твердения в нормальных условиях, нужно построить $R_2=f(R_1)$. Данные для этого построения приведены в табл. 19, где находим:

при $Ц/В=1{,}43$ . . . . . $R_2=\dfrac{177}{100}R_1=\dfrac{177}{100}115=204$ кгс/см²

---

* Данные табл. 19 и 20 получены на основе обобщения большого числа результатов испытаний образцов бетона, нормально твердевших в возрасте 2, 7, 14 и 28 сут, после пропаривания в суточном возрасте, дополнительного выдерживания в нормальных условиях 27 сут и определения активности цементов, на которых были изготовлены бетонные образцы.

при $Ц/В=2{,}8$ . . . . . $R_2=\frac{135}{100}\ R_1=\frac{135}{100}310=420$ кгс/см²

На рис. 2, *а* приведена прямая $R_2=f(R_1)$.

5.22. Приведенные расчеты, выполненные с привлечением данных табл. 19, проверяются в последующем при испытании образцов, выдержанных после пропаривания 27 сут в нормальных условиях, и образцов, не подвергавшихся пропариванию, выдержанных в нормальных условиях 28 сут.

5.23. Для проверки активности примененного для бетона цемента используется зависимость $R_1=f(R_ц)$ (см. табл. 19).

Поскольку R_1 как функция $R_ц$ может быть выяснена при разных значениях $В/Ц$, следует принять то из них, которому соответствует наименьшая величина коэффициента вариации; $C_v=15\%$ и является наименьшей величиной. $R_ц$ найдем из частного от деления R_1 при $Ц/В=2{,}8$ на 0,85 (см. табл. 19), а именно:

$$R_ц=\frac{R_1\cdot 100}{85}=\frac{310\cdot 100}{85}=365\ \text{кгс/см}^2.$$

5.24. В условиях монолитного строительства испытание цемента в бетоне и нахождение $В/Ц$ может быть выполнено без ускорения твердения бетона пропариванием.

5.25. Кубы, изготовленные так же, как это приведено для бетона с пропариванием его (см. п. 5.12), хранят в нормальных условиях и испытывают по 3 шт. от каждого состава через 2, 7 и 28 сут или через 7, 14 и 28 сут.

5.26. Испытания (2-, 7- или 14-суточные) могут быть использованы для построения функции $R^н_{28}=f\left(R^н_2\right)=f\left(R^н_7\right)=f\left(R^н_{14}\right)$. При этом если время позволит воспользоваться функцией $R^н_7$ или $R^н_{14}$, они дают более точный результат, нежели функции $R^н_2$, как это видно по величине изменчивости из табл. 20, в которой приведены коэффициенты прочности бетона нормального твердения.

5.27. Чтобы построить функцию $R^н_{28}=f\left(R^н_2\right)$ или $R^н_{28}=f\left(R^н_7\right)$, нужно испытать в возрасте 2 или 7 сут три из девяти кубов каждого состава, найти среднюю прочность и привести ее к прочности кубов с ребром 15 см. По полученным прочностям строят функцию $R^н_2=f(Ц/В)$ или $R^н_7=f(Ц/В)$ и далее, пользуясь величиной M по табл. 20 (с учетом тонкости помола цемента), находят значение $R^н_{28}=f\left(R^н_2\right)$ или $R^н_{28}=f\left(R^н_7\right)$. Например, бетон, изготовленный из цемента с удельной поверхностью, определяемой по ГОСТ 310.2—76, равной 2800 см²/г, при испытании в возрасте 2 сут показал средние прочности, приведенные к стандартному образцу:

при $Ц/В=1{,}43$ . . . . . $R^н_2=49$ кгс/см²

» $Ц/В=2$ . . . . . $R^н_2=105$ »

» $Ц/В=2{,}8$ . . . . . $R^н_2=180$ »

Таблица 19

Ц/В	$R_2 = f(R_1)$			$R_3 = f(R_1)$			$R_1 = f(R_Ц)$			$R_2 = f(R_Ц)$			$R_1 = f(R_3)$			$R_2 = f(R_3)$		
	M	S	C_v	M	S	C_v	M	S	C_v	M	S	C_v	M	S	C_v	M	S	C_v
1,43	177	44	25	158	37	23	27	10	37	44	16	36	67	14	21	116	18	15
2	143	23	16	131	22	17	51	10	20	71	12	20	78	11	15	115	17	15
2,5	138	24	17	123	20	17	72	12	17	96	19	20	81	13	16	112	16	14
2,8	135	22	17	120	21	18	85	16	15	110	20	18	83	14	17	110	16	14
	$R_2 = \frac{R_1 M}{100}$			$R_3 = \frac{R_1 M}{100}$			$R_1 = \frac{R_Ц M}{100}$ $R_Ц = \frac{R_1 \cdot 100}{M}$			$R_2 = \frac{R_Ц M}{100}$ $R_Ц = \frac{R_2 \cdot 100}{M}$			$R_1 = \frac{R_3 M}{100}$			$R_2 = \frac{R_3 M}{100}$		

Примечание. Все величины даны в процентах. Обозначения R_1, R_2, R_3 — см. рис. 2, *а*; M — средний коэффициент прочности; S — среднеквадратическое отклонение; C_v — коэффициент вариации

Таблица 20

Ц/В	$R_2^н$ в % $R_{28}^н$			$R_7^н$ в % $R_{28}^н$			$R_{14}^н$ в % $R_{28}^н$		
	M	S	C_v	M	S	C_v	M	S	C_v
1,43	47 / 20	9,2 / 7,8	19,5 / 39	73 / 62	9 / 9,8	12 / 15,8	89 / 83	7,6 / 7,5	8 / 9
2	56 / 31	8,4 / 8,5	15 / 27	84 / 71	8,6 / 7,7	10,2 / 10,9	94 / 84	7,8 / 6	8,3 / 7,1
2,8	68 / 37	10,5 / 8	15,4 / 22	86 / 77	8,5 / 8	9,8 / 10,3	95 / 88	5,4 / 7	5,7 / 8

Примечание. Цифры над чертой даны для быстротвердеющих цементов повышенной дисперсности 4000—4500 см²/г, под чертой — для обычных цементов с дисперсностью 2500—3000 см²/г. Для промежуточных значений дисперсности множитель M следует брать по интерполяции.

С учетом дисперсности цемента по табл. 20 и по $R_2^н$ найдем $R_{28}^н$:

при $Ц/В=1,43$ . . . $R_{28}^н = R_2^н : \frac{20}{100} = 49 : \frac{20}{100} = 245$ кгс/см²

» $Ц/В=2$ . . . . $R_{28}^н = R_2^н : \frac{31}{100} = 105 : \frac{31}{100} = 338$ »

» $Ц/В=2,8$ . . . $R_{28}^н = R_2^н : \frac{37}{100} = 180 : \frac{37}{100} = 486$ »

5.28. По полученным прочностям строим график функции $R_{28}^н = f(Ц/В)$, по которому можно найти требуемое для бетона значение $Ц/В$ (рис. 2, *б*).

Пусть на материалах, которые применены в последних замесах, требуется получить бетон марки $R_{28}^н = 400$ для монолитного строительства, твердеющий в естественных условиях. Проводим горизонтальную линию от точки $R=400$ кгс/см² до пересечения с прямой $R_{28}^н$ и далее опустим перпендикуляр на ось абсцисс. Получаем значение $Ц/В=2,3$. Дальнейший подбор состава бетона проводится аналогично изложенному в разд. 4 настоящего Руководства. По графикам рис. 1 или по табл. 14 устанавливается водопотребность бетона. Затем по формуле (3) определяется расход цемента. По разности объемной массы бетонной смеси и цементного теста определяется масса смеси заполнителей. Значение r принимается по табл. 21.

Таблица 21

Расход цемента в бетоне, кг/м³	Бетон с гравием				Бетон с щебнем			
	Наибольшая крупность заполнителей, мм							
	10	20	40	70	10	20	40	70
200	0,42	0,4	0,38	0,37	0,45	0,43	0,41	0,4
300	0,4	0,38	0,36	0,35	0,43	0,41	0,4	0,39
400	0,38	0,36	0,35	0,34	0,4	0,38	0,37	0,36
500	0,36	0,35	0,34	0,33	0,38	0,36	0,35	0,34

Затем определяется расход песка и щебня на 1 м³ бетона. Соотношения между фракциями щебня принимаются по табл. 7.

Предполагаемая активность (и, следовательно, марка) цемента примерно равна по величине $R_{28}^н$ при $Ц/В=2,8$.

В приведенном примере (п. 5.27) можно считать, что был применен цемент марки 500.

Пример 1. Требуется установить активность портландцемента, если при испытании его в бетоне после тепловой обработки и остывания были получены следующие прочности в пересчете на контрольный куб размером 15×15×15 см:

при $Ц/В = 1,43$ . . . . $R_1 = 200$ кгс/см²

» $Ц/В = 2$ . . . . . $R_1 = 325$ »

» $Ц/В = 2,8$ . . . . . $R_1 = 500$ »

Пользуясь данными графы $R_1 = f(R_ц)$ (табл. 19), отмечаем, что наименьшее значение коэффициента вариации C получено при $Ц/В = 2{,}8$. Принимаем $M = 85\%$ для этого значения $Ц/В$ и можем записать

$$R_1 = 85\%\ R_ц,$$

откуда

$$R_ц = R_1 : \frac{85}{100} = \frac{500 \cdot 100}{85} = 590 \text{ кгс/см}^2.$$

Следовательно, примененный портландцемент относится к марке 600.

Пример 2. Требуется выбрать $Ц/В$ — отношение для бетона марки М 400 нормального твердения, если данные по прочности после пропаривания и остывания составляют величины, приведенные в примере 1.

Пользуясь показателями графы $R_3 = f(R_1)$ (табл. 19), находим:

при $Ц/В = 1{,}43 \ldots R_3 = \frac{158}{100} R_1 = 1{,}58 \cdot 200 = 317$ кгс/см^2

» $Ц/В = 2 \ldots R_3 = \frac{131}{100} R_1 = 1{,}31 \cdot 325 = 426$ »

» $Ц/В = 2{,}8 \ldots R_3 = \frac{120}{100} R_1 = 1{,}2 \cdot 500 = 600$ »

Строим график $R_3 = f(R_1)$ и устанавливаем, что искомое $Ц/В = 1{,}88$ (рис. 3, *а*).

Пример 3. Требуется рассчитать состав бетонной смеси по следующим данным:

а) бетон марки М 300 после твердения в нормальных условиях;

б) подвижность смеси — сразу после перемешивания по осадке конуса 5 см;

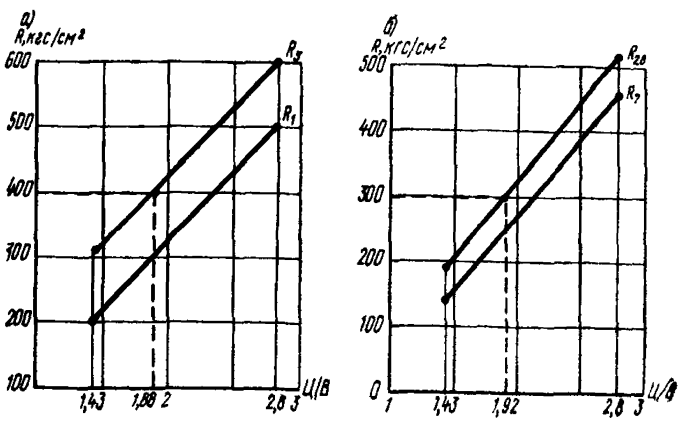

Рис. 3. Графики для определения требуемой величины $Ц/В$ в бетоне

а — R_1 и R_3 — см. рис. 2, *а*; *б* — R_7 и R_{28} — см. рис. 2, *б*

в) крупный заполнитель — известняковый щебень (*НКЩ* = =40 мм);

г) кварцевый песок с влажностью 3%;

д) цемент с удельной поверхностью 4200 см²/г;

е) образцы должны быть испытаны в возрасте 7 сут.

Расчет состава бетонной смеси производится следующим образом:

а) выбираем размер образцов для построения функции: $R = f(Ц/В)$. Пусть это будет куб размером 15×15×15 см. Объем такого куба $V = 1{,}5^3 = 3{,}38$ дм³ ≈ 3,4 л;

б) для проведения опытных затворений бетона, согласно п. 5.3 настоящего Руководства, заготавливаем 40 кг щебня, фракционируем, просеиваем его через сито диаметром 20 и 40 мм и высушиваем до постоянной массы;

в) определяем водопоглощение щебня после погружения его в воду на ½ ч Пусть масса щебня $P_1 = 2{,}1$ кг повысилась до $P_2 = 2{,}12$ кг. Следовательно, водопоглощение его составит

$$W_{щ} = \frac{P_2 - P_1}{P_1} 100 = \frac{2{,}12 - 2{,}1}{2{,}1} 100 = 1\%;$$

г) отбираем пробу песка согласно п. 5.3 настоящего Руководства 24 кг, высушиваем ее до постоянной массы;

д) подсчитываем нужное количество материалов на замес, умножая данные табл. 18 настоящего Руководства на объем формы куба размером 15×15×15 см, т. е. на 3,4;

е) изготовляем три замеса и отформовываем по девять образцов из каждого состава бетона для испытания в три срока в возрасте 2, 7 или 14 и 28 сут. Если достаточно данных испытаний в один или в два срока, объем замесов можно соответственно сократить.

Устанавливаем объемную массу свежеуложенной и уплотненной бетонной смеси по формуле

$$\gamma_{б.с}^{ф} = \frac{g_2 - g_1}{V_ф},$$

где g_1 — масса формы 15×15×15 см, кг;
g_2 — то же, с уплотненным бетоном;
$V_ф$ — объем формы, л.

Допустим, получили $\gamma_б = 2{,}36$ кг/л, или 2360 кг/м³.

Изготовленные образцы-кубы размером 15×15×15 см при испытании через 7 сут нормального твердения показали следующие средние прочности:

при $Ц/В = 1{,}43$ . . . . $R_7 = 136$ кгс/см²
» $Ц/В = 2$ . . . . . $R_7 = 260$ »
» $Ц/В = 2{,}8$ . . . . . $R_7 = 460$ »

По этим данным строим график $R_7 = f(Ц/В)$, приведенный на рис. 3, *б*.

Пользуясь данными табл. 20 настоящего Руководства, находим:

при $Ц/В = 1{,}43$ . . . $R_{28} = 136{:}0{,}73 = 186$ кгс/см²
» $Ц/В = 2{,}8$ . . . $R_{28} = 460{:}0{,}86 = 535$ »

Строим график этой функции (см. рис. 3, *б*), из которого следует, что для бетона марки М 300 необходимо принять $Ц/В \approx 1{,}9$.

Установив значение $Ц/В$ для бетона марки М 300 нормального твердения, равное 1,9, проводим расчет состава на 1 м³ бетона:

а) по табл. 14 настоящего Руководства принимаем расход воды: $В = 185$ л/м³;

б) определяем расход цемента: $Ц = 185 \cdot 1{,}9 = 352$ кг/м³;

в) определяем расход заполнителей в бетоне:

$$Щ + П = \gamma_б - Ц - В = 2360 - 352 - 185 = 1823 \text{ кг/м}^3;$$

г) по табл. 21 настоящего Руководства принимаем значение $r = 0{,}38$ и подсчитываем содержание песка в бетоне:

$$П = (Щ + П)\, r = 1823 \cdot 0{,}38 = 692 \text{ кг/м}^3;$$

д) подсчитываем содержание щебня в бетоне как разность массы заполнителей и массы песка:

$$Щ = (Щ + П) - П = 1823 - 692 = 1131 \text{ кг/м}^3;$$

е) записываем номинальный (на сухих заполнителях) состав бетона в уплотненном состоянии на 1 м³:

$Ц$ — 352 кг
$П$ — 692 »
$Щ$ — 1131 »
$В$ — 185 »

$\gamma_б = 2360$ кг

Производим проверочный замес бетона объемом 10 л.

Для этого берем $Ц = 3{,}52$ кг; $П = 6{,}92$ кг; $Щ = 11{,}31$ кг; $В = 1{,}85$ л.

Перед замесом насыщаем щебень водой, опуская его в решете или в ящике с дырчатыми стенками и дном в воду на ½ ч, затем вынимаем, даем воде стечь и через 0,5 ч вытираем щебень мягкой тканью.

Тщательно перемешиваем сухой песок с цементом, затем с влажным щебнем и далее с водой до однородности консистенции. Определяем подвижность получившейся смеси по осадке конуса. Если при двукратном определении получили требуемую по заданию осадку конуса 5 см, состав можно передавать на производство. Одновременно проверяем объемную массу уплотненного бетона. Если она отличается от расчетной более чем на 1%, состав бетона следует пересчитать по уточненной объемной массе.

Если подвижность смеси отличается от заданной, корректировку состава производят, как указано в разд. 8 настоящего Руководства.

6. ПОДБОР СОСТАВА БЕТОНА ПО ТАБЛИЦАМ, ГРАФИКАМ, НОМОГРАММАМ

6.1. Расчет состава бетона производится в следующем порядке:

а) водоцементное отношение определяется по формуле

$$В/Ц = \frac{AR_ц}{\dfrac{R_б}{K_1 K_2} + 0{,}5AR_ц}. \qquad (7)$$

Таблица 22

Вид заполнителя	Содержание глины, пыли и ила в щебне и песке, %	Суммарное содержание глины, пыли и ила, % (в навеске щебня 3 кг, песка 1 кг)	Значение коэффициента A для бетона на		
			щебне	гравии горном	гравии речном и морском
Щебень (гравий) Песок	0 0	0	0,64	0,6	0,57
Щебень (гравий) Песок	0 3	0,75	0,61	0,56	0,53
Щебень Песок	1 3	1,5	0,58	0,53	0,5
Щебень (гравий) Песок	2 3	2,2	0,55	0,5	0,47
Щебень (гравий) Песок	2* 5*	2,8	0,52	0,47	0,44

* Если на зернах щебня и песка имеется пылевидная рубашка, такие заполнители допускается применять только для бетонов марки М 250 и ниже после опытной проверки в бетонах.

Коэффициент A определяют в зависимости от чистоты заполнителей по табл. 22, K_1 и K_2 — по табл. 23.

Данные табл. 22 получены на гранитном щебне с $НК=80$ мм, песке с $М^{п}_{кр}=3$, цементе с $НГЦТ=27\%$, на бетонных смесях с $ОК=2$ см и жесткостью 5 с (по ГОСТ 10181—76), 15 с (по упрощенному способу), 23 с (по техническому вискозиметру) при соотношении прочности каменной породы к прочности бетона ($R_{к.п}/R_б$) $>$ $>1,5$ и при $Ц/В\leqslant 2,25$.

Значения коэффициента A уточняются по графику рис. 4 в зависимости от требуемой подвижности или жесткости бетонной смеси, крупности песка и щебня, $НГЦТ$, $Ц/В$ и $R_{к.п}/R_б$. Поправка $\Sigma\Delta A$ подсчитывается как алгебраическая сумма частных поправок (табл. 24) и вводится в формулу (7) со своим знаком. Уточненное значение коэффициента $A+\Sigma\Delta A$ позволяет более точно устанавливать $В/Ц$, состав бетона для пробного замеса и сократить работу по подбору состава смеси.

Уточненное $В/Ц$ с учетом поправок определяется по формуле

$$В/Ц=\frac{(A+\Sigma\Delta A)\,R_ц}{\dfrac{R_б}{K_1K_2}+0{,}5(A+\Sigma\Delta A)\,R_ц}. \qquad (7а)$$

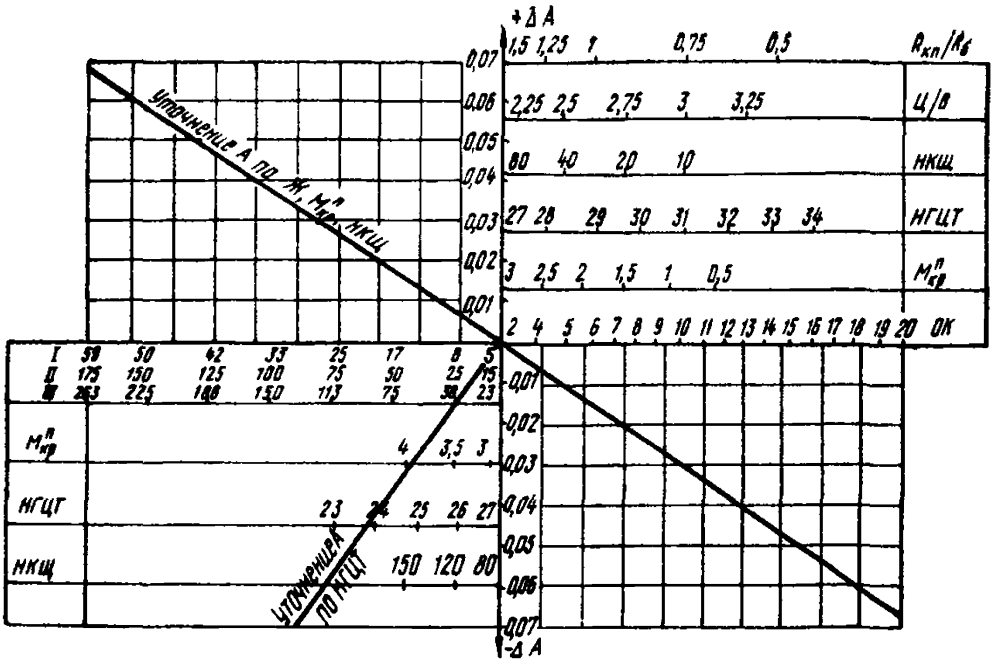

Рис. 4. График для уточнения коэффициента *А* в зависимости от подвижности *ОК* и жесткости бетонной смеси *Ж*, модуля крупности песка $М^п_{кр}$, нормальной густоты цементного теста *НГЦТ*, крупности щебня (гравия) *НКЩ*, цементно-водного отношения *Ц/В*, соотношения прочности щебня к прочности камня

I, II, III — *определение жесткости* (см. рис. 1)

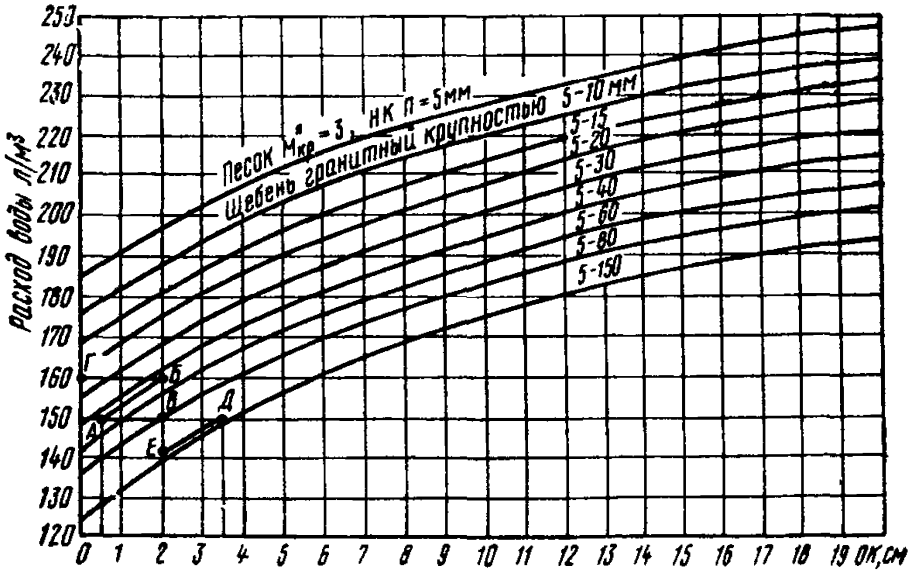

Рис. 5. График расхода воды на 1 м³ бетона в зависимости от пластичности бетонных смесей

Таблица 23

Минералогический состав клинкера цемента и производственные условия	Значения коэффициентов	
	K_1	K_2
Бетон пропариваемый		
Высокоалюминатный ($C_3A>10$, $<15\%$)	0,88	—
Среднеалюминатный ($C_3A<10$, $>6\%$)	0,92	—
Низкоалюминатный ($C_3A<6\%$)	0,99	—
Высокоалитовый ($C_3S>55\%$)	0,92	—
Среднеалитовый ($C_3S<55\%$)	0,94	—
Высокобелитовый ($C_2S>40\%$)	1,02	—
Среднебелитовый ($C_2S>25\%$)	0,98	—
Алюмоферритовый ($C_4AF>18\%$)	0,97	—
Бетон пропариваемый и естественного твердения		
Высокий уровень производства (дозировка материалов по массе, хорошие формы оснастки и контрольных образцов-кубиков, совершенный контроль за качеством бетона, надлежащий уход за твердением бетона) ($C_п=9—12\%$)	—	0,98
Средний уровень производства ($C_п=13\%$)	—	0,95
Низкий уровень производства ($C_п=14—17\%$)	—	0,92

Примечания: 1. Введение поправочных коэффициентов производится при наличии подробных данных по составу цементов и производственным условиям.

2. $C_п$ — коэффициент вариации прочности бетонных образцов.

Таблица 24

Отдельные показатели для определения поправок	Поправка
По подвижности (жесткости) бетонной смеси *ОК* или *Ж*	$\pm\Delta A_1$
» модулю крупности песка $M_{кр}^{п}$	$\pm\Delta A_2$
» нормальной густоте цементного теста *НГЦТ*	$\pm\Delta A_3$
» наибольшей крупности щебня *НКЩ*	$\pm\Delta A_4$
» цементно-водному отношению *Ц/В*	$-\Delta A_5$
» отношению прочности каменной породы к прочности бетона $R_{к.п}/R_б$	$-\Delta A_6$
	$\Sigma\Delta A$

Найденное значение $В/Ц$ сравнивается с допускаемым для данного вида бетона по ТУ, СНиП или ГОСТ (см. табл. 5). Если расчетное $В/Ц$ окажется больше допускаемого, то принимается последнее. Если же оно будет меньше допускаемого, то принимается расчетное значение $В/Ц$;

б) расход воды на 1 м³ бетона ($В_1$) определяется по графикам рис. 5 и 6. Графики построены на основе закономерности постоянной водопотребности в равноподвижных бетонных смесях при затворении бетона на песке с $М_{кр}^{п}=3$ на гранитном щебне крупностью 10, 20, 30, 40, 60, 80 и 150 мм, на цементе с $НГЦТ=28\%$ при содержании в щебне частиц меньше, а в песке больше 5 мм $\leqslant 5\%$. Жесткость определялась тремя способами (см. рис. 1). При использовании других материалов расход воды также назначается по рис. 5 и 6 с уточнением по табл. 25. Поправки к расходу воды сводятся в табл. 26. $\Sigma\Delta В$ считается как алгебраическая сумма.

Расход воды с учетом произведенной корректировки определяется по формуле

$$В = В_1 + \Sigma\Delta В. \qquad (8)$$

Корректировка водопотребности дает возможность точнее определять требуемый расход воды и позволяет сократить число опытных замесов при подборе состава бетона;

в) расход цемента, кг/м³, определяется по формуле (3) или (9):

$$Ц = \frac{В_1 + \Sigma\Delta В}{В/Ц}. \qquad (9)$$

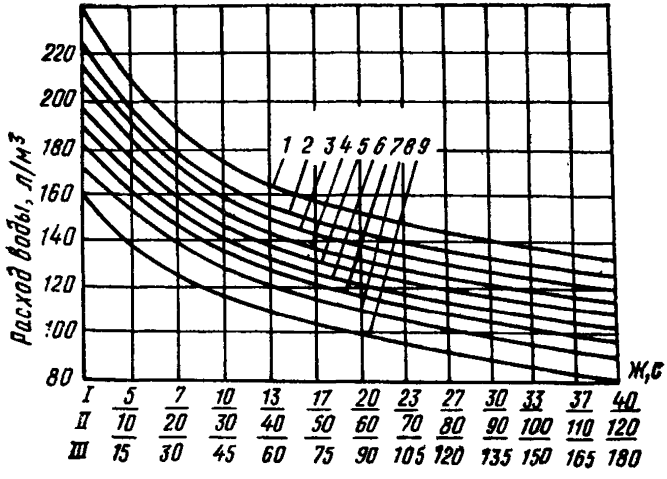

Рис. 6. График расхода воды на 1 м³ бетона в зависимости от жесткости бетонной смеси

I, II, III — определение жесткости (см. рис. 1)
кривые: *1* — для песка; *2—9* — для щебня *НК* 10, 15, 20, 30, 40, 60, 80 и 150 мм

Таблица 25

Материал, расход цемента, температура бетонной смеси	Расход воды, л/м³		Дополнительные указания
	увеличение	уменьшение	
Щебень из метаморфических и осадочных пород камня	4—13	—	4 л/м³ при прочности камня 800 кгс/см²; 13 л/м³ — при прочности камня 400 кгс/см². Для другой прочности поправки определяются по интерполяции
Горный гравий	—	5—10	Меньшие значения — при средней окатанности зерен; бóльшие — при хорошо окатанной поверхности зерен
Морской и речной гравий	—	9—15	
При изменении модуля крупности песка на каждые 0,5:			
в меньшую сторону от 3	3; 4; 5	—	3, 4 и 5 л при содержании пыли, ила и глины соответственно до 1, 3 и 5%
в большую сторону от 3	—	3; 4; 5	
Щебень из пород камня с гладкой поверхностью излома (диабаз, базальт, кварцитовый песчаник и др.)	—	3	—
Песок с гладкой, хорошо окатанной поверхностью (типа Вольского)	—	4	—
При изменении нормальной густоты цементного теста на каждый процент:			
в бóльшую сторону от 28%	4	—	—
в меньшую сторону от 28%	—	4	—
При изменении расхода цемента на каждые 10 кг сверх 350 кг/м³	1	—	—
Промытый щебень	—	6	—
Промытый песок	—	7	—

Продолжение табл. 25

Материал, расход цемента, температура бетонной смеси	Расход воды, л/м³		Дополнительные указания
	увеличение	уменьшение	
При увеличении содержания в щебне ила, пыли сверх 1% и частиц меньше 5 мм сверх 5% на каждый процент сверх нормы	1—2	—	1 л при содержании частиц меньше 5 мм; 2 л — при содержании только ила и пыли
При увеличении содержания в песке ила, пыли (но не глины) на каждый процент сверх 3%	2	—	—
При температуре бетонной смеси, °С:			
5	—	5	—
10	—	4	
15	—	2	
20	—	—	Эталон
25	3	—	—
30	7	—	
35	11	—	

Таблица 26

Корректировка расхода воды	Поправка
По породе крупного заполнителя	$+\Delta B_1$
» виду крупного заполнителя	$-\Delta B_2$
» модулю крупности песка	$\pm\Delta B_3$
» нормальной густоте цементного теста	$\pm\Delta B_4$
» расходу цемента	$+\Delta B_5$
» содержанию в щебне пыли, ила и каменной мелочи	$+\Delta B_6$
» содержанию в песке ила, пыли (но не глины)	$+\Delta B_7$
Итого	$\Sigma\Delta B$

Установленный расход цемента сравнивается с требованиями ТУ, СНиП и ГОСТ (см. табл. 11 и 12). Если он окажется меньше минимального, принимается последний; больше минимального и меньше максимального, принимается расчетный расход цемента; больше максимального — необходимо использовать более высокую марку цемента;

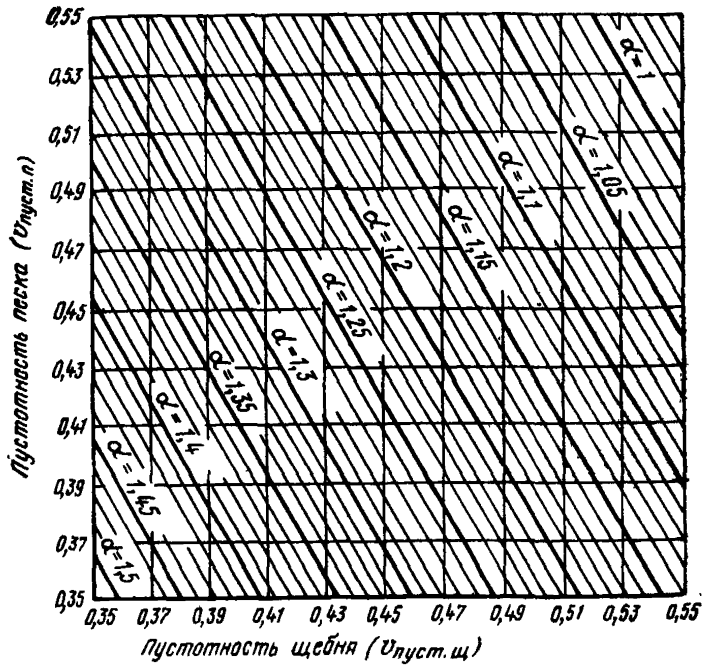

Рис. 7. Номограмма для определения коэффициента заполнения пустот и раздвижки зерен щебня (гравия) раствором (α) в зависимости от пустотности песка и щебня

г) абсолютный объем цементного теста определяется по формуле

$$V_{ц.т} = B + \frac{Ц}{\gamma_ц}; \qquad (10)$$

д) абсолютный объем заполнителей определяется по формуле

$$V_з = 1000 - V_{ц.т}; \qquad (11)$$

е) соотношение между фракциями щебня устанавливается на основе выбора их смесей, имеющих наибольшую объемную массу и наименьшую пустотность. При двух фракциях щебня, например с $НК$=40 мм, указанное определение выполняют следующим образом. Составляют три смеси (по массе): 1-я смесь — 40% мелкой и 60% крупной фракции; 2-я смесь — 50% мелкой и 50% крупной фракции; 3-я смесь — 60% мелкой и 40% крупной фракции.

Составленные смеси фракций щебня тщательно перемешивают и определяют объемную массу смеси в рыхлонасыпанном (стандартном) состоянии. За основу принимают смесь с наибольшей объемной массой. Если объемные массы смесей окажутся близкими между собой и мелкая фракция дефицитна, то принимается смесь с меньшим содержанием мелкой фракции.

Таблица 27

Число фракций щебня	Предельная крупность щебня, мм	Размеры фракций, мм	Оптимальное содержание фракции в смеси щебня по массе, %	Ориентировочная усредненная объемная насыпная масса смеси фракций, кг/л	Смеси с большим содержанием фракции	
					мелкой	крупной
2	20	5—10 10—20	35 65	1,4	50 50	20 80
	40	5—20 20—40	45 55	1,46	60 40	25 75
	70	5—40 40—70	55 45	1,52	70 30	37 63
	120	5—70 70—120	55 45	1,54	70 30	65 35
3	40	5—10 10—20 20—40	18 26 56	1,47	23 40 37	12 12 76
	70	5—20 20—40 40—70	26 28 46	1,53	32 43 25	18 18 64
	120	5—40 40—70 70—120	32 24 44	1,55	40 30 30	24 16 60
	150	5—40 40—70 70—150	27 20 53	1,57	35 25 40	18 12 70
4	70	5—10 10—20 20—40 40—70	12 14 28 46	1,54	16 16 40 28	9 10 17 64
	120	5—20 20—40 40—70 70—120	16 16 24 44	1,56	20 20 30 30	13 10 17 60
	150	5—20 20—40 40—70 70—150	14 12 20 54	1,58	17 18 25 40	11 7 12 70

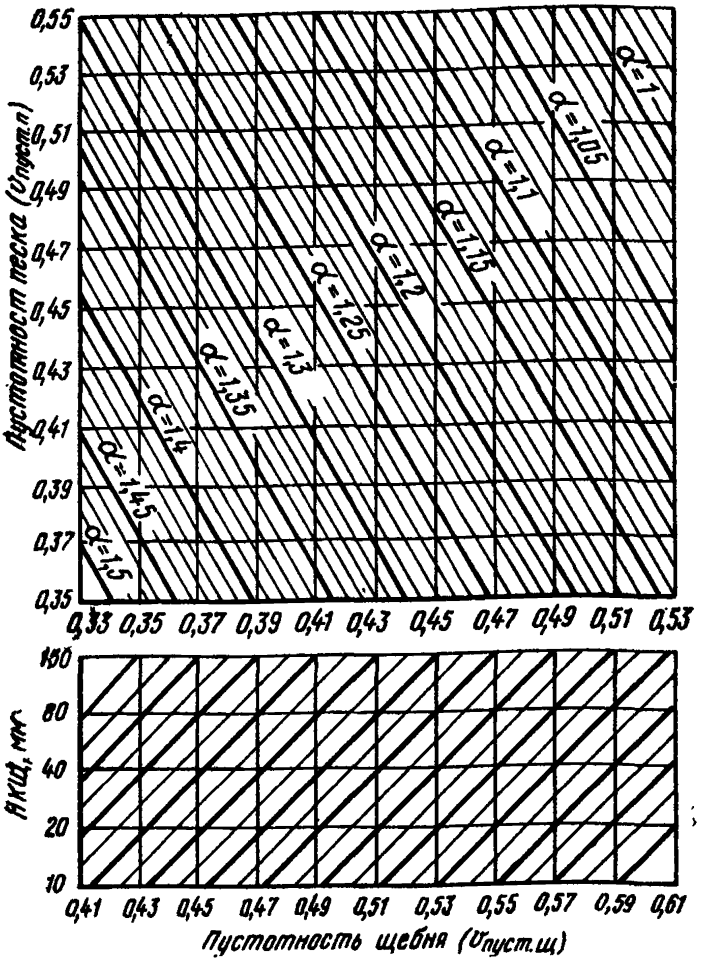

Рис. 8. Номограмма для определения коэффициента α в зависимости от крупности щебня, пустотности песка и щебня (гравия)

При двух — четырех фракциях щебня определение оптимального соотношения между ними можно принимать по табл. 27 или устанавливать опытным путем;

ж) расход щебня, кг/м³, определяется по формуле

$$Щ = \frac{\gamma_{\text{нас.ш}} \cdot 1000}{1 + V_{\text{пус.щ}}(\alpha - 1)} \qquad (12)$$

Значение α устанавливается: для бетонных смесей, уплотняемых вибрацией (обычные конструкции) по номограмме рис. 7, а для тонкостенных и густоармированных конструкций (из пластичных и литых смесей) — по номограмме рис. 8. Номограммы построены для бе-

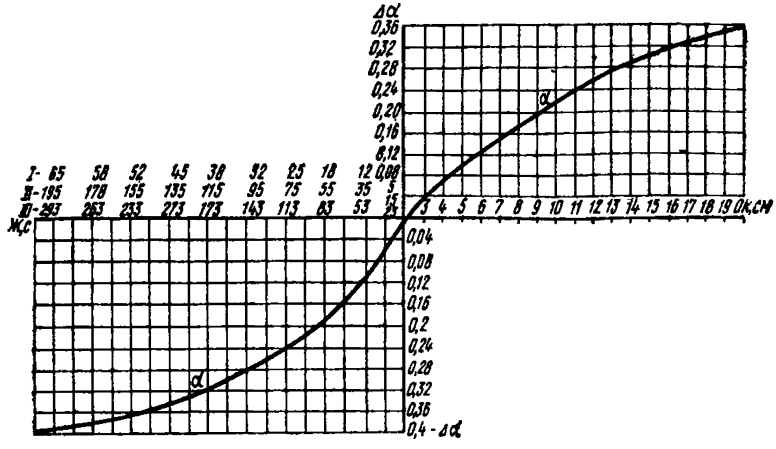

Рис. 9. График для уточнения коэффициента α в зависимости от жесткости и подвижности бетонной смеси (Δα — изменение значения α, установленного по номограммам рис. 7 и 8)

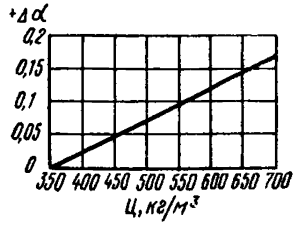

Рис. 10. График для уточнения коэффициента α при расходе цемента свыше 350 кг/м³ бетона (обозначение Δα — см. рис. 9)

тонных смесей пластичностью 2 см, жесткостью 5 с по ГОСТ 10181—76), 15 с (по упрощенному способу), 23 с (по техническому вискозиметру) при расходах цемента до 350 кг/м³ бетона. При использовании гравия значение α, установленное по номограммам, уменьшается на 0,04—0,05.

При подборе составов бетона с другой осадкой конуса или жесткостью и при других расходах цемента значение α вначале устанавливается по указанным номограммам, а затем уточняется в зависимости от пластичности по графику (рис. 9) и от расхода цемента по графику (рис. 10). В этом случае расход щебня определяется по формуле

$$Щ = \frac{\gamma_{\text{нас.щ}} \cdot 1000}{1 + V_{\text{пус.щ}} [(\alpha \pm \Delta\alpha_{\text{о.к}} + \Delta\alpha_{\text{ц}}) - 1]}, \qquad (12а)$$

где $\Delta\alpha_{\text{о.к}}$ — уточнение α по осадке конуса;
$\Delta\alpha_{\text{ц}}$ — уточнение α по расходу цемента;

з) расход песка на 1 м³ бетона определяется по формуле

$$П = \left[1000 - \left(\frac{Щ}{\gamma_{\text{щ}}} + В + \frac{Ц}{\gamma_{\text{ц}}}\right)\right] \gamma_{\text{п}} \qquad (13)$$

или

$$П = (V_{\text{в}} - V_{\text{щ}})\, \gamma_{\text{п}}; \qquad (13а)$$

и) расчетная объемная масса бетонной смеси, кг/м³, определяется по формуле

$$\gamma_{б.с}^{т} = В + Ц + П + Щ. \qquad (14)$$

При точном определении плотности составляющих фактическая объемная масса бетонной смеси должна быть равна или близка к теоретической (расчетной) объемной массе. Допускается отклонение ±1%, при большем отклонении состав бетона уточняется по фактической объемной массе бетонной смеси;

к) абсолютный объем материалов определяется по формуле

$$V_м = В + \frac{Ц}{\gamma_ц} + \frac{П}{\gamma_п} + \frac{Щ}{\gamma_щ}. \qquad (15)$$

В бетонных смесях пластичностью более 1—2 см при точном определении плотности составляющих абсолютный объем материалов должен равняться 1000 л. Возможно отклонение в пределах 1% за счет вовлеченного воздуха, который обычно не учитывается. В жестких бетонных смесях за счет защемленного воздуха абсолютный объем материалов в зависимости от показателя удобоукладываемости колеблется в пределах 990—950 л.

Пример. Требуется подобрать состав тяжелого бетона, к которому не предъявляется иных требований, кроме прочности. Марка бетона 300, $ОК$=6 см.

Характеристика материалов. Цемент портландский марки 500, активностью 485 кгс/см²; $\gamma_ц$=3,1, $НГЦТ$=25%, минералогический состав — среднеалюминантный. Песок горный кварцевый; $\gamma_п$=2,63, $\gamma_{нас\ п}$=1,47, $V_{пус.п}$=0,44, $М_{кр}^{п}$=2,1; содержание органических примесей — в пределах нормы; глины, пыли, ила — 3%. Щебень известняковый; $R_{к.п}$=800 кгс/см², $\gamma_щ$=2,65; $\gamma_{нас.щ}$=1,32, $V_{пус.щ}$=0,503, $КЩ$=5—20 мм (одна фракция). Содержание глины, пыли, ила — 2%, каменной мелочи (частиц менее 5 мм) — 5%.

Производственные условия: средний уровень производства ($С_п$=13%), дозировка составляющих по массе, уплотнение бетонной смеси вибрированием. Условия твердения: пропаривание с обеспечением 70%-ной прочности. Заданная прочность должна быть получена в 28-суточном возрасте.

Расчет состава бетона производится в следующем порядке. Определяем:

а) предварительное водоцементное отношение по формуле (7), табл. 22 и 23:

$$В/Ц = \frac{0{,}55 \cdot 485}{\frac{300}{0{,}95 \cdot 0{,}95} + 0{,}275 \cdot 485} = 0{,}572;$$

$$Ц/В = \frac{1}{0{,}572} = 1{,}76.$$

Значение $А$ уточняем в зависимости от качества применяемых материалов и $Ц/В$ по рис. 6. Значения поправки $\Sigma\Delta А$ приведены в табл. 28.

Таблица 28

Вид поправки		Величина поправки
По $ОК$	ΔA_1	—0,015
» $М^{п}_{кр}$	ΔA_2	—0,015
» $НГЦТ$	ΔA_3	—0,03
» $НКЩ$	ΔA_4	—0,02
» $Ц/В$	ΔA_5	—
» $R_{н.п}/R_б$	ΔA_6	—
	$\Sigma\Delta A$	—0,08

б) расчетное водоцементное отношение по формуле (7а), табл. 22 и 23:

$$В/Ц = \frac{(0{,}55 - 0{,}08)\,485}{\frac{300}{0{,}95 \cdot 0{,}95} + 0{,}5\,(0{,}55 - 0{,}08)\,485} = 0{,}51;$$

$$Ц/В = \frac{1}{0{,}51} = 1{,}96;$$

в) предварительный расход воды $В_1$ по рис. 5:

$$В_1 = 195 \text{ л/м}^3.$$

Расход воды уточняется в зависимости от качества применяемых материалов (см. табл. 25) и сводится в табл. 29.

Таблица 29

Вид поправки		Величина поправки
По породе крупного заполнителя (известняка)	ΔB_1	+4
По виду крупного заполнителя (щебня)	ΔB_2	—
» $М^{п}_{кр} = 2{,}1$	ΔB_3	+7
» $НГЦТ = 25\%$	ΔB_4	— 2
» содержанию в щебне пыли и ила (каменной мелочи)	ΔB_5	+2
По содержанию в песке ила и пыли (но не глины)	ΔB_6	—
	$\Sigma\Delta B$	+1

г) предварительный расход цемента по формуле (9):

$$Ц = \frac{195 + 1}{0{,}51} = 384;$$

д) добавку воды на повышенный расход цемента в соответствии с табл. 25:

$$\frac{384-350}{10}\,1=3{,}4.$$

Добавляем 4 л, так как при увеличении воды при постоянном $В/Ц=0{,}51$ расход цемента возрастает;

е) окончательный расход воды по формуле (8):

$$В=196+4=200\text{ л};$$

ж) окончательный расход цемента по формуле (3):

$$Ц=\frac{200}{0{,}51}=392\text{ кг/м}^3;$$

з) абсолютный объем цементного теста по формуле (10):

$$V_{ц.т}=200+\frac{392}{3{,}1}=326\text{ л/м}^3;$$

и) абсолютный объем заполнителей по формуле (11):

$$V_з=1000-326=674\text{ л/м}^3.$$

При $НКЩ=5$—20 мм принимается одна фракция;

к) расход щебня по формуле (12а):

$$Щ=\frac{1{,}32\cdot 1000}{1+0{,}503\,[(1{,}13+0{,}12+0{,}02)-1]}=$$

$$=\frac{1320}{1+0{,}503\cdot 0{,}27}=1165\text{ кг/м}^3,$$

где $\alpha=1{,}13$ (по рис. 7);
$\Delta\alpha_{о\,к}=0{,}12$ ($ОК=6$ см по рис. 9);
$\Delta\alpha_ц=0{,}02$ ($Ц=392$ кг/м³ по рис. 10);

л) расход песка по формуле (13а):

$$П=\left(674-\frac{1165}{2{,}65}\right)2{,}63=618\text{ кг/м}^3;$$

м) объемную массу бетонной смеси по формуле (14):

$$\gamma_{б.с}=200+392+618+1165=2375\text{ кг/м}^3;$$

н) абсолютный объем материалов по формуле (15):

$$V_м=200+126+235+439=1000\text{ л/м}^3.$$

7. ПОДБОР СОСТАВА МЕЛКОЗЕРНИСТОГО (ПЕСЧАНОГО) БЕТОНА

7.1. Расчет состава бетона по формулам и графикам производится в следующем порядке:

а) водоцементное отношение для песчаного бетона определяется по формуле (7). Значение $А$ определяется в зависимости от чистоты песка по табл. 30.

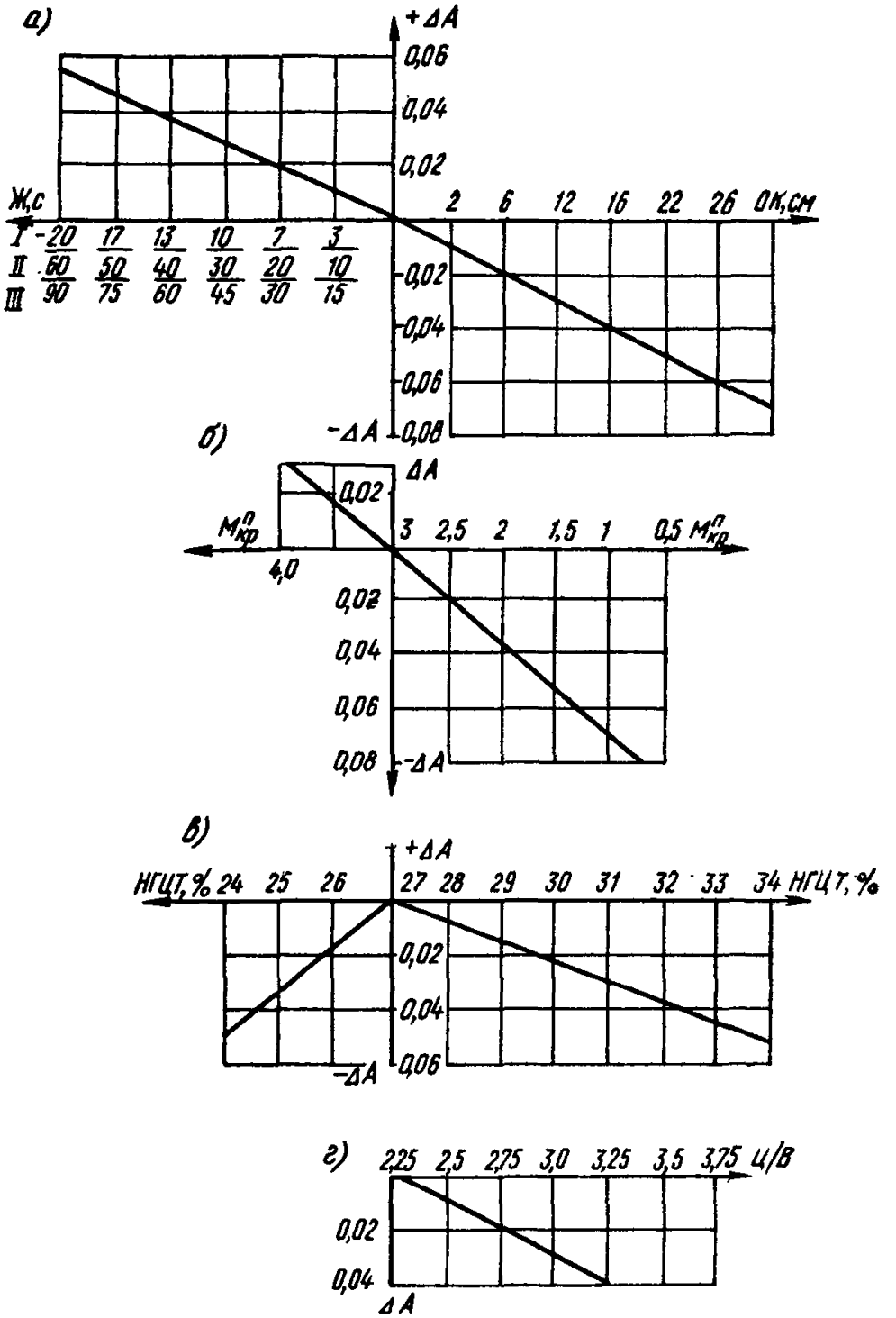

Рис. 11. График для уточнения коэффициента А в зависимости от пластичности и жесткости бетонной смеси (*а*), модуля крупности песка (*б*), нормальной густоты цементного теста (*в*) и цементно-водного отношения (*г*):

I, II, III — определение жесткости (см. рис. 1)

Таблица 30

Бетон	Значение A при содержании в песке пыли, ила и глины, %, до			
	1	2	3	5
Песчаный	0,52	0,51	0,5	0,47

Коэффициенты K_1 и K_2 принимаются по табл. 23.

Данные табл. 30 установлены на песке с $M^{п}_{кр}=3$, цементе с $НГЦТ=27\%$ при $Ц/В \leqslant 2{,}25$ и жесткости: 5 с — по ГОСТ 10181—76; 15 с — по упрощенному способу; 23 с — по техническому вискозиметру. На практике применяются пески разной крупности, песчано-бетонные смеси разной подвижности и жесткости, песчаный бетон разных марок (при различных $Ц/В$).

Значения коэффициента A уточняются по графику рис. 11*, а поправка $\Sigma\Delta A$ подсчитывается по табл. 31.

Таблица 31

Показатели для определения поправки	Поправка
По подвижности или жесткости смеси *ОК*, *Ж*	$\pm\Delta A_1$
» модулю крупности песка $M^{п}_{кр}$	$\pm\Delta A_2$
» нормальной густоте цементного теста *НГЦТ*	$\pm\Delta A_3$
» цементно-водному отношению *Ц/В*	$-\Delta A_4$
	$\Sigma\Delta A$

Уточненное *В/Ц* с учетом поправки устанавливается по формуле (7а);

б) расход песка, кг/м³, определяется по формуле

$$П = \frac{\gamma_{нас.п} V_{п.б.с}}{1 + V_{пус.п}(\alpha_{ц.т} - 1)}, \qquad (16)$$

где $\alpha_{ц.т}$ определяется по рис. 12 (рис. 12 построен при $Ц/В \leqslant 2{,}25$; $НГЦТ = 28\%$; $M^{п}_{кр} = 1$);

$V_{п.б.с}$ — устанавливается по рис. 13;

в) абсолютный объем песка, л/м³, определяется по формуле

$$V_{п} = \frac{П}{\gamma_{п}}; \qquad (17)$$

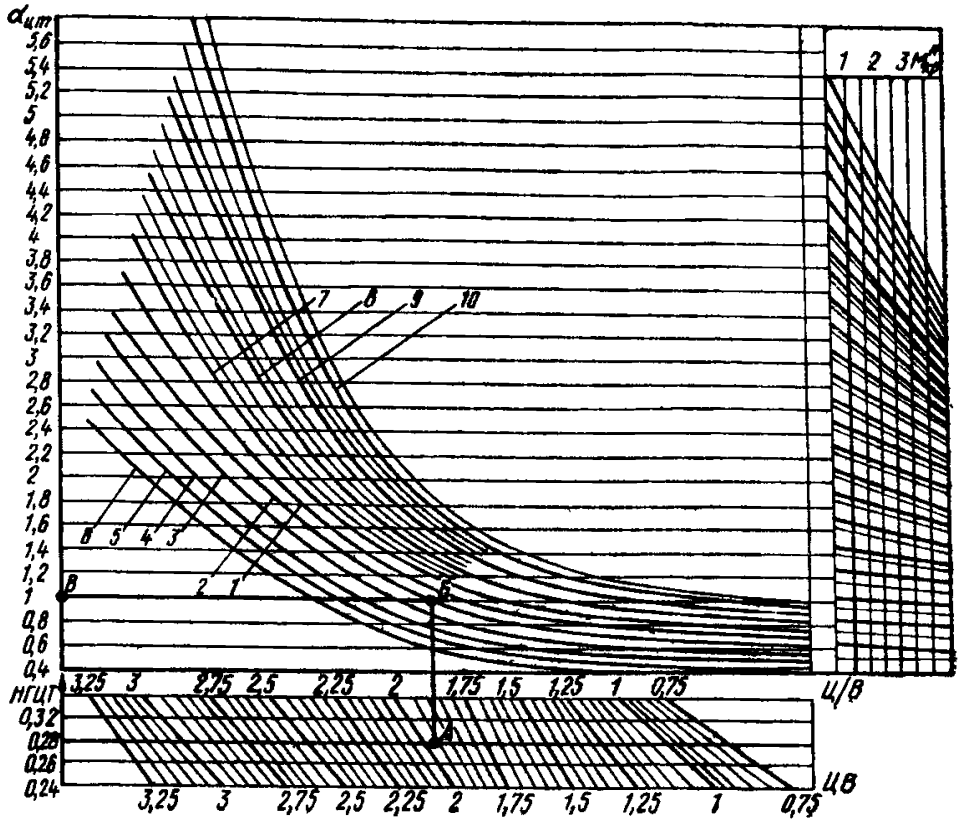

Рис. 12. Номограмма для определения коэффициента заполнения пустот и раздвижки зерен песка цементным тестом ($\alpha_{ц.т}$) в зависимости от подвижности (жесткости) смеси, $Ц/В$, $М^{п}_{кр}$, $НГЦТ$

Ж, с: кривые *1* — 3, 10, 15; *2* — 7, 20, 30; *3* — 10; 30, 45; *4* — 13, 40, 60; *5* — 17, 50, 75; *6* — 20, 60, 90 (жесткость определялась тремя способами, см. рис. 1); *ОК*, см: кривые *7* — 2; *8* — 6; *9* — 14 и *10* — 22

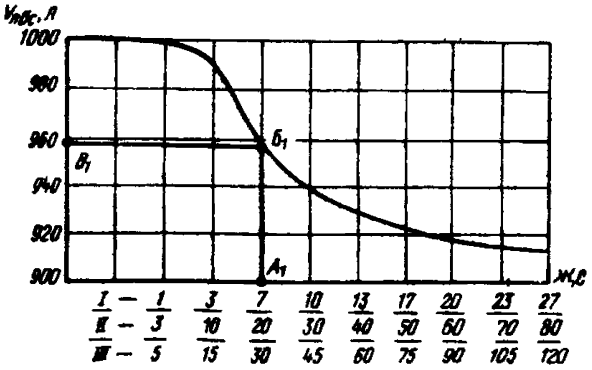

Рис. 13. График для определения абсолютного объема песчанобетонной смеси ($V_{п.б.с}$) в зависимости от жесткости бетонной смеси

I, II, III — определение жесткости (см. рис. 1)

г) объем вовлеченного (защемленного) воздуха, л/м³, определяется по формуле

$$V_в = 1000 - V_{п.б.с}; \qquad (18)$$

д) абсолютный объем цементного теста, л/м³, определяется по формуле

$$V_{ц.т} = 1000 - (V_п + V_в); \quad (19)$$

е) выход цементного теста из 1 кг цемента при расчетном $В/Ц$ определяется по формуле

$$V'_{ц.т} = \frac{1}{\gamma_ц} + \frac{В}{Ц} = \frac{1}{3,1} + \frac{В}{Ц}; \quad (20)$$

ж) расход цемента, кг/м³, определяется по формуле

$$Ц = \frac{V_{ц.т}}{V'_{ц.т}}; \quad (21)$$

з) расход воды, л/м³, определяется по формуле

$$В = Ц \cdot В/Ц; \quad (22)$$

и) теоретическая объемная масса смеси, кг/м³, определяется по формуле

$$\gamma_{п.б.с} = Ц + П + В; \quad (23$$

к) уточнение расчетного состава бетона.

Для уточнения расчетного состава песчаного бетона затворяется пробный замес. Если жесткость окажется заданной, то этот состав принимается за основу. Если жесткость окажется выше требуемой, то добавляют цемент и воду (при расчетном $В/Ц$), а если меньше заданной — песок.

После уточнения состава бетона по жесткости или подвижности смеси производится уточнение $В/Ц$, для чего затворяется три состава бетона: один состав при расчетном $В/Ц$ и уточненном составе и два дополнительных при $В/Ц$, отличающемся от основного на $\pm 0,05$. После испытания кубиков принимается окончательный состав песчаного бетона, который имеет заданную прочность или превышающую ее на 5—10%.

Пример. Требуется подобрать состав мелкозернистого (песчаного) бетона марки 300, жесткостью: 7с — по ГОСТ 10181—76, 20 с — по упрощенному способу, 30 с — по техническому вискозиметру.

Характеристика материалов. Песок: $\gamma_{нас.п} = 1,46$, $\gamma_н = 2,61$, $V_{пус.п} = 44$, $М^п_{кр} = 1$, содержание пыли и ила 1%. Цемент портландский марки 500 (по паспорту), минералогический состав среднеалюминатный, $НГЦТ = 28\%$, $\gamma_ц = 3,1$.

Дозировка — по массе, уровень производства работ средний ($С_п = 13\%$), условия твердения — пропаривание.

Расчет ведется в следующей последовательности. Определяем:

а) предварительное $В/Ц$ по формуле (7):

$$В/Ц = \frac{0,52 \cdot 500}{\frac{300}{0,95 \cdot 0,95} + 0,5 \cdot 0,52 \cdot 500} = 0,565;$$

$$Ц/В = \frac{1}{0,565} = 1,77,$$

где $А = 0,52$ (по табл. 30); $К_1 = 0,95$ и $К_2 = 0,95$ (по табл. 23).

Уточняем коэффициент A по графику (см. рис. 11) и по табл. 32 подсчитываем поправку $\Sigma\Delta A$.

Таблица 32

Вид поправки		Величина поправки
По $M_{кр}^{п}$	ΔA_1	—0,07
» *Ж*	ΔA_2	+0,02
» *НГЦТ*	ΔA_3	—0,01
	$\Sigma\Delta A$	—0,06

б) расчетное *В/Ц* по формуле (7а):

$$В/Ц = \frac{(0{,}52 - 0{,}06)\,500}{\frac{300}{0{,}95 \cdot 0{,}95} + 0{,}5\,(0{,}52 - 0{,}06)\,500} = \frac{230}{448} = 0{,}51;$$

$$Ц/В = \frac{1}{0{,}51} = 1{,}96;$$

в) расход песка по формуле (16);

$$П = \frac{1{,}46 \cdot 958}{1 + 0{,}44\,(1 - 1)} = 1400 \text{ кг/м}^3,$$

где $\alpha_{ц.т} = 1$ (по рис. 12, точки *А*, *Б*, *В*);
$V_{п.б.с} = 958$ (по рис. 13, точки $А_1$, $Б_1$, $В_1$);

г) абсолютный объем песка по формуле (17):

$$V_{п} = \frac{1400}{2{,}61} = 536 \text{ л/м}^3;$$

д) объем защемленного воздуха по формуле (18);

$$V_{в} = 1000 - 958 = 42 \text{ л/м}^3;$$

е) абсолютный объем цементного теста по формуле (19);

$$V_{ц.т} = 1000 - (536 + 42) = 422 \text{ л/м}^3;$$

ж) выход цементного теста из 1 кг цемента по формуле (20);

$$V'_{ц.т} = \frac{1}{3{,}1} + 0{,}51 = 0{,}323 + 0{,}51 = 0{,}833 \text{ л/кг};$$

з) расход цемента по формуле (21);

$$Ц = \frac{422}{0{,}833} = 507 \text{ кг/м}^3;$$

и) расход воды по формуле (22):

$$В = 507 \cdot 0{,}51 = 258 \text{ л/м}^3;$$

к) теоретическую объемную массу бетона по формуле (23):

$$\gamma^{т}_{п.б.с} = 507 + 1400 + 258 = 2165 \text{ кг/м}^3.$$

Уточняем расчетный состав мелкозернистого (песчаного) бетона на пробных затворениях.

Материалы	*Расход материалов на 10 л бетона*
Песок	14 кг
Цемент	5,07 »
Вода	2,58 л

Пробное затворение показало, что фактическая жесткость получилась 7 с (по ГОСТ 10181—76) и 30 с (по техническому вискозиметру), объемная масса 2,17 кг/л. Следовательно, состав бетона подобран правильно. Если жесткость получится значительно меньше заданной, то добавляется песок, а если больше, то цемент и вода (при $В/Ц=0{,}51$). После получения требуемой жесткости определяется объемная масса и расход материалов на замес.

Для уточнения $В/Ц$ затворяем дополнительно еще два состава при $В/Ц=0{,}46$ и $В/Ц=56$. После этого на пробных замесах уточняются жесткость, объемная масса и расход материалов на 1 м³ бетона. Затем делаем три замеса, изготовляем бетонные кубики и на основе испытаний устанавливаем окончательный состав бетона для производства. Все данные по экспериментальной проверке сведены в табл. 33.

Таблица 33

Материалы и характеристики песчаного бетона	Состав		
	2	1	3
Цемент, кг	5,9	5,07	4,2
Песок, кг	13,08	14	15,15
Вода, л	2,72	2,58	2,35
Жесткость, с	5/19/29	6/20/30	7/22/32
Объемная масса, кг/л	2,17	2,17	2,17
Водоцементное отношение	0,46	0,51	0,56
Прочность, кгс/см²	350	332	300

Примечания: 1. С учетом коэффициентов K_1 и K_2 в формуле (7) прочность бетона должна быть 330 кгс/см². Из таблицы видно, что состав 2 имеет завышенную прочность, а состав 3 — заниженную. Для производства принимаем состав 1.

2. Жесткость определяется по ГОСТ 10181—76, упрощенному способу и техническому вискозиметру.

7.2. Расчет состава бетона по упрощенному способу[1] производится в следующем порядке:

а) прочность на сжатие и $Ц/В$ для мелкозернистого (песчаного)

[1] См. «Инструкцию по приготовлению мелкозернистых (песчаных) бетонов». СН 488-76. М., Стройиздат, 1977.

бетона на песке среднего качества, твердеющего в естественных условиях с пропариванием, определяются по формулам:

$$R_б = 0{,}4R_ц\left(\frac{Ц}{В} - 0{,}43\right); \quad (24)$$

$$Ц/В = \frac{R_б}{0{,}4R_ц} + 0{,}43; \quad (24а)$$

б) количество материалов на 1 м³ смеси определяется по формулам:

$$Ц = \frac{\gamma_{п.б.с}}{1 + \frac{п' + д'_м + в'}{ц'}}; \quad (25)$$

$$П = Ц\,\frac{п'}{ц'}; \quad (26)$$

$$Д_м = Ц\,\frac{д'_м}{ц'}; \quad (27)$$

$$В = Ц\,\frac{в'}{ц'}, \quad (28)$$

где $Ц$, $П$, $Д_м$ и $В$ — расходы цемента, песка, минеральной добавки и воды, кг/м³;

$ц'$, $п'$, $д^1_м$, $в_1$ — то же, в пробных замесах;

$\gamma_{п.б.с}$ — объемная масса мелкозернистой бетонной смеси.

в) требования по подвижности или жесткости смеси, прочности, водонепроницаемости и морозостойкости мелкозернистого бетона определяются проектом и проверяются на опытных замесах и при испытании образцов.

Пример. Требуется подобрать состав мелкозернистого бетона марки М 200 естественного твердения на портландцементе марки М 400 (если известна активность цемента, в расчет вводят ее) и песке средней крупности с насыпной объемной массой 1500 кг/см³. Подвижность смеси 5 с (по ГОСТ 10181—76). Расчет состава бетона производится в следующей последовательности. Определяем:

а) требуемое $Ц/В$ по формуле (24а):

$$Ц/В = \frac{200}{0{,}4 \cdot 400} + 0{,}43 = 1{,}68\ (В/Ц = 0{,}6);$$

б) количество материалов на пробный замес объемом 7 л, принимая осредненный расход воды 220 л/м³ и расход песка 1 м³/м³;

$$В' = \frac{220 \cdot 7}{1000} = 1{,}54\ л;$$

$$Ц' = В' \cdot Ц/В = 1{,}54 \cdot 1{,}68 = 2{,}59\ кг;$$

$$П' = \frac{1 \cdot 1500 \cdot 7}{1000} = 10{,}5\ кг.$$

Готовим первый пробный замес и определяем жесткость смеси. Она получена значительно большей.

Вводим добавку цемента и воды по 0,1 от их содержания в пробном замесе до достижения заданной жесткости 5 с. Потребова-

лось ввести одну добавку. Содержание материалов в откорректированном пробном замесе:

$$в' = 1,54 + 0,154 = 1,69 \text{ кг};$$
$$ц' = 2,59 + 0,259 = 2,85 \text{ кг};$$
$$п' = 10,5 \text{ кг}.$$

Состав бетонной смеси по массе $Ц : П : В = 1 : 3,7 : 0,6$;

в) объемную массу ($\gamma_{п.б.с}$) в мерном цилиндре объемом 1 л, жестко закрепленном на вибростоле, и уплотняем ее 5 с.

Объемная масса получилась $\gamma_{п.б.с} = 2200$ кг/м^3;

г) расход материалов, кг/м^3, смеси:

$$Ц = \frac{2200}{1 + \frac{10,5+1,69}{2,85}} = 417;$$

$$П = 417\frac{10,5}{2,85} = 1536;$$

$$В = 417\frac{1,69}{2,85} = 248.$$

Готовим контрольные образцы-кубы, которые испытываем после пропаривания или в возрасте 28 сут нормального твердения в соответствии с требованиями ГОСТ 10180—74.

Прочность образцов должна оцениваться по ГОСТ 13105—77 и соответствовать заданной марке.

Если прочность бетона получилась больше или меньше заданной, проводится корректировка состава $Ц/В$ подобно изложенному в разд. 8 настоящего Руководства.

При необходимости иметь водонепроницаемый, морозостойкий или коррозионно-стойкий бетон необходимо соблюдать рекомендации по выбору вяжущего и проводить испытания образцов мелкозернистого бетона на эти воздействия.

Для снижения расхода цемента в мелкозернистом бетоне низких марок следует применять минеральные добавки (молотый гранулированный шлак, золу-унос тепловых электростанций и др.), а в бетоне высоких марок — пластифицирующие и воздухововлекающие добавки, которые, кроме того, повышают морозостойкость мелкозернистого бетона.

8. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ПРОВЕРКА И КОРРЕКТИРОВАНИЕ РАСЧЕТНОГО СОСТАВА БЕТОНА, ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПРОИЗВОДСТВЕННОГО СОСТАВА БЕТОНА (С УЧЕТОМ ВЛАЖНОСТИ ЗАПОЛНИТЕЛЕЙ) И РАСЧЕТ МАТЕРИАЛОВ НА ЗАМЕС БЕТОНОСМЕСИТЕЛЯ

ОБЩИЕ ПРИНЦИПЫ КОРРЕКТИРОВКИ РАСЧЕТНОГО СОСТАВА

8.1. Состав бетона, рассчитанный по любому из трех методов, изложенных в разд. 3, 4 и 5, проверяется и при необходимости корректируется по подвижности, количеству песка и требуемой прочности путем изготовления опытных замесов и последующего испытания образцов бетона.

Корректирование подвижности смеси можно производить двумя способами.

8.2. Изготовляют первый замес по рассчитанному составу объемом 10 л или более в зависимости от крупности заполнителя и определяют подвижность смеси по осадке конуса или ее жесткость по ГОСТ 10181—76, а также объемную массу бетона после ее уплотнения в форме для контрольного образца. Если подвижность смеси получилась менее требуемой, то в опытный замес добавляются 5—10% цемента и воды с соблюдением принятого соотношения *В/Ц*. Если подвижность получилась более требуемой, то в замес добавляется песок и щебень — 5—10% от расчетного в принятом соотношении. Путем нескольких попыток добиваются требуемой подвижности смеси, после чего расчетный состав бетона пересчитывается и делается новый замес для изготовления 3, 6 или 9 контрольных образцов.

8.3. Задачу можно решить и по графику рис. 5. Например, пробный замес на щебне 5—80 мм и с расходом воды 150 л/м³ показал осадку конуса 0,5 см вместо требуемых 2 см (точка *В* на рис. 5). Для получения требуемой подвижности уточняют расход воды на 1 м³ бетона. На график наносят точку, отвечающую расходу воды 150 л и осадке конуса 0,5 см (точка *А*). Из точки *А* проводят кривую, подобную кривым, нанесенным на график, до пересечения с ординатой, соответствующей осадке конуса 2 см (точка *Б*). Из точки *Б* проводят горизонтальную линию и определяют уточненный расход воды — 160 л (точка *Г*). Если необходимо уменьшить подвижность смеси, например 3,5 см (точка *Д*), то на графике проводится линия на уменьшение воды затворения (точка *Е*) до 140 л/м³. Далее состав пересчитывается и изготовляется новый замес для проверки подвижности смеси и изготовления контрольных образцов.

Корректирование содержания песка и щебня при необходимости производится после уточнения подвижности смеси.

8.4. На основе откорректированного состава бетона готовят три замеса: 1 — из бетонной смеси строго рассчитанного состава; 2 и 3 — из смеси с содержанием песка менее или более расчетного приблизительно на 50 кг и с одновременным увеличением или уменьшением содержания щебня на то же количество.

8.5. Можно поступать иначе: рассчитывая новый состав, величину α в контрольных замесях принимать на 0,1 больше или меньше. Далее приготовляют новые замесы, измеряют подвижность или жесткость полученных смесей и принимают тот состав, удобоукладываемость которого лучше (если она не слишком отличается от заданной). Если показатели удобоукладываемости окажутся близки между собой, выбирают состав с меньшим содержанием песка, как правило, обеспечивающий более высокую прочность бетона. Если удобоукладываемость оптимального состава после корректировки будет значительно отличаться от заданной, состав вновь пересчитывают, увеличив или уменьшив содержание цементного теста, и затем опять проверяют.

КОРРЕКТИРОВАНИЕ ВОДОЦЕМЕНТНОГО ОТНОШЕНИЯ

8.6. Когда состав откорректирован пробными затворениями и достигнуты требуемые подвижность и оптимальное количество песка в бетонной смеси, приступают к проверке прочности бетона подобранного состава.

8.7. Готовят образцы-кубы из откорректированного состава и одновременно из двух параллельных, в которых $В/Ц$ принимается большее и меньшее на 0,05. Величину $В/Ц$ изменяют, уменьшая или увеличивая расход цемента, и каждый раз компенсируют это обратным изменением расхода песка, сохраняя объемы раствора и щебня неизменными. Взаимную компенсацию объемов песка и цемента предпочтительнее производить по их абсолютным объемам, а не по массе. На каждый срок испытания готовят не менее трех образцов. Укладка и уплотнение образцов должны соответствовать требованиям ГОСТ 10180—74.

8.8. Образцы в течение 1 сут хранят в формах в помещении с температурой от 16 до 20° С, а затем освобождают из форм и до момента испытания хранят во влажной среде в специальной камере или в периодически увлажняемом песке, опилках и т. д.

8.9. Перед испытанием образцы тщательно осматривают, измеряют грани (с точностью до 1 мм), взвешивают. Испытав бетонные образцы в сроки, соответствующие проекту, корректируют величину $В/Ц$ по результатам контрольных испытаний и в качестве окончательного принимают состав, прочность которого отвечает заданной, с отклонением не более +5—8%.

8.10. Если нет времени ожидать 28 сут для получения прочности контрольных образцов, образцы испытывают через 3 и 7 сут выдерживания или через 4 ч после пропаривания по установленному режиму. В этом случае состав бетона выбирают на основе имеющихся данных по нарастанию прочности бетона на данном цементе и заполнителях по времени.

Примеры корректировки расчетного состава бетона.

Корректирование состава бетона иллюстрируется на расчетном составе, приведенном в примере раздела 6 настоящего Руководства.

УТОЧНЕНИЕ ПОДВИЖНОСТИ СМЕСИ

Затворяется бетон в объеме 10 л при $В/Ц=0{,}51$. Для замеса отвешивается: $Ц=3{,}92$ кг; $В=2$ кг; $П=6{,}18$ кг; $Щ=11{,}65$ кг. Пробное затворение показало, что осадка конуса оказалась 5 вместо 6 см. По рис. 5 уточняется расход воды. Из точки, соответствующей $ОК=5$ см, проводится вертикальная, а из точки, соответствующей $В=200$ л, — горизонтальная линии до их пересечения. Из точки пересечения проводится кривая, подобная кривым рис. 5, до пересечения с вертикальной линией, соответствующей $ОК=6$ см, и по точке пересечения определяется расход воды. Он оказался равным $В=204$ л/м^3.

Уточняется количество материалов на 1 м^3 бетона, номинальный состав бетона и теоретическая объемная масса смеси:

а) расход цемента по формуле (3):

$$Ц = \frac{204}{0{,}51} = 400 \text{ кг/м}^3;$$

б) абсолютный объем цементного теста по формуле (10):

$$V_{ц.т} = 204 + \frac{400}{3{,}1} = 333 \text{ л/м}^3;$$

в) абсолютный объем заполнителей по формуле (11):

$$V_з = 1000 - 333 = 667 \text{ л/м}^3;$$

г) расход щебня по формуле (12):

$Щ = 1165$ кг/м³, или 439 л (остался без изменения);

д) расход песка по формуле (13а):

$$П = (667 - 439)\,2{,}63 = 600 \text{ кг/м}^3;$$

е) номинальный состав бетона

$$Ц:П:Щ:В = 400:600:1165:204 = 1:1{,}5:2{,}9:0{,}51;$$

ж) теоретическая объемная масса бетона 2369 кг/м³.

УТОЧНЕНИЕ РАСХОДА ПЕСКА

Расход песка, определенный по изложенной методике, является оптимальным. Однако при необходимости можно произвести эту проверку. Затворяем три состава; основной 1 и два дополнительных 2 и 3 с расходом песка, бо́льшим и меньшим на 50 кг/м³ (так как разница в плотности песка и щебня незначительна) с соответствующим изменением на 50 кг количества щебня. Пробные затворения показали, что осадка конуса (или жесткость) основного состава соответствует требуемой или превышает осадку, или менее жесткости двух смежных составов. Поэтому состав 1 остается для последующей проверки на прочность бетона.

УТОЧНЕНИЕ ВОДОЦЕМЕНТНОГО ОТНОШЕНИЯ

Затворяем три пробных состава: основной 1 при $В/Ц = 0{,}51$ и два дополнительных 4 и 5 при $В/Ц = 0{,}46$ и 0,56. После испытания кубиков в возрасте 28 сут (или в другие сроки) определяют фактическую прочность бетона (табл. 34).

Таблица 34

Материалы и характеристики бетона	Уточнение расхода песка			Уточнение $В/Ц$		
	Состав					
	2	1	3	4	1	5
Цемент, кг	4	4	4	4,44	4	3,64
Песок, кг	5,5	6	6,5	5,63	6	6,3
Щебень, кг	12,15	11,65	11,15	11,65	11,65	11,65
Вода, л	2,04	2,04	2,04	2,04	2,04	2,04
$В/Ц$	0,51	0,51	0,51	0,46	0,51	0,56
Осадка конуса, см	5	6	5	6	6	6
Жесткость[1], с	12	9	11	9	9	9
Прочность бетона на сжатие, кгс/см²	—	—	—	380	328	296

[1] По техническому вискозиметру.

Примечание. По результатам испытания бетона для производства принимаем состав 1.

ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ СОСТАВ БЕТОНА И РАСЧЕТ КОЛИЧЕСТВА МАТЕРИАЛОВ НА ЗАМЕС БЕТОНОСМЕСИТЕЛЯ

8.11. Лабораторный подбор состава бетона производят обычно на сухих материалах. Состав бетона, подобранный таким образом, принято называть номинальным. В производственных условиях применяемые материалы обычно бывают влажными, поэтому номинальный состав бетона необходимо пересчитать, учитывая влагу, содержащуюся в заполнителях, и корректируя количество воды и заполнителей, вводимых в замес.

Порядок такой корректировки показан на конкретном примере.

а) Допустим, что в лаборатории подобран состав бетона, приведенный ниже.

Цемент	336 кг/м³
Щебень	1332 »
Песок	636 »
Вода	150 л/м³
Суммарная масса материалов	2454 кг

Номинальный состав 1 : 1,89 : 3,97 при $В/Ц = 0{,}47$

б) Допустим, что в производственных условиях щебень имеет влажность 1% по массе и песок — 4%. Тогда на 1 м³ бетона необходимо взять влажного щебня $1332 \cdot 1{,}01 = 1345$ кг и влажного песка $636 \cdot 1{,}04 = 661$ кг.

В этом количестве заполнителей будет содержаться воды $1332 \times 0{,}01 + 636 \cdot 0{,}04 = 38$ л. На это количество следует убавить объем воды, указанный в номинальном составе.

Откорректированный производственный состав бетона на влажных заполнителях будет следующим:

Цемент	336 кг
Щебень	1345 »
Песок	661 »
Вода	112 л
Суммарная масса материалов	2454 кг

Производственный состав 1 : 1,97 : 4 при $В/Ц = 0{,}47$

в) Так как объем бетоносмесителя чаще всего таков, что выход готовой бетонной смеси не равен 1 м³, то для составления дозировки материалов на один замес необходимо состав бетона, рассчитанный на 1 м³ бетона, пересчитать в соответствии с емкостью бетоносмесителя. В новых моделях бетоносмесителей емкость их барабана указывается в литрах готового замеса бетонной смеси ($V_{зам}$), например 330, 800, 1600 л. В старых моделях емкость бетоносмесителей указывалась по суммарному объему загрузки сухих компонентов бетона — заполнителей и цемента ($V_м$), например 250, 500, 1200 и и 2400 л.

При использовании новых моделей бетоносмесителей для составления дозировки на замес необходимо количество каждого компонента из производственного состава пересчитать по формулам:

$$Ц' = Ц\,\frac{V_{зам.}}{1000}; \quad Щ' = Щ\,\frac{V_{зам}}{1000} \text{ и т. д.}$$

При использовании старых моделей бетоносмесителей следует определить по производственному составу суммарный насыпной объем всех сухих компонентов бетона ($\Sigma V_{сух}$) в литрах и определить соотношение

$$\eta = \frac{V_м}{\Sigma V_{сух}} = \frac{V_м}{V_ц + V_щ + V_п}.$$

Затем массу каждого компонента надо умножить на полученный коэффициент η и определить тем самым производственную дозировку.

Для нашего примера в случае объема барабана бетоносмесителя новой модели 330 л (по выходу) следует массу каждого компонента производственного состава бетона умножить на 0,33. Получим дозировку на замес:

$$Ц = 111 \text{ кг}; \quad Щ = 443 \text{ кг}; \quad П = 218 \text{ кг}; \quad В = 37 \text{ л}.$$

Всего 810 кг.

При объеме барабана бетоносмесителя старой модели 500 л (по загрузке) определяем суммарный насыпной объем сухих материалов в нашем номинальном составе:

$$\Sigma V_{сух} = \frac{Ц}{1{,}1} + \frac{Щ}{1{,}5} + \frac{П}{1{,}56} = 306 + 890 + 408 = 1600 \text{ л}.$$

При этом

$$\eta = \frac{500}{1600} = 0{,}312.$$

Умножая массу каждого компонента производственного состава на коэффициент $\eta = 0{,}312$, получим дозировку на замес:

$$Ц = 105 \text{ кг}; \quad Щ = 419 \text{ кг}; \quad П = 206 \text{ кг}; \quad В = 35 \text{ л}.$$

Всего 765 кг.

Расход материалов на замес можно определить по коэффициенту выхода бетона. В этом случае вначале определяется коэффициент выхода бетона при сухих заполнителях, а затем расход материалов на замес с учетом влажности заполнителей исходя из производственного состава бетона.

Коэффициент выхода бетона $k_в$ устанавливается для лабораторного состава по формуле

$$k_в = \frac{1000}{\frac{Ц}{\gamma_{нас.ц}} + \frac{П}{\gamma_{нас.п}} + \frac{Щ}{\gamma_{нас.щ}}} = \frac{1000}{\frac{336}{1{,}1} + \frac{636}{1{,}56} + \frac{1332}{1{,}5}} = 0{,}625.$$

Зная $k_в$, определяется объем бетона одного замеса. При емкости бетоносмесителя 500 л он будет равен: $0{,}500 \cdot 0{,}625 = 0{,}312$ м³. Умножая массу каждого компонента производственного состава на объем бетона одного замеса, получим дозировку материала на замес бетоносмесителя

$$Ц = 336 \cdot 0{,}312 = 105 \text{ кг}; \; П = 661 \cdot 0{,}312 = 206 \text{ кг};$$

$$Щ = 1345 \cdot 0{,}312 = 419 \text{ кг}; \; В = 112 \cdot 0{,}312 = 35 \text{ л}.$$

9. ПЛАНИРОВАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТОВ И ВЫБОР СОСТАВА БЕТОНОВ С ПРИМЕНЕНИЕМ МАТЕМАТИКО-СТАТИСТИЧЕСКИХ МЕТОДОВ

9.1. Планирование экспериментов и выбор состава бетонов с применением математико-статистических методов рекомендуется производить при использовании на заводе или на стройке нескольких составов бетона по марке и по подвижности (жесткости) бетонной смеси (например, марки М 200, М 300 и М 400 при подвижности 1—3, 4—6 и 8—12 с); при построении зависимостей, необходимых для корректировки состава бетона в процессе его приготовления; при организации производства изделий по новой технологии, а также в случае использования автоматических систем управления технологическим процессом.

9.2. Сущность планирования экспериментов и выбора состава бетонов с применением математико-статистических методов заключается в установлении математической зависимости между заданными свойствами бетона и расходом и свойствами составляющих материалов. Получаемая математическая зависимость используется для назначения и поиска оптимальных составов.

9.3. Построение математических зависимостей производится на основе специальных лабораторных экспериментов с последующим их уточнением в производственных условиях.

9.4. Проведению лабораторных экспериментов должны предшествовать следующие этапы:

уточнение в зависимости от конкретной задачи оптимизируемых параметров (марок бетона, заданных значений удобоукладываемости, специальных требований и т. д.);

выбор факторов, определяющих изменчивость оптимизируемых параметров;

расчет основного исходного состава бетонной смеси;

выбор интервалов варьирования факторов;

выбор плана и условий проведения эксперимента;

расчет всех составов бетонной смеси в соответствии с выбранным планом и реализация эксперимента;

обработка результатов эксперимента с построением математических зависимостей свойств бетонной смеси от выбранных факторов.

9.5. В качестве факторов в зависимости от условий конкретной задачи могут назначаться $В/Ц$ ($Ц/В$) смеси, расход воды (или цемента), расход заполнителей или соотношение между ними (r), показатели качества составляющих материалов, расходы различного рода добавок и т. п.

9.6. Основной исходный состав назначается в соответствии с указаниями разд. 4, 5, 6 настоящего Руководства.

9.7. Значение фактора в основном исходном составе называется основным (средним или нулевым уровнем).

При проведении экспериментов в зависимости от условий стоящей задачи все факторы варьируются или на трех уровнях — среднем (основном), нижнем и верхнем, отстоящих от основного на одинаковую величину, называемую интервалом варьирования, или на двух уровнях — верхнем и нижнем.

Рекомендуемые значения интервалов варьирования факторов приведены в табл. 35.

Таблица 35

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

9.8. Для упрощения записей и последующих расчетов верхний уровень факторов обозначается символом (+1), средний — (0), а нижний — (—1), что равносильно переводу факторов в новый кодовый (нормализованный) масштаб:

$$x_i = \frac{X_i - X_{i0}}{\Delta X_i},$$

где x_i — значение i-го фактора в новом кодовом масштабе;
X_i — значение i-го фактора в натуральном масштабе;
X_{i0} — основной уровень i-го фактора;
ΔX_i — интервал варьирования i-го фактора.

Часто при записи плана проведения эксперимента цифру 1 опускают и кодовая запись уровней фактора имеет вид соответственно: «+», «0» и «—».

9.9. Эксперименты (опытные замесы) в зависимости от числа факторов и условий решаемой задачи проводятся по одному из приведенных в табл. 36—37 планов (или матриц).

Таблица 36

Линейный план экспериментов

а) При числе факторов $k=2$

№ опыта		Матрица планирования (x_i)		Взаимодействие ($x_i x_j$)	Свойства бетона (выход)			
		x_1	x_2	$x_1 x_2$	y_{i1}	y_{i2}	y_{i3}	. . . .
N_1	1	+	+	+				
	2	—	+	—				
	3	+	—	—				
	4	—	—	+				
n_0	5	0	0	0				
	6	0	0	0				
	7	0	0	0				

б) При числе факторов $k=3$

№ опыта		Матрица планирования (x_i)			Взаимодействие $(x_i x_j)$			Свойства бетона (выход)		
		x_1	x_2	x_3	x_1x_2	x_1x_3	x_2x_3	y_{i1}	y_{i2}	. . .
N_1	1	+	+	+	+	+	+			
	2	−	+	+	−	−	+			
	3	+	−	+	−	+	−			
	4	−	−	+	+	−	−			
	5	+	+	−	+	−	−			
	6	−	+	−	−	+	−			
	7	+	−	−	−	−	+			
	8	−	−	−	+	+	+			
n_0	9	0	0	0	0	0	0			
	10	0	0	0	0	0	0			
	11	0	0	0	0	0	0			

в) При числе факторов $k=4$

№ опыта		Матрица планирования (x_i)				Взаимодействие $(x_i x_j)$						Свойства бетона (выход)		
		x_1	x_2	x_3	x_4	x_1x_2	x_1x_3	x_1x_4	x_2x_3	x_2x_4	x_3x_4	y_{i1}	y_{i2}	. . . .
N_1	1	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+			
	2	−	+	+	+	−	−	−	+	+	+			
	3	+	−	+	+	−	+	+	−	−	+			
	4	−	−	+	+	+	−	−	−	−	+			
	5	+	+	−	+	−	−	+	−	+	−			
	6	−	+	−	+	+	+	−	−	+	−			
	7	+	−	−	+	+	−	+	+	−	−			
	8	−	−	−	+	−	+	−	+	−	−			
	9	+	+	+	−	−	+	−	+	−	−			
	10	−	+	+	−	+	−	+	+	−	−			
	11	+	−	+	−	+	+	−	−	+	−			
	12	−	−	+	−	−	−	+	−	+	−			
	13	+	+	−	−	+	−	−	−	−	+			
	14	−	+	−	−	−	+	+	−	−	+			
	15	+	−	−	−	−	−	−	+	+	+			
	16	−	−	−	−	+	+	+	+	+	+			
n_0	17	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0			
	18	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0			
	19	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0			
	20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0			

г) При числе факторов $k=5$

№ опыта	Матрица планирования (x_i)					Взаимодействие ($x_i x_j$)										Свойства бетона (выход)		
	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_1x_2	x_1x_3	x_1x_4	x_1x_5	x_2x_3	x_2x_4	x_2x_5	x_3x_4	x_3x_5	x_4x_5	y_{i1}	y_{i2}	. . . .
1	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+			
2	−	+	+	+	−	−	−	−	+	+	+	−	+	−	−			
3	+	−	+	+	−	−	+	+	−	−	−	+	+	−	+			
4	−	−	+	+	+	+	−	−	−	−	−	−	+	+	−			
5	+	+	−	+	−	+	−	+	−	−	+	−	−	+	−			
6	−	+	−	+	+	−	+	−	−	−	+	+	−	−	+			
7	+	−	−	+	+	−	−	+	+	+	−	−	−	−	+			
8	−	−	−	+	−	+	+	−	+	+	−	+	−	+	−			
N_1 9	+	+	+	−	−	+	+	−	−	+	−	−	−	−	+			
10	−	+	+	−	+	−	−	+	−	+	−	+	−	+	−			
11	+	−	+	−	+	−	+	−	+	−	+	−	−	+	−			
12	−	−	+	−	−	+	−	+	+	−	+	+	−	−	+			
13	+	+	−	−	+	+	−	−	+	−	−	+	+	−	−			
14	−	+	−	−	−	−	+	+	+	−	−	−	+	+	+			
15	+	−	−	−	−	−	−	−	−	+	+	+	+	+	+			
16	−	−	−	−	+	+	+	+	−	+	+	−	+	−	−			
17	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0			
18	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0			
n_0 19	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0			
20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0			
21	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0			

Для примера рассмотрим данные, приведенные в табл. 37 «а». 2-я и 3-я графы табл. 37 «а» представляют собственно матрицу планирования и задают условия проведения каждого опыта. В 4-й и 5-й графах приведены квадраты переменных, получаемые возведением в квадрат данных столбцов 2, 3. Они принимают значение ± 1 или 0 и обозначаются x_i^2. 6-я графа получена построчным перемножением факторов (взаимодействие переменных). Так, для четвертого опыта, согласно плану, факторы $x_1 = -1$, $x_2 = -1$ и должны устанавливаться на нижнем уровне, а расчетное значение взаимодействия $x_1 x_2 = (-1)\ (-1) = +1$. В последующих графах помещаются результаты опытов, так называемые «выходы» (прочность на сжатие, растяжение, В, Мрз и др.).

9.10. При описании прочностных характеристик бетона рекомендуется использовать планы первого порядка (табл. 36«а»—«г»). В случае, когда вид искомой зависимости неизвестен, а также при описании таких характеристик, как жесткость (подвижность) бетонной смеси, следует применять планы второго порядка (см. табл. 37 «а»—«в»).

9.11. При проведении опытных замесов в соответствии с выбранным планом целесообразно опыты в нулевой точке (все факторы на основном уровне) равномерно распределять между всеми остальными, дублируя их через каждые 3—5 замесов.

Таблица 37

Трехуравневый план проведения экспериментов

а) При числе факторов $k=2$ $(N = N_1 + N_\alpha + n_0)$

№ опыта		Матрица планирования (x_i)		Квадраты переменных (x_i^2)		Взаимодействие $(x_i x_j)$	Свойства бетона (выход)			
		x_1	x_2	x_1^2	x_2^2	$x_1 x_2$	y_{i1}	y_{i2}	y_{i3}	y_{i4} . .
1		2	3	4	5	6	7	8	9	10
N_1	1	+	+	+	+	+				
	2	+	−	+	+	−				
	3	−	+	+	+	−				
	4	−	−	+	+	+				
N_α	5	+	0	+	0	0				
	6	−	0	+	0	0				
	7	0	+	0	+	0				
	8	0	−	0	+	0				
n_0	9	0	0	0	0	0				
	10	0	0	0	0	0				
	11	0	0	0	0	0				

б) При числе факторов $k=3$ $(N=N_1+N_\alpha+n_0)$

№ опыта		Матрица планирования (x_i)			Квадраты переменных (x_i^2)			Взаимодействие $(x_i\,x_j)$			Свойства бетона (выход)		
		x_1	x_2	x_3	x_1^2	x_2^2	x_3^2	$x_1\,x_2$	$x_1\,x_3$	$x_2\,x_3$	y_{i1}	y_{i2}	. .
1		2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
	1	+	+	+	+	+	+	+	+	+			
	2	−	+	+	+	+	+	−	−	+			
	3	+	−	+	+	+	+	−	+	−			
N_1	4	−	−	+	+	+	+	+	−	−			
	5	+	+	−	+	+	+	+	−	−			
	6	−	+	−	+	+	+	−	+	−			
	7	+	−	−	+	+	+	−	−	+			
	8	−	−	−	+	+	+	+	+	+			
	9	+	0	0	+	0	0	0	0	0			
	10	−	0	0	+	0	0	0	0	0			
	11	0	+	0	0	+	0	0	0	0			
N_α	12	0	−	0	0	+	0	0	0	0			
	13	0	0	+	0	0	+	0	0	0			
	14	0	0	−	0	0	+	0	0	0			
	15	0	0	0	0	0	0	0	0	0			
n_0	16	0	0	0	0	0	0	0	0	0			
	17	0	0	0	0	0	0	0	0	0			

Объем замеса в каждом опыте устанавливается с учетом числа определяемых характеристик (прочности на сжатие, растяжение, В, Мрз и т. д). Приготовление бетонной смеси, формование образцов, испытание смеси и образцов производится в соответствии с указаниями разд. 4—6 настоящего Руководства и положениями соответствующих стандартов.

9.12. Результаты опытов обрабатывают с использованием методов математической статистики, получая при этом алгебраические уравнения, отражающие связь между исследуемыми свойствами бетона и исходными факторами.

Для планов первого порядка:

а) двухфакторный эксперимент (см. табл. 36 «а»)

$$\hat{y}_i = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_{12}x_1x_2; \qquad (29)$$

б) трехфакторный эксперимент (см. табл. 36 «б»)

$$\hat{y}_i = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_{12}x_1x_2 + b_{13}x_1x_3 + b_{23}x_2x_3; \qquad (30)$$

в) четырехфакторный эксперимент (см. табл. 36 «в»)

в) При числе факторов $k=5$ $(N=N_1+N_\alpha+n_0)$

	№ опыта	Матрица планирования (x_i)					Квадраты переменных (x_i^2)					Взаимодействие $(x_i x_j)$										Свойства бетона (выход)		
		x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_1x_2	x_1x_3	x_1x_4	x_1x_5	x_2x_3	x_2x_4	x_2x_5	x_3x_4	x_3x_5	x_4x_5	y_{i1}	y_{i2}	. . .
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	
N_1	1	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+			
	2	−	+	+	+	−	+	+	+	+	+	−	−	−	+	+	+	−	+	−	−			
	3	+	−	+	+	−	+	+	+	+	+	−	+	+	−	−	−	+	+	−	−			
	4	−	−	+	+	+	+	+	+	+	+	+	−	−	−	−	−	−	+	+	+			
	5	+	+	−	+	−	+	+	+	+	+	+	−	+	−	−	+	−	−	+	−			
	6	−	+	−	+	+	+	+	+	+	+	−	+	−	−	−	+	+	−	−	+			
	7	+	−	−	+	+	+	+	+	+	+	−	−	+	+	+	−	−	−	−	+			
	8	−	−	−	+	−	+	+	+	+	+	+	+	−	+	+	−	+	−	+	−			
	9	+	+	+	−	−	+	+	+	+	+	+	+	−	−	+	−	−	−	−	+			
	10	−	+	+	−	+	+	+	+	+	+	−	−	+	−	+	−	+	−	+	−			
	11	+	−	+	−	+	+	+	+	+	+	−	+	−	+	−	+	−	−	+	−			
	12	−	−	+	−	−	+	+	+	+	+	+	−	+	+	−	+	+	−	−	+			
	13	+	+	−	−	+	+	+	+	+	+	+	−	−	+	−	−	+	+	−	−			
	14	−	+	−	−	−	+	+	+	+	+	−	+	+	+	−	−	−	+	+	+			
	15	+	−	−	−	−	+	+	+	+	−	+	−	−	−	+	+	+	+	+	+			
	16	−	−	−	−	+	+	+	+	+	+	+	+	+	−	+	+	−	+	−	−			
N_α	17	+	0	0	0	0	+	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0			
	18	−	0	0	0	0	+	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0			
	19	0	+	0	0	0	0	+	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0			
	20	0	−	0	0	0	0	+	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0			
	21	0	0	+	0	0	0	0	+	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0			
	22	0	0	−	0	0	0	0	+	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0			
	23	0	0	0	+	0	0	0	0	+	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0			
	24	0	0	0	−	0	0	0	0	+	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0			
	25	0	0	0	0	+	0	0	0	0	+	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0			
	26	0	0	0	0	−	0	0	0	0	+	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0			
n_0	27	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0			
	28	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0			
	29	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0			
	30	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0			
	31	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0			
	32	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0			

$$\hat{y}_i = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_4x_4 + b_{12}x_1x_2 + b_{13}x_1x_3 + b_{14}x_1x_4 + b_{23}x_2x_3 + b_{24}x_2x_4 + b_{34}x_3x_4; \quad (31)$$

г) пятифакторный эксперимент (см. табл. 36 «г»)

$$\hat{y}_i = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_4x_4 + b_5x_5 + b_{12}x_1x_2 + b_{13}x_1x_3 + b_{14}x_1x_4 + b_{15}x_1x_5 + b_{23}x_2x_3 + b_{24}x_2x_4 + b_{25}x_2x_5 + b_{34}x_3x_4 + b_{35}x_3x_5 + b_{45}x_4x_5; \quad (32)$$

д) в общем виде

$$\hat{y}_i = b_0 + \sum_1^k b_i x_i + \sum_1^k b_{ij} x_i x_j; \quad (33)$$

$$i \neq j.$$

Для планов второго порядка:

а) двухфакторный эксперимент (см. табл. 37 «а»)

$$\hat{y}_i = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + b_{11} x_1^2 + b_{22} x_2^2 + b_{12} x_1 x_2; \quad (34)$$

б) трехфакторный эксперимент (см. табл. 37 «б»)

$$\hat{y}_i = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + b_3 x_3 + b_{11} x_1^2 + b_{22} x_2^2 + b_{33} x_3^2 + b_{12}x_1x_2 + b_{13}x_1x_3 + b_{23}x_2x_3; \quad (35)$$

в) пятифакторный эксперимент (см. табл. 37 «в»)

$$\hat{y}_i = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + b_3 x_3 + b_4 x_4 + b_5 x_5 + b_{11} x_1^2 + b_{22} x_2^2 + b_{33} x_3^2 + b_{44} x_4^2 + b_{55} x_5^2 + b_{12} x_1 x_2 + b_{13} x_1 x_3 + b_{14}x_1x_4 + b_{15}x_1x_5 + b_{23}x_2x_3 + b_{24}x_2x_4 + b_{25}x_2x_5 + b_{34}x_3x_4 + b_{35}x_3x_5 + b_{45}x_4x_5; \quad (36)$$

г) в общем виде

$$\hat{y}_i = b_0 + \sum_1^k b_i x_i + \sum_1^k b_{ii} x_i^2 + \sum_1^k b_{ij} x_i x_j;$$

$$i \neq j, \quad (37)$$

где $i, j = 1, 2, ..., k$ — порядковые номера факторов;

$\hat{y}_i$ — исследуемое свойство бетона;

$x_1, x_2, x_3, x_4, ..., x_k$ — исходные факторы;

$b_0, b_1, b_2, ..., b_{12}, b_{13}, ..., b_{ij}, b_{ii}$ — коэффициенты уравнений.

9.13. Коэффициенты уравнений при использовании планов первого порядка (см. табл. 36) вычисляются по следующим формулам:

$$b_0 = \frac{\sum_1^{N_1} y_u}{N_1}; \quad (38)$$

$$b_i = \frac{\sum_1^{N_1} x_{iu} y_u}{N_1}; \tag{39}$$

$$b_{ij} = \frac{\sum_1^{N_1} x_{iu} x_{ju} y_u}{N_1}; \tag{40}$$

где y_u — значение исследуемого свойства бетона в u-том опыте;
x_{iu} — значение i-того фактора в u-том опыте;
x_{ju} — значение j-того фактора в u-том опыте ($i \neq j$);
N_1 — число опытов в плане, за исключением опытов в нулевых точках (для $k=2$, $N_1=4$; для $k=3$, $N_1=8$; для $k=4$, $N_1=16$; для $k=5$, $N_1=16$).

9.14. Для планов второго порядка в зависимости от числа факторов k расчет коэффициентов уравнений производится с использованием следующих формул:

а) двухфакторный трехуравневый план на квадрате (см табл. 37 «а»)

$$b_0 = 0,2632\,[0y] - 0,1579 \sum_1^k [ijy]; \tag{41}$$

$$b_i = 0,1667\,[iy]; \tag{42}$$

$$b_{ii} = -0,1579\,[0y] + 0,5\,[iiy] - 0,1053 \sum_1^k [iiy]; \tag{43}$$

$$b_{ij} = 0,25\,[ijy]; \tag{44}$$

б) трехфакторный трехуравневый план на кубе (см. табл. 37 «б»)

$$b_0 = 0,1831\,[0y] - 0,0704 \sum_1^k [iiy]; \tag{45}$$

$$b_i = 0,1\,[iy]; \tag{46}$$

$$b_{ii} = -0,0704\,[0y] + 0,5\,[iiy] - 0,1268 \sum_1^k [iiy]; \tag{47}$$

$$b_{ij} = 0,125\,[ijy]; \tag{48}$$

в) пятифакторный трехуравневый план на гиперкубе (см. табл. 37 «в»)

$$b_0 = 0,0817\,[0y] - 0,0179 \sum_1^k [iiy]; \tag{49}$$

$$b_i = 0,0555\,[iy]; \tag{50}$$

$$b_{ii} = -0,0179\,[0y] + 0,5\,[iiy] - 0,0936 \sum_1^k [iiy]; \tag{51}$$

$$b_{ij} = 0,0625\,[ij\bar{y}], \tag{52}$$

где $[0y]=\sum_{1}^{N} y_u$; $[iiy]=\sum_{1}^{N} x^2_{iu} y_u$; $i \neq j$;

$[iy]=\sum_{1}^{N} x_{iu} y_u$; $[iiy]=\sum_{1}^{N} x_{iu} y_u$;

N — общее число опытов в плане (включая нулевые точки).

9.15. После получения уравнений производят проверку отличия коэффициентов b_i от нуля и пригодности уравнения для описания исследуемых зависимостей (проверка адекватности).

Выбор схемы статистического анализа и расчетных формул зависит от типа использования плана и вида получаемых уравнений.

9.16. Статистический анализ линейных зависимостей (планы по табл. 36 «а»—«г») производится, как указано ниже.

По результатам опытов в нулевых (или основных) точках (например, опыты № 17—21, табл. 36 «г») определяют:

а) среднее арифметическое значение

$$\bar{y}_0 = \frac{\sum_{1}^{n_0} y_{0u}}{n_0}, \qquad (53)$$

где y_{0u} — значение исследуемого свойства бетона в нулевой точке в u-том опыте;

n_0 — число опытов в нулевой точке;

б) дисперсию в нулевой точке

$$S^2_{\bar{y}} - S^2_0 = \frac{\sum_{1}^{n_0} (\bar{y}_0 - y_{0u})^2}{n_0 - 1}; \qquad (54)$$

в) среднее квадратическое отклонение, характеризующее ошибку опыта:

$$S_{\bar{y}} = S_0 = \sqrt{S^2_0} = \sqrt{\frac{\sum_{1}^{n_0} (\bar{y}_0 - y_{0u})^2}{n_0 - 1}}; \qquad (55)$$

г) среднюю квадратическую ошибку в определении коэффициентов

$$S\{b_i\} = \frac{S_{\bar{y}}}{\sqrt{N_1}}. \qquad (56)$$

Далее определяют расчетное значение t_p-критерия Стьюдента— по формуле

$$t_p = \frac{|b_i|}{S\{b_i\}} \qquad (57)$$

и сравнивают полученное значение $t_р$ с табличным $t_т$ при числе степеней свободы $f_{\bar{y}}$, с которым определялась $S_{\bar{y}}$; $f_{\bar{y}}=n_0-1$ (табл. 38).

Таблица 38

Число степеней свободы $f_{\bar{y}}=n_0-1$	2	3	4	5	6	8	10	12	14	16
Критерий Стьюдента $t_т$	4,3	3,18	2,78	2,57	2,45	2,31	2,23	2,18	2,15	2,12

Если $t_р<t_т$, то при обычно назначаемом уровне значимости $\alpha=0{,}05$ коэффициент считают равным нулю, а соответствующий ему член уравнения отбрасывают.

Начинать проверку следует с наименьшего по абсолютному значению коэффициента, так как в случае его значимости надобность в проверке остальных величин отпадает. После отбрасывания незначимых членов получают уточненное уравнение.

Для проверки пригодности полученного уточненного уравнения вычисляют дисперсию адекватности (или остаточную дисперсию) по формуле

$$S^2_{ад}=\frac{\sum_{1}^{N_1}\left(y_u-\hat{y}_u\right)^2}{N_1-m}, \qquad (58)$$

где y_u — значение исследуемого свойства бетона в u-том опыте;

$\hat{y}_u$ — значение исследуемого свойства бетона в u-том опыте, вычисленное по уточненному уравнению;

m — число значимых коэффициентов, включая b_0.

Таблица 39

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

Определяют расчетное значение F_p — критерия Фишера:

$$F_p = \frac{S^2_{ад}}{S^2_y} \qquad (59)$$

и сравнивают с F* для степеней свободы, с которыми определялись $S^2_{ад}$ и S^2_y, т. е. $f_{ад} = N_1 - m$; $f_y = n_0 - 1$ (табл. 39).

Уравнение признается пригодным, если $F_p < F$.

Следует иметь в виду, что при вычислении F в числителе всегда должна стоять бо́льшая дисперсия. Так, если $S^2_y > S^2_{ад}$, то

$$F_p = \frac{S^2_y}{S^2_{ад}}. \qquad (59а)$$

9.17. Статистический анализ квадратичных зависимостей (по планам табл. 37) производится, как указано ниже.

Вычисляют среднее арифметическое значение, дисперсию и среднее квадратическое отклонение, характеризующее ошибку опыта по формулам (53)—(55).

Ошибку в определении коэффициентов вычисляют по следующим формулам в зависимости от числа принятых факторов k:

а) двухфакторный план (см. табл 37 «а»), $k=2$:

$$S^2\{b_0\} = 0{,}2632S^2_y; \quad S\{b_0\} = \sqrt{S^2\{b_0\}} = 0{,}513S_y;$$

$$S^2\{b_i\} = 0{,}1667S^2_y; \quad S\{b_i\} = 0{,}4083S_y;$$

$$S^2\{b_{ii}\} = 0{,}3947S^2_y; \quad S\{b_{ii}\} = 0{,}6282S_y;$$

$$S^2\{b_{jj}\} = 0{,}25S^2_y; \quad S\{b_{ij}\} = 0{,}5S_y;$$

б) трехфакторный эксперимент (см. табл 37 «б»), $k=3$:

$$S^2\{b_0\} = 0{,}1831S^2_y; \quad S\{b_0\} = 0{,}4279S_y;$$

$$S^2\{b_i\} = 0{,}1S^2_y; \quad S\{b_i\} = 0{,}3162S_y;$$

$$S^2\{b_{ii}\} = 0{,}3732S^2_y; \quad S\{b_{ii}\} = 0{,}6109S_y;$$

$$S^2\{b_{ij}\} = 0{,}125S^2_y; \quad S\{b_{ij}\} = 0{,}3536S_y;$$

в) пятифакторный эксперимент (см. табл 37 «в»), $k=5$:

$$S^2\{b_0\} = 0{,}1633S^2_y; \quad S\{b_0\} = 0{,}4041S_y;$$

$$S^2\{b_i\} = 0{,}0555S^2_y; \quad S\{b_i\} = 0{,}2356S_y;$$

$$S^2\{b_{ii}\} = 0{,}3745S^2_y; \quad S\{b_{ii}\} = 0{,}6119S_y;$$

$$S^2\{b_{ij}\} = 0{,}0625S^2_y; \quad S\{b_{ij}\} = 0{,}25S_y.$$

---

* См. табл. 39.

Далее определяют расчетные значения t—критерия Стьюдента для каждой группы коэффициентов по формуле (57) и сравнивают полученные значения с табличным $t_т$ при числе степеней свободы $f_{\bar{y}} = n_0 - 1$.

Коэффициенты при квадратичных членах не следует исключать из уравнения даже в случае их статистической незначимости (т. е. при $t_р < t_т$).

Дисперсию адекватности вычисляют по формуле

$$S^2_{ад} = \frac{\sum_1^N \left(y_u - \hat{y}_u\right)^2}{N - m - (n_0 - 1)}, \qquad (60)$$

где N — общее число экспериментов в плане, включая и опыты в нулевых точках;

n_0 — число экспериментов на нулевом уровне.

Остальные обозначения соответствуют принятым в п. 9.16 настоящего Руководства.

Расчетное значение F — критерия Фишера и оценку пригодности уравнения определяют в соответствии с правилами, изложенными в п. 9.16, но при числе степеней свободы $f_{ад} = N - m - (n_0 - 1)$.

9.18. Перед использованием полученных уравнений для решения поставленных задач корректируют коэффициент b_0. Для этого в производственных условиях приготавливают подряд 10 замесов бетонной смеси. Из приготовленных смесей отбирают пробы бетона, которые испытывают с определением свойств бетона и бетонной смеси по методикам соответствующих стандартов. По всем 10 замесам вычисляют среднее арифметическое значение

$$\bar{y}_0 = \frac{y_1 + y_2 + y_3 + \cdots + y_{10}}{10} = \frac{\sum_1^{10} y_i}{10} \qquad (61)$$

и средние квадратические отклонения

$$S_0 = \sqrt{\frac{\sum_1^{10} (y_i - \bar{y}_0)^2}{10 - 1}}, \qquad (62)$$

где $y_i (i = 1, 2, \ldots, 10)$ — показатели свойств бетона в первом, втором, ..., десятом замесах.

Для условий приготовления данного состава по соответствующим уравнениям вычисляют теоретические значения показателей свойств бетона $\hat{y}_0$.

Далее вычисляют абсолютное значение разницы между $\bar{y}_0$ и $\hat{y}_0$ и сравнивают его с величиной 0,753 S_0.

Если $|\bar{y} - \hat{y}_0| \leqslant 0{,}753\ S_0$, то разница между $\bar{y}_0$ и $\hat{y}_0$ признается несущественной и уточнение коэффициента b_0 не производится.

В противном случае коэффициент b_0 в уравнении меняют на величину $\Delta b_0 = \bar{y}_0 - \hat{y}_0$, т. е. b_0 увеличивают на Δb_0, если эта величина положительная, и уменьшают, если она отрицательная.

9.19. Уточненные производственными экспериментами уравнения могут использоваться для решения различных производственных задач, связанных с корректировкой и оптимизацией состава бетона.

Пример. Требуется подобрать состав бетона марок М300 и М400 с прочностью 60—70% марочной в возрасте 3 сут нормального твердения при введении в состав бетона добавки — ускорителя твердения Na_2SO_4 в количестве 3% массы цемента и с жесткостью смеси не более 30 с по техническому вискозиметру.

Характеристики материалов. Портландцемент М 400; $НГЦТ = 0{,}265$. Песок рядовой Тучковского карьера $M^{п}_{кр} = 1{,}9—2$; $\gamma_п = 2{,}64$. Щебень гранитный фракции 5—20 мм; водопоглощение $W = 0{,}5\%$, $\gamma_щ = 2{,}62$.

В качестве переменных выбираем следующие: X_1 — $В/Ц$ смеси; X_2 — доля песка в смеси заполнителей, r; X_3 — водосодержание смеси B, л/м³.

Интервалы варьирования переменных назначаем с учетом рекомендаций табл. 35.

Значения интервалов варьирования факторов сведены в табл. 40.

Таблица 40

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

Поскольку ставится задача определения прочностных характеристик в сравнительно узком диапазоне изменения переменных, принимаем для реализации линейный план для $k=3$ (см. табл. 36«б»), а для определения жесткости — трехуравневый нелинейный план для $k=3$ (см. табл. 37«б»).

Расчет состава бетона (расход цемента, песка, щебня и т. д.) производится в соответствии с рекомендациями разд. 4—6 настоящего Руководства. Для этого, помимо кодовой записи плана эксперимента (см. табл. 36«б» и 37«б»), составляем параллельную таблицу натуральных значений переменных в каждом опыте (табл. 41).

Определение жесткости смеси проводим с помощью технического вискозиметра, а прочности бетона — испытанием кубов 10×10×10 см в возрасте 3—28 сут нормального хранения, т. е. в каждом опыте изготовляем 6 образцов-кубов. Объем одного замеса 7 л. Опытные замесы выполняются в соответствии с указаниями разд. 4 настоящего Руководства. При проведении замесов опыты (в соответствии с рекомендациями п. 9.11 настоящего Руководства) разбиваются на группы таким образом, чтобы опыты в нулевой точке были равномерно распределены между остальными. В частности, принимаем следующий порядок реализации линейного плана: опыты 1, 2, 3, 9, 4, 5, 10, 6, 7, 8, 11, а трехуровневого нелинейного — соответственно опыты 1, 2, 3, 4, 5, 15, 6, 7, 8, 9, 10, 16, 11, 12, 13, 14, 17. Результаты определений прочности заносятся в табл. 42.

Таблица 41

№ опыта		План эксперимента			Натуральные значения переменных		
табл. 36«а»	табл. 37«а»	x_1	x_2	x_3	X_1—$B/Ц$	X_2—r	X_3—B, л/м³
1	1	+1	+1	+1	0,45	0,45	190
2	2	—1	+1	+1	0,35	0,45	190
3	3	+1	—1	+1	0,45	0,35	190
4	4	—1	—1	+1	0,35	0,35	190
5	5	+1	+1	—1	0,45	0,45	170
6	6	—1	+1	—1	0,35	0,45	170
7	7	+1	—1	—1	0,45	0,35	170
8	8	—1	—1	—1	0,35	0,35	170
—	9	+1	0	0	0,45	0,4	180
—	10	—1	0	0	0,35	0,4	180
—	11	0	+1	0	0,4	0,45	180
—	12	0	—1	0	0,4	0,35	180
—	13	0	0	+1	0,4	0,4	190
—	14	0	0	—1	0,4	0,4	170
9	15	0	0	0	0,4	0,4	180
10	16	0	0	0	0,4	0,4	180
11	17	0	0	0	0,4	0,4	180

Таблица 42

№ опыта	План эксперимента			Взаимодействие			Прочность бетона, кгс/см²		R_3/R_{28}, %	R_3x					
	x_1	x_2	x_3	x_1x_2	x_1x_3	x_2x_3	R_3	R_{28}		x_1	x_2	x_3	x_1x_2	x_1x_3	x_2x_3
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
1	+	+	+	+	+	+	166	302	55	166	166	166	166	166	166
2	—	+	+	—	—	+	280	391	72	—280	280	280	—280	—280	280
3	+	—	+	—	+	—	166	353	47	166	—166	166	—166	166	—166
4	—	—	+	+	—	—	311	425	73	—311	—311	311	311	—311	—311
5	+	+	—	+	—	—	151	281	54	151	151	—151	151	—151	—151
6	—	+	—	—	+	—	279	472	59	—279	279	—279	—279	279	—279
7	+	—	—	—	—	+	225	340	66	225	—225	—225	—225	—225	225
8	—	—	—	+	+	+	269	447	60	—269	—269	—269	269	269	269
9	0	0	0	0	0	0	223	363	62	0	0	0	0	0	0
10	0	0	0	0	0	0	235	375	63	0	0	0	0	0	0
11	0	0	0	0	0	0	228	381	60	0	0	0	0	0	0
									Σ	—431	—95	—1	—53	—87	33

Продолжение табл. 42

№ опыта	$R_{28}x$						$R_3/R_{28}\,x$					
	x_1	x_2	x_3	x_1x_2	x_1x_3	x_2x_3	x_1	x_2	x_3	x_1x_2	x_1x_3	x_2x_3
1	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28
1	302	302	302	302	302	302	55	55	55	55	55	55
2	—391	391	391	—391	—391	391	—72	72	72	—72	—72	72
3	353	—353	353	—353	353	353	47	—47	47	—47	47	—47
4	—425	—425	425	425	—425	—425	—73	—73	73	73	—73	—73
5	281	281	—281	281	—281	—281	54	54	—54	54	—54	—54
6	—472	472	—472	—472	472	—472	—59	59	—59	—59	59	—59
7	340	—340	—340	—340	—340	340	66	—66	—66	—66	—66	66
8	—447	—447	—447	447	447	447	—60	—60	—60	60	60	60
9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Σ	—459	—119	—69	—101	137	—51	—42	—6	8	—2	—44	20

По формулам (38)—(40) рассчитываем коэффициенты соответствующих уравнений прочности.

Знак перед численным значением прочности определяется соответствующей графой табл. 42. Так, например, при вычислении коэффициента b_1 умножаем значение прочности R_{28} (графа 9) на соответствующие значения x_1 (графа 2); коэффициента b_2 умножаем R_{28} на соответствующие значения x_2 (графа 3); коэффициента b_{12} умножаем R_{28} на соответствующие значения x_{12} и т. д.

Например, для R_{28}, имеем:

$$b_0 = \frac{302 + 391 + 353 + 425 + 281 + 472 + 340 + 447}{8} = \frac{3011}{8} = 376;$$

$$b_1 = \frac{302 - 391 + 353 - 425 + 281 - 472 + 340 - 447}{8} = -\frac{459}{8} = -57;$$

$$b_2 = \frac{302 + 391 - 353 - 425 + 281 + 472 - 340 - 447}{8} =$$

$$= -\frac{119}{8} = -14{,}9;$$

$$b_3 = \frac{302 + 391 + 353 + 425 - 281 - 472 - 340 - 447}{8} =$$

$$= -\frac{69}{8} = -8{,}6;$$

$$b_{12} = \frac{302 - 391 - 353 + 425 + 281 - 472 - 340 + 447}{8} =$$

$$= -\frac{101}{8} = -12{,}5;$$

$$b_{13} = \frac{302 - 391 + 353 - 425 - 281 + 472 - 340 + 447}{8} = \frac{137}{8} = 17,1;$$

$$b_{23} = \frac{302 + 391 - 353 - 425 - 281 - 472 + 340 + 447}{8} =$$

$$= -\frac{51}{8} = -6,4.$$

Для R_3 имеем:

$$b_0 = \frac{166 + 280 + 166 + 311 + 151 + 279 + 225 + 269}{8} = \frac{1847}{8} = 231;$$

$$b_1 = \frac{166 - 280 + 166 - 311 + 151 - 279 + 225 - 269}{8} =$$

$$= -\frac{431}{8} = -54;$$

$$b_2 = \frac{166 + 280 - 166 - 311 + 151 + 279 - 225 - 269}{8} =$$

$$= -\frac{95}{8} = -11,9;$$

$$b_3 = \frac{166 + 280 + 166 + 311 - 151 - 279 - 225 - 269}{8} =$$

$$= -\frac{1}{8} = -0,125;$$

$$b_{12} = \frac{166 - 280 - 166 + 311 + 151 - 279 - 225 + 269}{8} =$$

$$= -\frac{53}{8} = -6,7;$$

$$b_{13} = \frac{166 - 280 + 166 - 311 - 151 + 279 - 225 + 269}{8} =$$

$$= -\frac{87}{8} = -11;$$

$$b_{23} = \frac{166 + 280 - 166 - 311 - 151 - 279 + 225 + 269}{8} = \frac{33}{8} = 4,1.$$

Для R_3/R_{28} имеем:

$$b_0 = \frac{55 + 72 + 47 + 73 + 54 + 59 + 66 + 60}{8} = \frac{486}{8} = 60,75;$$

$$b_1 = \frac{55 - 72 + 47 - 73 + 54 - 59 + 66 - 60}{8} = -\frac{42}{8} = -5,25;$$

$$b_2 = \frac{55 + 72 - 47 - 73 + 54 + 59 - 66 - 60}{8} = -\frac{6}{8} = -0{,}75;$$

$$b_3 = \frac{55 + 72 + 47 + 73 - 54 - 59 - 66 - 60}{8} = \frac{8}{8} = 1;$$

$$b_{12} = \frac{55 - 72 - 47 + 73 + 54 - 59 - 66 + 60}{8} = -\frac{2}{8} = -0{,}25;$$

$$b_{13} = \frac{55 - 72 + 47 - 73 - 54 + 59 - 66 + 60}{8} = -\frac{44}{8} = -5{,}5;$$

$$b_{23} = \frac{55 + 72 - 47 - 73 - 54 - 59 + 66 + 60}{8} = \frac{20}{8} = 2{,}5.$$

План проведения опытов и результаты определения жесткости смеси заносим в табл. 43.

Расчет коэффициентов уравнения жесткости проводим по соотношениям (45)—(48).

Для этого вычисляем соответствующие суммы из табл. 43:

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

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

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

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

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

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

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

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

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

$$[13y] = \sum_1^N x_{1u}\, x_{3u}\, y_u = -10; \quad [23y] = \sum_1^N x_{2u}\, x_{3u}\, y_u = 8.$$

Таблица 43

№ опыта	План эксперимента (x_i)			Квадрат переменных (x_i^2)			Взаимодействия $(x_i x_j)$			y_u	$\hat{y}_p$	Δ	Δ^2	$Ж_c \cdot (x_i)$			Квадрат перемен. $Ж$, с $(x_i)^2$			Взаимодействия $Ж$, с $(x_i x_j)$		
	x_1	x_2	x_3	x_1^2	x_2^2	x_3^2	x_1x_2	x_1x_3	x_2x_3	$Ж$, с	$Ж$, с	$y_u-\hat{y}_p$	$(y_u-\hat{y}_p)^2$	x_1y_u	x_2y_u	x_3y_u	$x_1^2y_u$	$x_2^2y_u$	$x_3^2y_u$	$x_1x_2y_u$	$x_1x_3y_u$	$x_2x_3y_u$
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23
1	+	+	+	+	+	+	+	+	+	18	16,5	1,5	2,25	18	18	18	18	18	18	18	18	18
2	−	+	+	+	+	+	−	−	+	30	28,5	1,5	2,25	−30	30	30	30	30	30	−30	−30	30
3	+	−	+	+	+	+	−	+	−	16	19,5	3,5	12,25	16	−16	16	16	16	16	−16	16	−16
4	−	−	+	+	+	+	+	−	−	26	25,5	0,5	0,25	−26	−26	26	26	26	26	26	−26	−26
5	+	+	−	+	+	+	+	−	−	47	46,5	0,5	0,25	47	47	−47	47	47	47	47	−47	−47
6	−	+	−	+	+	+	−	+	−	58	58,5	0,5	0,25	−58	58	−58	58	58	58	−58	58	−58
7	+	−	−	+	+	+	−	−	+	53	49,5	3,5	12,25	53	−53	−53	53	53	53	−53	−53	53
8	−	−	−	+	+	+	+	+	+	54	55,5	1,5	2,25	−54	−54	−54	54	54	54	54	54	54
9	+	0	0	+	0	0	0	0	0	23	23	—	—	23	—	—	23	—	—	—	—	—
10	−	0	0	+	0	0	0	0	0	35	32	3	9	−35	—	—	+35	—	—	—	—	—
11	0	+	0	0	+	0	0	0	0	26	24,5	1,5	2,25	—	26	—	—	26	—	—	—	—
12	0	−	0	0	+	0	0	0	0	26	24,5	1,5	2,25	—	−26	—	—	26	—	—	—	—
13	0	0	+	0	0	+	0	0	0	11	8,5	2,5	6,25	—	—	11	—	—	11	—	—	—
14	0	0	−	0	0	+	0	0	0	39	38,5	0,5	0,25	—	—	−39	—	—	39	—	—	—
15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	27	19	8	64	—	—	—	—	—	—	—	—	—
16	0	0	0	0	0	0	0	0	0	23	19	4	16	—	—	—	—	—	—	—	—	—
17	0	0	0	0	0	0	0	0	0	22	19	3	9	—	—	—	—	—	—	—	—	—
										Σ= =534	508	$\Sigma\Delta^2$=141		Σ=−46	4	−150	360	354	352	−12	−10	8

Подставляя полученные промежуточные значения сумм в соотношения (45)—(48), получаем:

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

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

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

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

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

$$b_{22} = -0{,}0704 \cdot 534 + 0{,}5 \cdot 354 - 0{,}1268 \cdot 1066 =$$
$$= -37{,}6 + 177 - 135 = 4{,}4;$$

$$b_{33} = -0{,}0704 \cdot 534 + 0{,}5 \cdot 352 - 0{,}1268 \cdot 1066 =$$
$$= -37{,}6 + 176 - 135 = 3{,}4;$$

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

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

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

Значения коэффициентов всех уравнений сводим в табл. 44.

Таблица 44

Параметр	Коэффициенты уравнений									
	b_0	b_1	b_2	b_3	b_{11}	b_{22}	b_{33}	b_{12}	b_{13}	b_{23}
R_3	231	—54	—12	—0,125*	—	—	—	—6,5*	—11	4*
R_{36}	376	—57	—15	—8,6*	—	—	—	—12,5*	17,1	—6,5*
$R_3/R_{36} \times 100$	61	—5,25	—1*	1*	—	—	—	—0,25*	—5,5	2,5
Ж	22,8	—4,6	0,4*	—15	7,4	4,4	3,4	—1,5*	—1,25*	1*

* Незначимые коэффициенты.

В соответствии с указаниями п. 9.16 настоящего Руководства проводим статистическую проверку значимости коэффициентов и пригодности полученных уравнений для описания исследуемых зависимостей.

Для этого по результатам опытов в нулевой точке (основной) в соответствии с формулами (53) и (56) определяем:

среднеарифметическое значение параметра — y_0;

дисперсию в нулевой точке — $S_0^2 = S_{y_0}^2$;

среднее квадратическое отклонение $S_{y_0} = S_0$ и среднюю квадратическую ошибку в определении коэффициентов $S\{b_i\}$.

Например, для R_{28} имеем:

$$\bar{y}_0 = \frac{363 + 375 + 381}{3} = 373;$$

$$S_0^2 = S_{\bar{y}_0}^2 = \frac{(373 - 363)^2 + (373 - 375)^2 + (373 - 381)^2}{(3 - 1)} =$$

$$= \frac{100 + 4 + 64}{2} = 84;$$

$$S_0 = S_{\bar{y}} = \sqrt{84} = 9,16;$$

$$S\{b_i\} = \frac{9,16}{\sqrt{8}} = \frac{9,16}{2,83} = 3,24.$$

Для R_3 имеем:

$$\bar{y}_0 = \frac{223 + 235 + 228}{3} = 229;$$

$$S_0^2 = S_{\bar{y}_0}^2 = \frac{(229 - 223)^2 + (229 - 235)^2 + (229 - 228)^2}{2} =$$

$$= \frac{36 + 36 + 1}{2} = 36,5;$$

$$S_0 = S_{\bar{y}_0} = \sqrt{36,5} = 6;$$

$$S\{b_i\} = \frac{6}{\sqrt{8}} = \frac{6}{2,84} = 2,14.$$

Для R_3/R_{28} имеем:

$$\bar{y}_0 = \frac{62 + 63 + 60}{3} = 62;$$

$$S_0^2 = S_{\bar{y}_0}^2 = \frac{(62 - 62)^2 + (62 - 63)^2 + (62 - 60)^2}{2} =$$

$$= \frac{0 + 1 + 4}{2} = 2,5;$$

$$S_0 = S_{\bar{y}_0} = \sqrt{2,5} = 1,58;$$

$$S\{b_i\} = \frac{1,58}{2,84} = 0,56.$$

Результаты расчетов заносим в табл. 45.

Определяем расчетное значение t — критерия Стьюдента по формуле (57) и устанавливаем значимость коэффициентов уравнений для определения R_{28}, R_3 и R_3/R_{28}. Проверку производим, начиная с самого малого коэффициента.

Таблица 45

Параметр	y_0	$S^2_{\bar{y}} = S^2_0$	$S_{\bar{y}} = S_0$	$S\{b_i\}$
R_3	229	36	6	2,14
R_{28}	373	84	9,16	3,24
R_3/R_{28}	62	2,5	1,6	0,56

Для R_{28} имеем

$$t_p(b_{23}) = \frac{|-6,5|}{3,24} = 2,006$$ и сравниваем

с $t_т$ из табл. 38 при $f_{\bar{y}} = n_0 - 1 = 2$; $t_т = 4,3$.

$t_p(b_{23}) < t_т$ — коэффициент незначим. Далее

$$t_p(b_3) = \frac{|-8,6|}{3,24} = 2,62$$ — коэффициент незначим;

$$t_p(b_{12}) = \frac{|-12,5|}{3,24} = 3,858$$ — то же;

$$t_p(b_2) = \frac{|-15|}{3,24} = 4,63$$ — коэффициент значим.

Следовательно, значимы и все остальные коэффициенты.

Аналогичную оценку коэффициентов устанавливаем для R_3 и R_3/R_{28}. Незначимые коэффициенты отмечаем звездочкой в табл. 44 и приравниваем нулю.

Для уравнения жесткости смеси имеем следующие оценки:

$$\bar{y}_0 = \frac{27+23+22}{3} = 24;$$

$$S_0^2 = S^2_{\bar{y}_0} = \frac{(27-24)^2 + (23-24)^2 + (22-24)^2}{(3-1)} = \frac{9+1+4}{2} = 7;$$

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

Используя соотношения п. 9.17 «б» настоящего Руководства, вычисляем ошибки в определении коэффициентов уравнения:

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

$$S\{b_1\} = 0,3162 S_{\bar{y}} = 0,3162 \cdot 2,646 = 0,838;$$

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

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

Определяем значимость коэффициентов, сравнивая t_p с $t_т = 2,12$ ($f = 17$ по табл. 38):

а) для b_0 $t_p = \frac{|22,8|}{1,134} = 20$, $10 > t_т$ — коэффициент значим;

для b_2 $t_р = \frac{|-0{,}4|}{0{,}838} = 0{,}477 < t_т$ — коэффициент незначим;

» b_1 $t_р = \frac{|-4{,}6|}{0{,}838} = 5{,}49$ — коэффициент значим;

следовательно, значим и коэффициент $b_3 = -15$;

б) для b_{33} $t_р = \frac{|3{,}4|}{1{,}618} = 2{,}10 < 2{,}12$ — коэффициент незначим;

» b_{22} $t_р = \frac{|4{,}4|}{1{,}618} = 2{,}72$ — коэффициент значим;

следовательно, значим и коэффициент $b_{11} = 7{,}4$;

в) для b_{12} $t_р = \frac{|-1{,}5|}{0{,}937} = 1{,}6 < 2{,}12$ — незначим,

следовательно, незначимы все парные взаимодействия.

Окончательно уточненные коэффициенты приведены в табл. 46.

Таблица 46

Параметры	Значения коэффициентов										
	b_0	b_1	b_2	b_3	b_{11}	b_{22}	b_{33}	b_{12}	b_{13}	b_{23}	m
R_3	231	—54	—12	0	—	—	—	0	—11	0	4
R_{28}	376	—57	—15	0	—	—	—	0	17	0	4
$R_3/R_{28} \cdot 100$	61	—5	0	0	—	—	—	0	—5,5	2,5	4
Ж	23	—4,5	0	—15	7,4	4,4	3,4	—1,5	0	0	7

В таблице значения коэффициентов приняты с точностью до 0,5. Полученные уравнения прочности и жесткости имеют вид:

$$\hat{y}_3 = 231 - 54x_1 - 12x_2 - 11x_1x_3;$$

$$\hat{y}_{28} = 376 - 57x_1 - 15x_2 + 17x_1x_3;$$

$$\hat{y}_{3/28} = 61 - 5x_1 - 5{,}5x_1x_3 + 2{,}5x_2x_3;$$

$$\hat{y}_ж = 23 - 4{,}5x_1 - 15x_3 + 7{,}4x_1^2 + 4{,}4x_2^2 + 3{,}4x_3^2 - 1{,}5x_1x_2.$$

Производим проверку пригодности уточненных уравнений по формулам (58) и (59). Для вычисления дисперсии адекватности $S^2_{ад}$ (или остаточной дисперсии) составляем вспомогательную таблицу для каждого параметра. В каждой строке этой таблицы в числителе представлены кодированные значения переменных в соответствии с матрицей планирования, а в знаменателе приведены произведения, полученные перемножением коэффициентов на соответствующее кодированное значение переменной.

Пример расчета $S^2_{ад}$ для параметра R_{28} представлен в табл. 47 и далее по тексту.

Таблица 47

№ опыта	x_0	x_1	x_2	x_3	x_1x_2	x_1x_3	x_2x_3	$\hat{y}$	$y_э$	$\lvert\Delta\rvert$	Δ^2
1	376	+	+	+	+	+	+	321	302	19	361
		—57	—15	0	0	17,1	0				
2	376	—	+	+	—	—	+	401	391	10	100
		57	—15	0	0	—17,1	0				
3	376	+	—	+	—	+	—	351	353	2	4
		—57	+15	0	0	17,1	0				
4	376	—	—	+	+	—	—	431	425	6	36
		57	15	0	0	—17,1	0				
5	376	+	+	—	+	—	—	287	281	6	36
		—57	—15	0	0	—17,1	0				
6	376	—	+	—	—	+	—	435	472	37	1369
		57	—15	0	0	17,1	0				
7	376	+	—	—	—	—	+	317	340	23	529
		—57	15	0	0	—17,1	0				
8	376	—	—	—	+	+	+	465	447	18	324
		57	15	0	0	17,1	0				
b_l	376	—57	—15	0	0	17,1	0	—	—	—	$\Sigma\Delta^2=2759$

Для удобства расчета в последней строке табл. 47 из табл. 46 приведены расчетные значения четырех коэффициентов уравнения ($m=4$).

Столбец $\hat{y}$ обозначает расчетное значение R_{28} по уточненному уравнению (см. табл. 47); в столбце $y_э$ представлены значения R_{28}, полученные в результате испытания опытных образцов (см. табл. 42, графа 9):

$$\Delta = \hat{y} - y_э, \text{ а } \Delta^2 = \left(\hat{y} - y_э\right)^2.$$

Далее определяем дисперсию адекватности:

$$S^2_{ад} = \frac{\Sigma\Delta^2}{f_{ад}} = \frac{2759}{4} = 689{,}75.$$

В нашем примере $N_1=8$, $n_0=3$; $m=4$, $f_{ад}=N_1-m=8-4=4$ и $f_y=n_0-1=3-1=2$.

Определяем расчетное значение $F_р$ — коэффициента Фишера, учитывая, что $S^2_{ад}>S^2_y$ [см. формулы (59), (59а) и табл. 46]:

$$F_р = \frac{689{,}75}{84} = 8{,}21.$$

По табл. 39 при $f_{ад}=4$ и $f_y=2$

$$F_т = 19{,}3, \text{ т. е. } F_р < F_т,$$

и уравнение прочности R_{28} пригодно для описания исходной зависимости в исследованных пределах изменения факторов.

Приступаем к решению поставленной задачи.

Первым ограничением является обеспечение жесткости бетонной смеси, которая не должна быть выше 30 с.

Из анализа уравнения жесткости следует, что при прочих равных условиях минимальной жесткостью будет обладать смесь, в которой доля песка примерно равна 0,4 ($x_2 \sim 0$). Принимая $x_2=0$ и подставляя это значение в уравнение, получим

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

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

а) при $x_1=-1$ $(В/Ц)=0{,}35$

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

Подставляя заданное значение $Ж=30$ с, получаем квадратное уравнение:

$$30 = 35 - 15x_3 + 3{,}4x_3^2$$

или

$$3{,}4x_3^2 - 15x_3 + 5 = 0;$$

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

$$x_3 \geqslant 0{,}364.$$

Второе значение $x_3=4{,}05$ лежит за пределами эксперимента и не учитывается.

Следовательно, из условия получения жесткости не более 30 с x_3 должно лежать в интервале 0,364—1 или в натуральных значениях:

$$B_1 = x_0 + x_3\Delta X = 180 + 0{,}364 \cdot 10 \approx 184 \text{ л/м}^3;$$

$$B_2 = x_0 + x_3\Delta X = 180 + 1 \cdot 10 = 190 \text{ л/м}^3,$$

т. е в пределах $B=184$—190 л/м^3.

Все последующие значения $B/Ц$ ($x_1=-0{,}5$; 0; $+0{,}5$; $+1$) дают близкие значения x_3, т. е. близкие расходы воды:

б) при $x_1 = -0{,}5 \quad (B/Ц = 0{,}375)$

$$x_3 \geqslant -0{,}177; \quad B = 178 - 190 \text{ л/м}^3;$$

в) при $x_1 = 0 \quad (B/Ц = 0{,}4)$

$$x_3 \geqslant -0{,}427; \quad B = 176 - 190 \text{ л/м}^3;$$

г) при $x_1 = +0{,}5 \; (B/Ц = 0{,}425)$

$$x_3 \geqslant -0{,}456; \quad B = 175{,}4 - 190 \text{ л/м}^3;$$

д) при $x_1 = +1 \quad (B/Ц = 0{,}45)$

$$x_3 = -0{,}25; \quad B = 178 - 190 \text{ л/м}^3.$$

Для рассмотренных случаев определяем условия получения максимальной ранней прочности бетона (R_3/R_{28} макс):

а) для $x_1 = -1$ и $x_2 = 0 \quad (B/Ц = 0{,}35$ и $r = 0{,}4)$

$$R_3/R_{28} \cdot 100 = 61 + 5 + 5{,}5x_3 = 66 + 5{,}5x_{13}$$ и

R_3/R_{28} макс. достигается при $x_3 = +1$.

Отсюда $R_3/R_{28} \cdot 100 = 71{,}5\%$,

при этом:

$$Ж = 23 + 4{,}5 - 15 + 7{,}4 + 3{,}4 = 23{,}3 \text{ с} < 30 \text{ с};$$

$$R_{28} = 376 + 57 - 17 = 416 \text{ кгс/см}^2;$$

б) для $x_1 = 0$ и $x_2 = 0 \quad (B/Ц = 0{,}4$ и $r = 0{,}4)$

$R_3/R_{28} \cdot 100 = 61\%$ и $Ж < 30$ с достигается при значении $x_3 \geqslant -0{,}427$ и $B = 176$ л/м^3, при этом $R_{28} = 376$ кгс/см^2;

в) для $x_1 = +1$ и $x_2 + 0 \quad (B/Ц = 0{,}45,\ r = 0{,}4)$

$$R_3/R_{28} \cdot 100 = 61 - 5 - 5{,}5x_3 = 56 - 5{,}5x_3;$$

при $x_3 = -0{,}41 \quad R_3/R_{28} \cdot 100 = 58{,}25\%;$

$$R_{28} = 376 - 57 - 7 = 312 \text{ кгс/см}^2.$$

Таким образом, окончательно имеем:
для бетона марки М 400 с ранней прочностью 70% марочной

$$x_1 = -1; \quad B/Ц = 0{,}35;$$

$$x_2 = 0; \quad r = 0{,}4;$$

$$x_3 = +1; \quad B = 190 \text{ л/м}^3; \quad Ж < 30 \text{ с};$$

для бетона марки М 300 с ранней прочностью, составляющей 60% марочной:

$$x_1 = +1; \quad B/Ц = 0{,}45;$$

$$x_2 = 0; \quad r = 0{,}4;$$

$$x_3 = -0{,}4; \quad B = 176 \text{ л/м}^3; \quad Ж < 30 \text{ с}.$$

Аналогично производятся расчеты для остальных параметров.

Расчет адекватности для уравнения жесткости приведен по данным табл. 43:

$$S^2_{ад} = \frac{\Sigma\Delta^2}{f_{ад}} = \frac{141}{17-7-(3-1)} = \frac{141}{8} = 17{,}63;$$

$$F_р = \frac{17{,}63}{7} = 2{,}52 < = 19{,}3 \text{ (по табл. 39 для } f_{ад} = 8 \text{ и } f_y = 2).$$

Принятый состав бетона проверяется опытным замесом и корректируется для производственного применения с учетом влажности заполнителей.

10. ОПРЕДЕЛЕНИЕ, КОНТРОЛЬ И ОЦЕНКА КАЧЕСТВЕННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК МАТЕРИАЛОВ, БЕТОННОЙ СМЕСИ И БЕТОНА ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ ЕГО СОСТАВА

10.1. Под «качественными характеристиками» бетона понимаются нормируемые в задании на проектирование состава бетона его физико-механические свойства, которые обычно называются «марками». В соответствии с главой СНиП II-21-75 «Бетонные и железобетонные конструкции», ГОСТ 4797—69*, ГОСТ 8424—72* и другими нормативными документами установлены марки бетона: по прочности на сжатие; по прочности на осевое растяжение или растяжение при изгибе; по морозостойкости; по водонепроницаемости; истираемости; коррозионной стойкости и др. Количественные величины качественных характеристик бетона, заданные в проекте, в дальнейшем будут называться «нормируемые».

10.2. Все задаваемые в проекте качественные характеристики бетона должны иметь стандартные методы их определения (по ГОСТ или ОСТ). При отсутствии стандартных методов определения заданных характеристик методика их определения должна быть изложена в проектной документации.

10.3. Определение качественных характеристик материалов, бетонной смеси и бетона должно производиться по следующим стандартам: цемента — по ГОСТ 310.1—310.4.76, песка — по ГОСТ 8735—75, ГОСТ 4798—69*, ГОСТ 8424—72*, гравия и щебня — по ГОСТ 8269—76, ГОСТ 4798—69*, ГОСТ 8424—72*; прочность бето-

на на сжатие и растяжение путем разрушающих испытаний специально изготовленных образцов определяется по ГОСТ 10180—74; прочность бетона на сжатие путем неразрушающих испытаний — по ГОСТ 17624—72 и ГОСТ 21243—75; подвижность и жесткость бетонной смеси — по ГОСТ 10181—76; морозостойкость бетона — по ГОСТ 10060—76; водонепроницаемость бетона — по ГОСТ 4800—59; коэффициент фильтрации бетона — по ГОСТ 19426—74; плотность, пористость, объемная масса, водопоглощение, влажность — по ГОСТ 12730—67; истираемость бетона — по ГОСТ 13087—67.

10.4. Под «контролем» понимается соблюдение:

правил испытания составляющих бетон материалов;

правил определения подвижности или жесткости бетонной смеси;

правил изготовления, обработки и хранения контрольных образцов до их испытания;

правил применения разрушающих и неразрушающих методов определения характеристик бетона.

10.5. Контроль за качеством бетона при проектировании его состава должен осуществляться по трем основным направлениям:

а) контроль качества составляющих бетон материалов, обеспечивающий использование материалов для приготовления бетона, отвечающих всем требованиям соответствующих стандартов или технических условий на эти материалы, а также дополнительным требованиям, изложенным в задании на проектирование состава бетона;

б) пооперационный контроль всех технологических процессов приготовления бетонной смеси, изготовления контрольных образцов бетона и режимов их твердения, обеспечивающий соблюдение установленных проектом состава бетона и условий его твердения;

в) контроль качества затвердевшего бетона, обеспечивающий получение бетона, соответствующего всем требованиям задания на проектирование бетона.

10.6. Пооперационный контроль качества бетона должен включать в себя:

контроль соответствия фактического состава, подвижности или жесткости и температуры бетонной смеси (включая добавки) проектным;

контроль соответствия форм для изготовления образцов требованиям ГОСТа;

контроль соблюдения методики изготовления образцов для определения характеристики бетона и условий их твердения вплоть до момента определения.

10.7. Контроль качества затвердевшего бетона должен обязательно включать в себя контроль прочности бетона на сжатие, который должен осуществляться применительно к методике ГОСТ 18105—72* при применении разрушающих способов определения прочности бетона и по ГОСТ 21217—75 при применении неразрушающих способов определения прочности бетона.

Если в задании на проектирование бетона нормированы другие качественные характеристики бетона, то они также должны быть включены в контроль затвердевшего бетона. В случае, когда в соответствующих стандартах на методы испытаний не указаны нормы проведения контроля, эти нормы должны быть указаны в задании на проектирование.

10.8. Под «оценкой» понижается:

установление величин требуемых значений нормируемых качественных характеристик бетона;

сравнение (по установленным правилам) фактических величин значений качественных характеристик бетона с требуемыми и принятие решения о соответствии качества бетона заданному в проекте.

10.9. При применении статистических методов контроля и оценки качества бетона величины требуемых значений устанавливаются с учетом однородности этих характеристик, например при определении прочности бетона требуемые значения устанавливаются по ГОСТ 18105—72* и ГОСТ 21217—75.

10.10. При нестатистических методах контроля за значения требуемых характеристик принимают нормируемые.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВОДОПОТРЕБНОСТИ ЗАПОЛНИТЕЛЕЙ В БЕТОННОЙ СМЕСИ

Водопотребность заполнителей определяют исходя из условия равноподвижности бетонной смеси. Для этого:

1) приготовляют стандартный раствор состава 1 : 2 (300 г цемента и 600 г стандартного вольского кварцевого песка, отвечающего требованиям ГОСТ 6139—70, с водопотребностью 4%). Смесь перемешивают всухую в течение 1 мин и 5 мин с водой, добиваясь расплыва конуса, определяемого на встряхивающем столике, равного 170 мм (по методике, изложенной в ГОСТ 310.1—76 — 310.4—76) и определяют $(В/Ц)_{ср}$;

2) подбирают $(В/Ц)_р$, при котором раствор состава 1 : 2 на исследуемом песке имеет такой же расплыв конуса (170 мм);

3) устанавливают осадку конуса (или жесткость) раствора состава 1 : 2 на исследуемом песке при $(В/Ц)_р$, определенном ранее на встряхивающем столике. Для этого отвешивают 5 кг цемента и 10 кг песка и перемешивают их вначале 1 мин всухую, а затем 5 мин с водой, количество которой устанавливают в соответствии с $(В/Ц)_р$. После этого определяют подвижность раствора стандартными способами;

4) подбирают $(В/Ц)_б$, при котором достигается та же осадка конуса (жесткость) бетонной смеси состава 1 : 2 : 3,5, т. е. получается бетонная смесь нормальной густоты. Для этого отвешивают 2,5 кг цемента, 5 кг песка и 8,75 кг щебня (гравия), перемешивают их 1 мин всухую и 5 мин с водой, а затем определяют подвижность бетонной смеси стандартными способами.

Водопотребность исследуемых заполнителей в процентах вычисляют по формулам:

$$В_п = \frac{(В/Ц)_р - (В/Ц)_{ср}}{2} 100 + 4;$$

$$В_щ = \frac{(В/Ц)_б - (В/Ц)_р}{3,5} 100,$$

где $(В/Ц)_р$, $(В/Ц)_{ср}$ и $(В/Ц)_б$ — водоцементное отношение соответственно раствора на исследуемом песке, стандартного раствора и бетона;

$В_п$ и $В_щ$ — водопотребность соответственно песка и крупного заполнителя.

ОСОБЕННОСТЬ ПОДБОРА СОСТАВА ТЯЖЕЛЫХ БЕТОНОВ РАЗНЫХ ВИДОВ И НА МАТЕРИАЛАХ РАЗЛИЧНОГО КАЧЕСТВА

БЕТОН НА МЕЛКОМ ПЕСКЕ И КРУПНОМ ЗАПОЛНИТЕЛЕ

Мелкие пески ($М^{п}_{кр}$ =2,1—1) имеют более однородный зерновой состав, бóльшую удельную поверхность, низкую насыпную объемную массу и повышенную пустотность по сравнению с более крупными песками. Бетон на мелких песках обладает повышенной водопотребностью, более высоким расходом цемента и несколько пониженной прочностью. Однако бетонные смеси на мелких песках по сравнению с крупными песками при одинаковой осадке конуса обладают лучшей удобоукладываемостью, что позволяет снизить осадку конуса и несколько уменьшить перерасход цемента на 1 м³ бетона.

Подбор состава бетона на мелких песках ничем не отличается от подбора состава бетона на крупном песке и производится по одному из изложенных в Руководстве способов, но с учетом вышеотмеченных особенностей мелких песков. При подборе состава бетона с заданной подвижностью бетонной смеси осадку конуса следует снижать на 2—3 см по сравнению с бетоном на крупном песке или оценку свойств бетонной смеси производить по удобоукладываемости. При определении $В/Ц$ значение коэффициента $А$ в формуле $R_б = AR_ц \times (Ц/В - 0{,}5)$ рекомендуется уменьшать в зависимости от модуля крупности песка (см. рис. 4). Необходимо также уменьшать содержание песка. Уменьшение расхода песка следует регулировать понижением коэффициента заполнения пустот и раздвижки зерен щебня раствором (α) или доли песка в смеси заполнителей (r) и корректировать на основе опытных затворений бетона (см. рис. 7, 8 и табл. 21).

ВЫСОКОПРОЧНЫЙ БЕТОН (МАРКИ 500 И ВЫШЕ)

К качеству материалов для высокопрочного бетона, к дозированию и перемешиванию их, а также к уплотнению бетонных смесей, к уходу за свежеуложенным и твердеющим бетонам предъявляются повышенные требования. Заполнители должны применяться чистые (промытые) и фракционированные. В качестве крупного заполнителя должен применяться только щебень высокого качества с шероховатым изломом для обеспечения хорошего сцепления с цементно-песчаным раствором. Прочность каменной породы, идущей на щебень, должна превышать в два и более раза марку бетона. Количество зерен лещадной формы должно быть не более 15% (ГОСТ 8267—75). Соотношение между фракциями щебня устанавливается по наименьшей пустотности (наибольшей объемной массе) смеси. Модуль крупности песка должен быть равен 2,1 и более.

Рекомендуется применять портландцемент (бездобавочный) с нормальной густотой цементного теста 25—26% и менее, активностью не менее 500 кгс/см². При необходимости получения бетона прочностью выше активности цемента следует применять пластифицирую-

щие добавки. Для массивных конструкций рекомендуется применение цемента с пониженным содержанием C_3S и C_3A.

В связи с повышенным расходом цемента необходимо приготовление бетонной смеси производить только в бетоносмесителях принудительного действия, а время перемешивания составляющих материалов увеличивать до 1,5—2,5 мин.

В целях снижения расхода цемента следует применять малоподвижные и жесткие бетонные смеси и вводить добавки ПАВ (СДБ, НЧК, ВРП, СПД и комплексные). Расход песка на 1 м³ бетона необходимо устанавливать с учетом повышенного расхода цемента; содержание песка определяется по значению α (разд. 4, 6) или r (разд. 5) и обязательно уточняется на пробных замесах по методике, изложенной в разд. 8 настоящего Руководства. В остальном подбор состава бетона не отличается от подбора обычного бетона и производится по одному из описанных в Руководстве способов.

БЕТОН ДОРОЖНЫХ И АЭРОДРОМНЫХ ПОКРЫТИЙ

Бетон дорожных и аэродромных покрытий «работает» как плита на упругом основании. Поэтому марка бетона по ГОСТ 8424—72* устанавливается по прочности на растяжение при изгибе и сжатие.

Песок допускается применять с $M_{кр}^{п} = 2$ и более.

Крупный заполнитель (щебень, гравий, щебень из гравия и доменного шлака) допускается к использованию с количеством зерен лещадной формы до 25%. Наибольшая крупность щебня для однослойных покрытий должна быть 40 мм, а для верхнего слоя двухслойных покрытий — 20 мм. Прочность исходной породы, идущей на щебень для однослойных и верхнего слоя двухслойных покрытий, должна быть: для изверженных пород $\geqslant 1200$, осадочных $\geqslant 800$ кгс/см², а для нижнего слоя двухслойных покрытий — соответственно $\geqslant 800$ и $\geqslant 600$ кгс/см².

Для однослойных и двухслойных покрытий должны применяться только портландцементы (чисто клинкерные) марки 500 и выше (допускается, как исключение, при технико-экономическом обосновании применение цемента марки 400), а для оснований усовершенствованных дорог — портландцемент с минеральными добавками марок 300 и 400. Содержание трехкальциевого алюмината в цементе для бетона покрытий должно быть не более 10%, а для бетона оснований оно не нормируется.

При сравнительно небольшой толщине (15—25 см) бетонные покрытия обладают большой открытой поверхностью, что способствует испарению воды и возможному появлению трещин. Чтобы избежать вредного влияния этих факторов, необходимо применять бетонные смеси с $ОК = 2$—4 см, с оптимальным содержанием песка, исключающим избыточное количество растворной части, и обеспечивать своевременный уход за свежеуложенным и твердеющим бетоном. Водоцементное отношение для бетона однослойных и верхнего слоя двухслойных покрытий должно быть не более 0,5, для нижнего слоя двухслойных покрытий — не более 0,6. Учитывая работу бетона под совместным воздействием мороза и агрессивной среды, в бетонную смесь необходимо вводить добавки: пластифицирующие (СДБ, ПАЩ-1); пластифицирующе-воздухововлекающие ($М_1$, АМН, ВЛХК, ГКЖ-10 или 11, НЧК, КЧНР); воздухововлекающие (СНВ, СПД, ЦНИПС-1); газообразующие (ГКЖ-94), а также добавки — ускорители твердения и противоморозные.

Количество вовлеченного воздуха должно быть для бетона однослойного покрытия и верхнего слоя двухслойных покрытий в пределах 5—6%; для нижнего слоя двухслойных покрытий в пределах 3,5—4,5%. Учитывая, что в настоящее время применяются новые укладочные машины с постепенным продвижением опалубки граней плит, необходимо обращать внимание на правильное назначение *ОК* и содержание песка, чтобы не допустить оплывания бетона граней плит.

Подбор состава бетона должен производиться по методам, изложенным в настоящем Руководстве, но с учетом особенностей технологических и производственных условий и работы дорожного бетона. Расчет состава ведется по прочности на сжатие с обеспечением требуемой прочности на изгиб или по прочности на изгиб с обеспечением заданной прочности на сжатие и морозостойкость.

БЕТОН ДЛЯ СБОРНЫХ КОНСТРУКЦИЙ, ИЗГОТОВЛЯЕМЫХ С ПРОПАРИВАНИЕМ

Для изготовления изделий и конструкций из бетона марки 300 и ниже применяются шлакопортландцемент и портландцемент с минеральными добавками, а из бетона марок 400—600 и выше — бездобавочный портландцемент марок 500 и 600. Рекомендуется применять пластифицированные и гидрофобные цементы или пластифицирующие и воздухововлекающие добавки, позволяющие снижать расход цемента. Заполнители должны применяться чистые и фракционированные, удовлетворяющие требованиям ГОСТ 10268—70*.

На ускорение твердения бетона оказывают влияния минералогический состав и активность цемента, состав бетона и подвижность (жесткость) бетонной смеси, время предварительной выдержки, режим тепловой обработки, вид форм (открытые или закрытые), в которых пропаривается изделие, и др. Влияние всех этих факторов учесть очень сложно. Поэтому подбор состава бетона должен основываться на проведении пробных затворений при конкретно применяемых материалах, при трех-четырех значениях *Ц/В* и тепловой обработке бетонных образцов по принятому на заводе ЖБИ режиму пропаривания. На основе полученных прочностных показателей строится зависимость $R_б = f(Ц/В)$ и далее графически определяется требуемое значение *Ц/В*. Цементно-водными отношениями для пробных замесов можно задаться, как указано в разд. 5 настоящего Руководства, или определить их расчетом по формулам (7) и (7а), табл. 23 и 22 настоящего Руководства. Затем затворяются пробные замесы при найденном *Ц/В* и двух других значениях, отличающихся от него на ±0,2. Из каждого состава изготавливаются образцы- кубы, затем они пропариваются и испытываются. На основе полученных данных строится график $R_б = f(Ц/В)$ и окончательно устанавливается требуемое *Ц/В* с последующей проверкой обеспечения проектной марки бетона R_{28}.

ГИДРОТЕХНИЧЕСКИЙ БЕТОН

Бетон гидротехнических сооружений разделяется по зонам на: подводную (постоянно находящуюся в воде), зону переменного горизонта воды (подверженную многократному замораживанию и оттаиванию или насыщению и высушиванию), надводную (подверженную эпизодическому омыванию водой и воздействию атмосферных осадков), внутримассивную. Поэтому к гидротехническому бетону и материалам для него предъявляются различные требования на сжатие, морозостойкость, водонепроницаемость, истираемость и кавитационную стойкость, усадку, термическое расширение. В зависимости от условий работы элементов конструкций и сооружений допускается марку бетона по сжатию и водонепроницаемости устанавливать в сроки 60, 90 и 180 сут. Для гидротехнического бетона применяются сульфатостойкий портландцемент, портландцемент с минеральными добавками, пуццолановый и шлаковый портландцементы. Все эти цементы могут выпускаться с пластифицирующими и гидрофобными добавками. Предпочтение для подводного и внутримассивного бетона отдается пуццолановым портландцементам или шлакопортландцементам, так как бетон на этих цементах обладает большей стойкостью как в пресной, так и в минерализованной воде и меньшим тепловыделением. Однако бетон на этих цементах имеет низкую морозостойкость. Для зоны переменного уровня воды следует применять сульфатостойкий портландцемент, портландцемент с минеральными добавками.

На этих цементах обеспечивается получение бетона нужной морозостойкости и водонепроницаемости. Содержание C_3A в цементе для гидротехнического бетона зоны переменного горизонта воды должно быть в пределах до 5—7%, а сумма C_3A+C_4AF должна быть не менее 20%. При наличии агрессивной среды должен применяться сульфатостойкий цемент. Для повышения морозостойкости и водонепроницаемости необходимо вводить СДБ, СНВ, мылонафт и другие добавки. Для уменьшения расхода цемента, тепловыделения и объемных деформаций ε бетон подводных зон, внутримассивный и надводный должны вводиться различные минеральные добавки. Заполнители для гидротехнического бетона должны обеспечить требуемые прочность, морозостойкость, водонепроницаемость и удовлетворять требованиям ГОСТ 4797—69*, а гидротехнический бетон должен удовлетворять требованию ГОСТ 4795—68.

Подбор состава гидротехнического бетона производится по одному из изложенных в данном Руководстве способу, но с учетом особенностей, условий работы бетона и производства работ. Специальные требования по морозостойкости и водонепроницаемости обеспечиваются применением качественных материалов, надлежащим выбором *В/Ц* (из условий обеспечения не только прочности, но морозостойкости и водонепроницаемости), назначением оптимального расхода цемента и песка, применением микронаполнителей и пластифицирующих, воздухововлекающих добавок. Расчетное *В/Ц* должно быть не более максимально установленного по главе СНиП II-28-73 и ГОСТ 4797—69* (см. табл. 5). Состав бетона подбирается заранее, до начала строительства, на материалах, подлежащих применению, с обязательным испытанием бетона непосредственным замораживанием. В последующем во время строительства бетон испытывается на морозостойкость в сроки, установленные СНиП.

БЫСТРОТВЕРДЕЮЩИЙ БЕТОН

Основное требование, предъявляемое к быстротвердеющему бетону, — это обеспечение высокой прочности в раннем возрасте при естественном твердении или при укороченных режимах пропаривания, а также прочности в 28-суточном возрасте. Для приготовления быстротвердеющего бетона должны применяться быстротвердеющий портландцемент и быстротвердеющий шлакопортландцемент или портландцемент с высоким содержанием трехкальциевого алюмината, с дополнительным введением гипса (2—4%), хлористого кальция (0,5—2%) или комплексных добавок (гипс+хлористый кальций) и др.

Наряду с применением специальных цементов и введением ускорителей твердения для получения высокой прочности в ранние сроки необходимо применять возможно низкие водоцементные отношения, жесткие бетонные смеси, чистые фракционированные заполнители и комплексные мероприятия, обеспечивающие наилучшие результаты. При этом необходимо учитывать, что прирост прочности не является прямой суммой прироста прочности, достигаемой каждым способом или фактором в отдельности.

Подбор состава бетона необходимо производить на основе пробных затворений по трем-четырем замесам. Водоцементное отношение определяется исходя из обеспечения необходимой прочности в заданные сроки (1—3 сут) при естественном твердении или после пропаривания по обычному или укороченному режиму. В остальном подбор состава бетона производится обычным способом.

БЕТОНЫ С ДОБАВКАМИ РАЗЛИЧНОГО НАЗНАЧЕНИЯ И ДЕЙСТВИЯ

В бетонную смесь в настоящее время широко вводятся добавки для экономии цемента, повышения пластичности смеси, повышения прочности, морозостойкости, водонепроницаемости, ускорения твердения бетона в раннем возрасте или замедления сроков схватывания. Применяются добавки: пластифицирующие — СДБ, ВРП, МБС; воздухововлекающие — СПД, ЦНИПС-1, СНВ; пластифицирующие-воздухововлекающие — мылонафт, асидол-мылонафт, ВЛХК, ПАЩ-1; газообразующие — ГКЖ-94, ГКЖ-10, 11, 13; ускорители твердения бетона — гипс, хлористый кальций и натрий; противоморозные — нитрит натрия, нитрит-нитрат кальция (ННК), нитрит-нитрат-хлорид кальция (ННХК) и др. Действие многих добавок комплексное, например СДБ повышает пластичность бетонных смесей и морозостойкость бетона, а также позволяет экономить цемент за счет снижения водопотребности или повышать прочность при уменьшении *В/Ц*, при сохранении осадки конуса постоянной; СНВ понижает жесткость, а главное, существенно повышает морозостойкость и т. д. Учитывая различное действие добавок на бетонную смесь и бетон, в настоящее время широко применяются комплексные добавки, позволяющие получить наибольший эффект.

Наряду с применением широкой гаммы химических добавок для разбавления цементов высоких марок при приготовлении бетона низких марок в бетонную смесь вводятся минеральные добавки (трепел, опока, диатомит, молотый гранулированный шлак, зола-унос ТЭЦ и др.).

Подбор состава бетона с введением в бетон химических и активных минеральных добавок производится по одному из изложенных в Руководстве способов, но с учетом назначения и действия добавок. Например, при введении в бетонную смесь СДБ расход цемента необходимо уменьшить на 5—7% или вначале определить *НГЦТ* с этой добавкой, затем по рис. 5 определить расход воды и уточнить его по табл. 25, а в дальнейшем расчет вести обычным способом, например по методике, изложенной в разд. 6 настоящего Руководства. При введении СНВ и других воздухововлекающих и газообразующих добавок необходимо учитывать объем вовлеченного воздуха или газа и расход материалов устанавливать в зависимости от содержания их в бетоне.

Подробные данные изложены в «Руководстве по применению химических добавок к бетону» (М., Стройиздат, 1975) и «Рекомендациях по применению химических добавок в бетоне» (М., Стройиздат, 1977).

МОРОЗОСТОЙКИЙ БЕТОН

Для получения морозостойкого бетона необходимо применять материалы высокого качества, полностью отвечающие требованиям стандартов.

Вяжущее должно быть только на основе портландцементного клинкера с ограниченным содержанием трехкальциевого алюмината (не более 8%), при этом рекомендуется применять: сульфатостойкие портландцементы (по ГОСТ 22266—76) — для бетонов морозостойкостью до Мрз 1000 без добавок, до Мрз 500 с минеральными добавками, до Мрз 100 — шлакопортландцемент; портландцементы (по ГОСТ 10178—76) — для бетонов с морозостойкостью до Мрз 500 без добавок, до Мрз 300 с минеральными добавками.

Все виды цементов могут быть пластифицированными или гидрофобными (см. ГОСТ 10178—76 п. 2.7).

Во всех случаях бетон на принятом к применению вяжущем должен быть проверен на морозостойкость по ГОСТ 10060—76.

Для бетонов марки Мрз 200 и выше следует применять только морозостойкий щебень высокого качества из пород прочностью в 1,5—2 раза выше марки требуемого бетона.

Для бетонов марки Мрз до 200 разрешается применять морозостойкий гравий.

Соотношение между фракциями подбирается из условий наименьшей пустотности смеси.

Песок должен иметь модуль крупности 2,1 и выше.

Если цементы не имеют пластифицирующих или гидрофобных добавок, введенных при заводском помоле, необходимо вводить следующие добавки или их комплексы при изготовлении бетонной смеси:

а) СДБ в количестве 0,2—0,3% по массе цемента в расчете на сухое вещество добавки;

б) СНВ в количестве 0,01—0,02% по массе цемента в расчете на сухое вещество добавки;

в) мылонафт в количестве 0,05—0,20% по массе цемента;

г) ГКЖ-94 в количестве 0,03—0,08% по массе цемента в расчете на исходное вещество 100% концентрации;

д) комплексную добавку (СДБ+СНВ) в указанных количествах и др.

Применение поверхностно-активных добавок должно обеспечить вовлечение в бетонную смесь 3—6% воздуха или газа по объему.

Расчет состава морозостойкого бетона производится по прочности одним из изложенных в Руководстве способов. Если расчетное *В/Ц* получится больше допускаемого в СНиП, ГОСТе или ТУ для бетонов тех или иных конструкций и сооружений, то при подборе принимается допускаемое, а если меньше, то расчетное водоцементное отношение.

После уточнения *В/Ц* дальнейший расчет состава бетона ведется обычным способом. Для устранения возможной ошибки образцы для проверки на прочность и морозостойкость изготовляются из трех составов бетона: полученного расчетом и двух других, отличающихся по *В/Ц* от расчетного на ±0,05.

Морозостойкость подобранных составов бетона проверяется непосредственным испытанием на многократное замораживание и оттаивание по ГОСТ 10060—76. Для возможности оперативной оценки морозостойкости рекомендуется одновременно провести испытание бетона одним из ускоренных методов, изложенных в том же ГОСТе: с определением остаточных деформаций, при замораживании до минус 50° С или по компенсационному фактору.

ОСОБО ТЯЖЕЛЫЕ И ГИДРАТНЫЕ БЕТОНЫ[1]

Особо тяжелые и гидратные бетоны применяют в специальных сооружениях для защиты от радиоактивных воздействий.

К особо тяжелым относятся бетоны с объемной массой более 2,5 и до 5 т/м^3, к гидратным — бетоны, содержащие большое количество химически связанной и полусвязанной воды.

Для особо тяжелых бетонов применяют портландцемент, пуццолановый портландцемент, шлакопортландцемент, глиноземистый цемент, гипсоглиноземистый расширяющийся цемент.

В гидратных бетонах для максимального увеличения содержания в бетоне связанной воды рекомендуется применять цементы глиноземистый, расширяющийся безусадочный, быстротвердеющий, с повышенной добавкой гипса, самонапрягаемый с малой энергией расширения.

В качестве заполнителей в особо тяжелых бетонах используют материалы с высокой плотностью: магнетит, гематит, барит, металлический скрап и т. д.; в гидратных бетонах — лимонит и серпентинит. В комбинированных бетонах применяются тяжелые и обычные заполнители: щебень, гравий, песок.

К заполнителям для особо тяжелых и гидратных бетонов предъявляются следующие дополнительные требования:

а) по минимальной прочности на сжатие: чугунный скрап — 2000, магнетит — 2000, лимонит или гематит — 350, барит — 400 кгс/см^2 (испытание в цилиндрических образцах диаметром и высотой 50 мм);

б) по плотности заполнителей: чугунный скрап — 7—7,1; магне-

---

[1] См. «Указания по проектированию бетонных и железобетонных конструкций из специальных (тяжелых и гидратных) бетонов». М., Госстройиздат, 1959.

тит — 4—5,2; лимонит — 3,2—4; гематит — 4,5—5,3; барит — 4,3—4,7; серпентинит — 2,5—2,7 т/м;

в) по насыпной массе заполнителей: чугунная дробь — 4,5—4,6; обрезки железа — 2,4—4,28; магнетит — 2,4—2,5; лимонит — 1,3—3,2; гематит — 2,4—2,5; барит — 2,7—3; серпентинит — 1,5—1,6 т/м³;

г) по содержанию полуторных окислов (Al_2O_3 и Fe_2O_3) в барите — не более 1% массы заполнителей;

д) по водопоглощению: магнетит и барит — 0,15—0,2; лимонит и гематит — 9—10% по массе.

Для улучшения защитных свойств особо тяжелых бетонов в них вводят добавки, содержащие легкие элементы: литий, кадмий и бор, например карбид бора, хлористый литий, сернокислый кадмий и др.

Исходными величинами при определении составов особо тяжелых и гидратных бетонов являются: объемная масса бетона, обеспечивающая заданные защитные свойства от гамма-излучения; содержание химически связанной воды, обеспечивающее защиту от нейтронного излучения; заданные подвижность бетонной смеси и прочность бетона.

Расчет состава особо тяжелого бетона производится в следующей последовательности.

Определяем:

1) *В/Ц* — по формуле (1).

Для бетонов на лимонитовом песке с крупным заполнителем в виде чугунного скрапа или щебня твердой породы, а также для тощих бетонов на баритовом или магнетитовом заполнителях значение *А* принимается для заполнителей высокого качества равным 0,6, среднего качества — 0,55, низкого — 0,5;

2) расход воды на 1 м³ бетона — по графику на рис. 14.

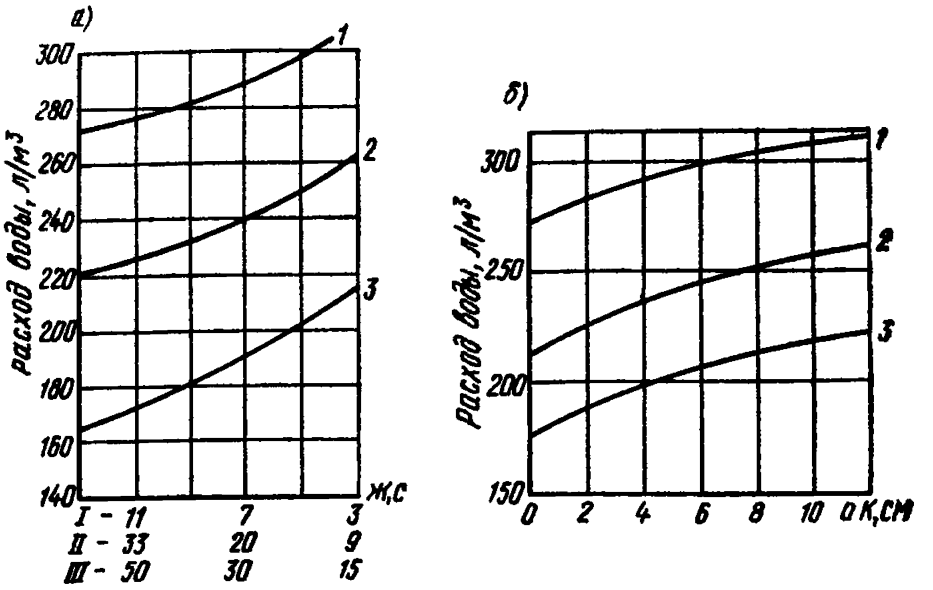

Рис. 14. Водопотребность бетонной смеси для особо тяжелых бетонов на заполнителях различного вида (*Щ+П*)

а — жесткие смеси; *б* — пластичные смеси; *1* — лимонит+лимонит; *2* — лимонит+магнетит, магнетит+магнетит; лимонит +чугун; лимонит+барит; *3* — барит+барит; песок+чугун; песок+щебень; *I, II, III* — определение жесткости (см. рис. 1)

Для обеспечения однородности бетонной смеси рекомендуется применять малоподвижные бетонные смеси с осадкой конуса 1—3 см и жесткостью 20—25 с по техническому вискозиметру или 4—6 с по ГОСТ 10181—76;

3) расход цемента — по формуле (3);

4) расход заполнителей по формуле

$$З = П + Щ = \left[1000 - \left(\frac{Ц}{\gamma_ц} + В\right)\right]\gamma_з;$$

5) долю песка в смеси заполнителей по формуле

$$r = \frac{V_{пус.щ}\,\gamma_{нас.п}}{\gamma_{нас.щ} + V_{пус.щ}\,\gamma_{нас.п}} + \Delta r,$$

где Δr — уточняющая поправка для особо тяжелых бетонов, равная 0,08—0,1;

6) расход песка по формуле

$$П = rЗ;$$

7) расход щебня по формуле

$$Щ = (1 - r)\,З.$$

На пробном замесе проверяют жесткость или осадку конуса бетонной смеси и объемную массу свежеуложенного бетона, по которому корректируют расход материала на 1 м³ бетона.

Пример 1. Определить состав вибрированного бетона марки 200 с объемной массой не менее 3000 кг/м³; $ОК = 1—2$ см; твердение — в нормальных условиях.

Материалы: портландцемент марки 400; крупный заполнитель — плотный магнетитовый щебень крупностью 40 мм, плотностью 4,5 кг/л, объемной массой 2,6 кг/л, пустотностью 0,422; магнетитовый песок плотностью 4 кг/л, объемной массой 2,5 кг/л, пустотностью 0,375.

Определяем:

1) $В/Ц$ по формуле (1):

$$В/Ц = \frac{0{,}55 \cdot 400}{200 + 0{,}5 \cdot 0{,}55 \cdot 400} = \frac{220}{310} = 0{,}71; \quad Ц/В = 1{,}41;$$

2) расход воды по графикам (см. рис. 14) — 225 л/м³;

3) расход цемента

$$Ц = 225 : 0{,}71 = 317 \text{ кг/м}^3;$$

4) долю песка в смеси заполнителей

$$r = \frac{0{,}422 \cdot 2{,}4}{2{,}6 + 0{,}422 \cdot 2{,}4} + 0{,}1 = \frac{1{,}008}{2{,}6 + 1{,}008} + 0{,}1 = 0{,}38;$$

5) плотность смеси заполнителей $(П + Щ)$

$$\gamma_з = 4{,}5\,(1 - 0{,}38) + 4 \cdot 0{,}38 = 2{,}79 + 1{,}52 = 4{,}31;$$

6) расход заполнителей на 1 м³ бетона

$$З = \left[1000 - \left(225 + \frac{317}{3{,}1}\right)\right] 4{,}31 = 673 \cdot 4{,}31 = 2900 \text{ кг/м}^3;$$

7) расход песка

$$П = 2900 \cdot 0{,}38 = 1100 \text{ кг/м}^3;$$

8) расход щебня

$$Щ = 2900 \cdot 0{,}62 = 1800 \text{ кг/м}^3;$$

9) теоретическую объемную массу бетонной смеси

$$\gamma_{б.с} = 317 + 225 + 1100 + 1800 = 3442 \text{ кг/м}^3.$$

Расчетный состав бетона обязательно уточняется на пробных затворениях по методике, изложенной в разд. 8 настоящего Руководства.

Пример 2. Определить количество связанной воды в гидратном бетоне с объемной массой 2600 кг/м³ на лимонитовом заполнителе и портландцементе марки 400, если расход воды 275 л/м³ и расход цемента 350 кг:

1) количество химически связанной воды в цементном камне

$$350 \cdot 0{,}2 = 70 \text{ л};$$

2) содержание заполнителей в бетоне

$$З = 2600 - (350 + 275) = 1975;$$

3) количество связанной воды в лимоните, которое принимаем равным 10% его массы:

$$1975 \cdot 0{,}1 = 197{,}5 \text{ л};$$

4) общее количество связанной воды

$$В = 70 + 197{,}5 = 268 \text{ л}.$$

Особенности производства бетонных работ заключаются в следующем:

время перемешивания бетонной смеси в бетоносмесителе не должно быть менее 2 мин;

объем замеса бетоносмесителя уменьшается обратно пропорционально объемной массе бетона. Например, при объемной массе особо тяжелого бетона 3442 кг/м³, а обычного 2350 кг/м³ объем загрузки при объеме барабана бетоносмесителя 500 л не должен превышать $\frac{500 \cdot 2350}{3442} = 341$ л;

уплотнение бетонной смеси должно производиться при помощи вибрации.

ОСОБЕННОСТИ РАСЧЕТА СОСТАВА НАПРЯГАЮЩИХ БЕТОНОВ

Бетоны на напрягающем цементе (напрягающие бетоны), обладающие плотной непроницаемой структурой и способностью расширяться в процессе твердения, применяются для преднапряженных (самонапряженных) конструкций, самонапрягаемых стыков бассейнов, резервуаров, трубопроводов, выполняемых из сборных элементов, с нормированной (расчетной) величиной самонапряжения.

Для гидроизоляции, компенсации усадочных температурных деформаций в целях исключения или увеличения расстояния между

температурно-усадочными швами в сооружениях применяются напрягающие бетоны с ненормированной величиной самонапряжения.

Напрягающий цемент должен удовлетворять требованиям ТУ 21-20-18-74 МПСМ СССР. Заполнители — обычно применяемые для тяжелого бетона. Для улучшения удобоукладываемости могут применяться добавки СДБ или декстрин.

РАСЧЕТ СОСТАВА НАПРЯГАЮЩЕГО БЕТОНА С НЕНОРМИРОВАННОЙ ВЕЛИЧИНОЙ САМОНАПРЯЖЕНИЯ

Данный расчет в основном выполняется по формулам, изложенным в разд. 4 настоящего Руководства, с соблюдением всех требований и ограничений $В/Ц$ ($Ц/В$) как для обычного бетона с учетом следующих особенностей:

1. Количество воды затворения, л/м³, увеличивается по формуле

$$B_1 = B + bНЦ,$$

где B — расход воды, л/м³, установленный по табл. 14;

b — коэффициент, характеризующий дополнительную водопотребность $НЦ$;

$НЦ$ — расход напрягающего цемента, кг/м³, определенный по формуле (3).

2. Значение коэффициента b устанавливается в интервале 0,03—0,08 в зависимости от температуры смеси и степени замедления схватывания ее. Меньшее значение b (0,03—0,05) принимается при температуре среды и смеси $t \approx 15°$ С и $В/Ц < 0{,}3$; большее b (0,06—0,08) — при $t \approx 30°$ С и $В/Ц > 0{,}3$; при $В/Ц = 0{,}3$ принимают среднее значение b (0,04—0,06).

3. Дальнейший расчет расхода заполнителей производится с учетом повышенного расхода воды B_1.

Полученный состав бетона проверяется контрольным замесом и при необходимости корректируется, как указано в разд. 8 настоящего Руководства.

РАСЧЕТ СОСТАВА НАПРЯГАЮЩЕГО БЕТОНА С НОРМИРОВАННОЙ (РАСЧЕТНОЙ) ВЕЛИЧИНОЙ САМОНАПРЯЖЕНИЯ

Основой данного расчета является марка $НЦ$ по самонапряжению $R^{ц}_{сн}$ в соответствии с ТУ 21-20-18-74 МПСМ СССР.

Исходя из заданной марки бетона по самонапряжению $R_{сн}$ определяется расход $НЦ$ (кг/м³ бетона) по формуле

$$НЦ = 550 \left(R_{сн}/R^{ц}_{сн}\right)^2 + 450.$$

Примечания: 1. Приведенная зависимость действительна при расходе $НЦ$ в пределах 500—1000 кг/м³ и $ОК = 1$—3 см.

2. Для пластичных бетонов с осадкой конуса более 6—8 см $R_{сн}$ принимается с коэффициентом 1,5.

3. Марка бетона по самонапряжению характеризуется напряжением, развиваемым в процессе твердения бетона при упругом ограничении, эквивалентном армированию $\mu = 0{,}01$ (1%).

Расход воды $В$, необходимый для обеспечения после приготовления бетонной смеси расчетной подвижности, при использовании *НЦ* с нормальными сроками схватывания (начало не ранее 30 мин, конец не позднее 4 ч от начала затворения *НЦ*), ориентировочно определяется по формулам:

$$В = 0{,}20Ц + 100 \text{ (для } ОК = 1 - 3 \text{ см)};$$

$$В = 0{,}18Ц + 135 \text{ (для } ОК = 6 - 8 \text{ см)}.$$

При использовании *НЦ* с более короткими сроками схватывания (начало не ранее 2 мин, конец не позднее 1 ч) расход воды затворения $В$ на 1 м³ бетона увеличивают (в зависимости от температуры смеси и степени замедления схватывания ее) на 3—8% массы *НЦ*.

Дальнейший расчет общего количества заполнителей производится по формулам, изложенным в разд. 4 настоящего Руководства.

Доля песка r, рекомендуемая в табл. 21, в напрягающих бетонах должна быть повышена на 0,01—0,08 и тем больше, чем меньше цемента и чем крупнее заполнитель.

Подобранный состав бетона проверяется контрольным замесом. В случае необходимости корректируется с учетом требований указанных положений.

ПРИНЯТЫЕ УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ

$R_ц$ — активность цемента (фактическая прочность), кгс/см²;

$R^ц_{сн}$ — марка цемента (напрягающего) по самонапряжению, кгс/см²;

$R_б$, $R_{п.б}$, $R_р$ — прочность соответственно обычного, песчаного бетонов и раствора на сжатие, кгс/см²;

$R_{сн}$ — марка бетона по самонапряжению, кгс/см²;

$R_{к.п}$ — прочность исходной каменной породы, идущей на щебень, кгс/см²;

НГЦТ — нормальная густота цементного теста, %;

Ц, *В*, *П*, *Щ (Г)*, *З* — расход соответственно цемента, воды, песка, щебня, гравия, заполнителя (*П*+*Щ*), кг/м³;

А и A_1 — коэффициенты, учитывающие качество заполнителей;

$γ_ц$, $γ_п$, $γ_щ$, $γ_г$ — плотность материалов: соответственно цемента, песка, щебня, гравия, кг/л;

$V_{ц.т}$, $V_ц$, $V_п$, $V_щ$, $V_г$, $V_з$, $V_б$, $V_р$ — абсолютный объем материалов: соответственно цементного теста, цемента, песка, щебня, гравия, заполнителя, бетона и раствора, л/м³;

$V_{нас}$ — насыпной объем (зернового) материала.

Индекс обозначает вид материала, например $V_{нас.п}$, $V_{нас.щ}$, $V_{нас.г}$, $V_{нас.з}$, $V_{нас.ц}$ — насыпной объем соответственно песка, щебня, гравия, заполнителя, цемента и т. д. л/м³;

$γ_{нас}$ — насыпная объемная масса (зернового) материала.

Индекс обозначает вид материала, например $γ_{нас.п}$, $γ_{нас.щ}$, $γ_{нас.г}$, $γ_{нас.ц}$, $γ_{нас.з}$ — насыпная объемная масса соответственно песка, щебня, гравия, цемента, заполнителя и т. д., кг/л, кг/м³, т/м³;

$γ^т_{б.с}$, $γ^т_{п.б.с}$ — теоретическая объемная масса уплотненной бетонной и песчанобетонной смеси, кг/л, кг/м³, т/м³;

$γ^ф_{б.с}$, $γ^ф_{п.б.с}$ — фактическая объемная масса уплотненной бетонной и песчанобетонной смеси, кг/л, кг/м³, т/м³;

$V_{пус}$ — межзерновая пустотность материалов в стандартно-насыпном состоянии. Индекс обозначает вид материалов, например $V_{пус.п}$, $V_{пус.щ}$, $V_{пус.г}$, $V_{пус.з}$, $V_{пус.ц}$ — пустотность соответственно песка, щебня, гравия, заполнителя, цемента, %;

$M^п_{кр}$ — модуль крупности песка;

НК — наибольшая крупность заполнителей Дополнительная буква обозначает вид материала, например, *НКЩ*, *НКП*, *НКГ*, *НКЗ* — наибольшая крупность соответственно щебня, песка, гравия, заполнителя, мм;

П/*Щ* — соотношение между песком и щебнем по массе, %;

λ — коэффициент водопоглощения и смачивания заполнителей. Индекс обозначает вид материала, например $λ_п$, $λ_щ$, $λ_г$, $λ_з$ — коэффициент водопоглощения и смачивания соответственно песка, щебня, гравия, заполнителя, %;

W — водопоглощение материалов за время, регламентируемое стандартами. Индекс обозначает вид материала, например $W_п$, $W_щ$ — водопоглощение песка, щебня и т. д., %;

$B_п$, $B_щ$, $B_г$, $B_з$ — водопотребность соответственно песка, щебня, гравия, заполнителя, %;

$W_в$ — влажность материалов. Индекс обозначает вид материалов, например $W_{в.п}$ — влажность песка;

r — доля песка в смеси заполнителей, %;

α — коэффициент заполнения пустот и раздвижки зерен щебня (гравия) раствором;

$\alpha_{ц.т}$ — коэффициент заполнения пустот и раздвижки зерен песка цементным тестом;

$k_в$ — коэффициент выхода бетона;

C_3S — трехкальциевый силикат (алит);

C_2S — двухкальциевый силикат (белит);

C_3A — трехкальциевый алюминат (целит);

C_4AF — четырехкальциевый алюмоферрит;

МБС — продукт микробиологического синтеза;

СДБ — сульфитно-дрожжевая бражка;

ВЛХК — пластификатор;

$М_1$ — мылонафт;

ПАЩ-1 — пластификатор адипиновый;

АМН — асидол-мылонафт;

СПД — синтетическая поверхностно-активная добавка;

ЦНИПС-1 — омыленный древесный пек;

СНВ — смола нейтрализованная воздухововлекающая;

ГКЖ-94 — полигидросилоксан;

ГКЖ-10 — этилсиликонат натрия;

ГКЖ-11 — метилсиликонат натрия;

БТЦ — быстротвердеющий портландцемент;

ССПЦ — сульфатостойкий портландцемент.

СОДЕРЖАНИЕ

Стр.

Предисловие 3
1. Общие положения 4
2. Требования к материалам для приготовления бетона . . . 4
3. Исходные данные для расчета и подбора состава бетона . 9
4. Расчетно-экспериментальный способ определения состава тяжелого бетона 16
5. Ускоренный способ оценки качества цемента в бетоне и назначение состава бетона 20
6. Подбор состава бетона по таблицам, графикам, номограммам 31
7. Подбор состава мелкозернистого (песчаного) бетона . . . 44
8. Экспериментальная проверка и корректирование расчетного состава бетона, определение производственного состава бетона (с учетом влажности заполнителей) и расчет материалов на замес бетоносмесителя 52
9. Планирование экспериментов и выбор состава бетонов с применением математико-статистических методов 58
10. Определение, контроль и оценка качественных характеристик материалов, бетонной смеси и бетона при проектировании его состава 85
Приложение 1. Определение водопотребности заполнителей в бетонной смеси 88
Приложение 2. Особенность подбора состава тяжелых бетонов разных видов и на материалах различного качества 89
Приложение 3. Принятые условные обозначения и сокращения 101

НИИЖБ ГОССТРОЯ СССР

РУКОВОДСТВО
ПО ПОДБОРУ СОСТАВОВ ТЯЖЕЛОГО БЕТОНА

Редакция инструктивно-нормативной литературы
Зав. редакцией **Г. А. Жигачева**
Редактор **С. В. Беликина**
Мл. редактор **Л. Н. Козлова**
Технический редактор **Ю. Л. Циханкова**
Корректоры **Л. С. Лелягина, Е. Н. Кудрявцева**

Сдано в набор 23.02.79. Подписано в печать 08.06.79. Т-12103. Формат 84×108$^{1}/_{32}$. Бумага типографская № 2. Гарнитура «Литературная». Печать высокая. Усл. печ. л. 5,46. Уч.-изд. л. 6,14. Заказ № 904. Тираж 43.000 экз. Дог. № XII8282. Цена 30 к.

Стройиздат
103006, Москва, Каляевская, 23а

Владимирская типография «Союзполиграфпрома»
при Государственном комитете СССР по делам издательств, полиграфии и книжной торговли
600000, г. Владимир, Октябрьский проспект, д. 7

gost.e-ecolog.ru