

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ

Белорусский национальный технический университет

Кафедра «Строительные материалы и технология строительства»

В. В. Бабицкий
С. Н. Ковшар
Олмас Жураев

БЕТОНОВЕДЕНИЕ

Учебно-методическое пособие

Минск
БНТУ
2026

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ
Белорусский национальный технический университет

Кафедра «Строительные материалы и технология строительства»

В. В. Бабицкий
С. Н. Ковшар
Олмас Жураев

БЕТОНОВЕДЕНИЕ

Учебно-методическое пособие
для обучающихся по специальности
7-07-0732-01 «Строительство зданий и сооружений»
профилизации «Производство строительных изделий
и конструкций»

*Рекомендовано учебно-методическим объединением
высших учебных заведений Республики Беларусь по образованию
в области строительства и архитектуры*

Минск
БНТУ
2026

УДК 666.97+691.32(075.8)
ББК 38.33я7
Б54

Р е ц е н з е н т ы:
кафедра «Промышленное и гражданское строительство»
Белорусско-Российского университета
(зав. кафедрой, канд. техн. наук, доцент *С. В. Данилов*);
доцент кафедры стекла, керамики и вяжущих материалов
Белорусского государственного технологического университета,
канд. техн. наук, доцент *Н. М. Шалухо*

Бабицкий, В. В.

Б54 Бетоноведение : учебно-методическое пособие для обучающихся по специальности 7-07-0732-01 «Строительство зданий и сооружений» профилизации «Производство строительных изделий и конструкций» / В. В. Бабицкий, С. Н. Ковшар, Олмас Жураев. – Мн. : БНТУ, 2026. – 144 с.

ISBN 978-985-31-0200-0.

Представлены практические методы проектирования состава бетона различных видов, в том числе с химическими добавками, а также с учетом долговечности бетона и железобетона. Приведены научно обоснованные методы расчета, формулы, таблицы, графики, номограммы. Даны примеры расчетов.

Пособие предназначено для обучающихся по специальности 7-07-0732-01 «Строительство зданий и сооружений» профилизации «Производство строительных изделий и конструкций».

УДК 666.97+691.32(075.8)
ББК 38.33я7

ISBN 978-985-31-0200-0

© Бабицкий В. В., Ковшар С. Н., Жураев Олмас, 2026
© Белорусский национальный технический университет, 2026

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ 4
1. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ 5
2. ПРОЕКТИРОВАНИЕ СОСТАВА ТЯЖЕЛОГО БЕТОНА 15
2.1. Классический метод профессора И. Н. Ахвердова 15
2.2. Модифицированный метод профессора И. Н. Ахвердова 34
2.3. Упрощенный метод 49
2.4. Метод НИИЖБ 53
2.5. Метод абсолютных объемов 56
2.6. Метод профессора В. П. Сизова. 61
3. ПРОЕКТИРОВАНИЕ СОСТАВА ЛЕГКОГО БЕТОНА 75
4. ОСОБЕННОСТИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ СОСТАВА БЕТОНА С ХИМИЧЕСКИМИ ДОБАВКАМИ 88
4.1. Бетон с пластифицирующими добавками 88
4.2. Бетон с ускорителями твердения 93
4.3. Бетон с воздухововлекающими добавками 107
5. ОСОБЕННОСТИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ СОСТАВА БЕТОНА С УЧЕТОМ ДОЛГОВЕЧНОСТИ ЖЕЛЕЗОБЕТОНА 111
5.1. Долговечность железобетонных конструкций, эксплуатирующихся в условиях воздействия углекислого газа и солей-хлоридов 112
5.2. Бетон с противоморозными добавками 121
6. МНОГОФАКТОРНЫЙ МЕТОД ПРОЕКТИРОВАНИЯ СОСТАВА ТЯЖЕЛОГО БЕТОНА 125
7. РАСЧЕТНО-ГРАФИЧЕСКИЙ МЕТОД 128
8. РАСЧЕТ СОСТАВА ЯЧЕИСТОБЕТОННОЙ СМЕСИ 135
9. АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ 140
ЛИТЕРАТУРА 144

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время существует значительное число методов проектирования состава бетона, позволяющих с большей или меньшей точностью определять расходы вяжущего, мелкого и крупного заполнителей, а также воды, соотношение которых обеспечивает получение заданной удобоукладываемости бетонной смеси и прочностных характеристик бетона. Значительно малочисленней методы, позволяющие прогнозировать такие важные характеристики бетона, как водонепроницаемость и морозостойкость. Методы же проектирования состава с элементами прогнозирования долговечности бетона и железобетона крайне редки. Кроме того, современная технология бетона и железобетона предполагает использование разнообразных добавок (пластифицирующих, воздухововлекающих, ускорителей твердения, ингибиторов коррозии стали и др.), налагающих дополнительные трудности при проектировании составов бетона.

На овладение студентами в рамках дисциплины «Бетоноведение» современными методами проектирования состава бетона с заданными свойствами, в том числе и изменяющимися во времени, и направлено данное учебно-методическое пособие.

1. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

В настоящее время в большинстве нормативных документов регламентируется класс бетона по прочности на сжатие. Он определяется гарантированной прочностью ($f^G_{c.cube}$), контролируемой на кубах 15 × 15 × 15 см с обеспеченностью 0,95. Связь между гарантированной прочностью и средней на осевое сжатие (f_{cm}) в возрасте 28 суток, на которую и проектируется состав бетона, выражается следующим образом:

$$f_{cm} = \frac{f^G_{c.cube}}{1 - 1,64 \cdot V}, \text{ МПа}, \qquad (1.1)$$

где V – коэффициент вариации прочности бетона, д. ед.

Классы бетона по прочности на сжатие выстроены в ряд: С8/10; С10/12,5; С12/15; С16/20; С18/22,5; С20/25; С22/27,5; С25/30; С28/35, С30/37; С32/40; С35/45; С40/50; С45/55; С50/60; С55/67; С60/75; С70/85; С80/95; С90/105.

Если величина V неизвестна, то в расчетах она может быть принята равной 0,135 (нормативный коэффициент вариации прочности бетона). Тогда выражение (1.1) можно упростить:

$$f_{cm} = \frac{f^G_{c.cube}}{0,78}, \text{ МПа}. \qquad (1.2)$$

Например, для бетона класса С20/25 состав необходимо проектировать из условия обеспечения прочности на сжатие:

$$f_{cm} = \frac{f^G_{c.cube}}{0,78} = \frac{25}{0,78} = 32,1 \text{ МПа}.$$

В нормативной и технической литературе встречается и старая регламентация. Классы обозначались буквой «В», после которой следовало значение гарантированной прочности. Например, современное С16/20 соответствует ранее используемому В20. Следует отметить, что для легких бетонов, а также бетонов дорожного и мостового строительства сохранилось обозначение классов индексом «В».

Среди некоторых технологов «старой закалки», а особенно лиц, далеких от технологии бетона и железобетона, еще в ходу термин «марка бетона по прочности на сжатие». Она обозначалась буквой М, после которой ставится число, означающее предел прочности бетона на сжатие в кгс/см^2. Например, запись М300 означает марку бетона, соответствующую пределу прочности на сжатие, равному 300 кгс/см^2. С достаточной для практических целей точностью прочность бетона $f_б$, на которую подбирается бетон, можно получить, разделив марку на 10. Например, для бетона М300 получим:

$$f_{cm} = \frac{300}{10} = 30 \text{ МПа}.$$

В связи с этим следует отметить, что существует в корне порочная практика подбора состава бетона посредством перехода от класса бетона к марке по таблицам, имеющимся в различной литературе (в том числе и справочной) в области бетоноведения. Например, бетон класса С20/25 в принципе может быть отнесен к марке М300 или М350 (находится на стыке марок). Тогда в первом случае подбор состава будет вестись на прочность 30 МПа, то есть заведомо меньше необходимой прочности 32,1 МПа, а во втором – на 35 МПа, что существенно выше заданного значения.

Если к бетону предъявляются требования по морозостойкости или водонепроницаемости, то рассчитанная в процессе проектирования состава величина водоцементного отношения, обеспечивающая заданную прочность, сопоставляется с данными табл. 1.1 и назначается наименьшее (из трех возможных) значение, обеспечивающее все требуемые характеристики бетона.

Таблица 1.1

Требования к бетону по морозостойкости и водонепроницаемости

Марка бетона по морозостойкости	В/Ц не более	Марка бетона по водонепроницаемости	В/Ц не более
F100	0,60	W2	0,70
F200	0,55	W4	0,60
F300	0,50	W6	0,55
F400	0,45	W8	0,45
F500	0,40	W12	0,40

Качество компонентов бетонной смеси должно удовлетворять требованиям соответствующих нормативных документов. Кроме того, при проектировании составов бетона необходимо учитывать следующие специфические требования.

Марку цемента выбирают по табл. 1.2 в зависимости от класса бетона.

Таблица 1.2

Рекомендуемые и допускаемые марки цемента

Класс бетона по прочности на сжатие	Марки цемента для бетона	
	рекомендуемые	допускаемые
С8/10-С20/25	400	500
С25/30	500	550, 600
С30/37	550	500, 600
С35/45 и выше	600	500, 550

Получаемый в результате расчетов состава бетона расход цемента должен лежать в пределах 200 (для железобетона 220)–600 кг/м^3 (поскольку состав бетона проектируется на 1 м^3, то в дальнейшем для упрощения размерность м^3 будем опускать, то есть писать расходы компонентов не кг/м^3, а просто кг).

Наибольшую крупность щебня, если она не задана, можно назначать по табл. 1.3.

Таблица 1.3

Выбор наибольшей крупности щебня

Вид конструкций и способ укладки бетонной смеси	Допускаемая наибольшая крупность щебня
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 лещадных зерен не более 15 %

Подвижность и жесткость бетонной смеси (если они не заданы) назначаются в зависимости от особенностей конструкции, для которой проектируется состав бетона, а также имеющихся средств уплотнения смеси (табл. 1.4).

Таблица 1.4

Выбор удобоукладываемости бетонной смеси

Конструкции	Способ укладки бетонной смеси		
	с вибрацией		без вибрации
	ОК, см	Ж, с	ОК, см
Дорожные покрытия, уплотненные бетоноукладочными машинами	2	5	–
Дорожные покрытия, уплотненные площадочными вибраторами и виброрейками	4	4	–
Подготовка под фундаменты и полы, дорожные и аэродромные покрытия	1–2	6–10	2–3
Сборные железобетонные на жестких смесях с немедленной распалубкой	0	10–20	–
Массивные неармированные и с редко расположенной арматурой	2–4	4–6	3–6
Каркасные железобетонные (плиты, балки, колонны)	4–8	Менее 4	6–12
Железобетонные с густо расположенной арматурой (бункера, силосы и др.)	8–10	–	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	–	–

Примечание. Здесь и далее ОК – осадка конуса бетонной смеси, см; Ж – жесткость бетонной смеси, с.

Состав бетона проектируется применительно к получению его характеристик в проектном возрасте (28 суток нормального

твердения). Но при необходимости оценки прочности бетона в возрасте, отличном от 28 суток, можно для прикидочных расчетов применять формулу:

$$f_\tau = f_{28}\frac{\lg \tau}{\lg 28}, \text{ МПа}, \qquad (1.3)$$

где τ – искомый возраст бетона в сутках (не менее 3 суток);

$f\tau$ – прочность бетона в возрасте n суток;

f_{28} – прочность бетона в возрасте 28 суток.

При использовании формулы (1.5) следует иметь в виду, что она учитывает только один влияющий фактор (время), поэтому не всегда точна.

В случае учета влияния температуры и длительности твердения бетона рекомендуется использовать данные табл. 1.5.

Таблица 1.5

Относительная прочность тяжелого бетона при твердении в естественных условиях

Цемент	Прочность бетона, МПа	Время твердения, сутки	Средняя температура воздуха, °С				
			0	5	10	20	30
Портландцемент марок 400–500	20–30	1	4	9	14	20	30
		2	10	19	25	40	55
		3	18	27	37	50	65
		5	28	38	50	65	80
		7	35	48	58	70	90
		14	50	62	72	90	95
		28	65	77	85	100	102
		365	102	112	115	115	115
Портландцемент марок 500–600	40–50	1	7	12	15	30	40
		2	15	20	30	45	60
		3	20	30	40	55	70
		5	30	40	55	70	80
		7	37	50	65	80	90
		14	50	70	75	98	100
		28	70	80	90	100	102
		365	105	110	112	112	112

Окончание табл. 1.5

Цемент	Прочность бетона, МПа	Время твердения, сутки	Средняя температура воздуха, °С				
			0	5	10	20	30
Шлакопортландцемент марок 300–400	20–30	1	2	3	5	12	20
		2	5	8	12	20	35
		3	8	12	18	30	45
		5	13	20	30	45	55
		7	18	25	40	55	65
		14	25	40	55	75	90
		28	35	55	70	100	102
		12 мес.	90	105	110	120	120

В технологии сборного бетона и железобетона для ускорения процессов твердения в основном применяют тепловую обработку. В этом случае для расчета ориентировочной относительной (в % от прочности в проектном возрасте) прочности бетона в процессе тепловой обработки (пропаривания) можно пользоваться данными, приведенными в табл. 1.6.

Таблица 1.6

Нарастание прочности бетона при пропаривании

Класс бетона по прочности на сжатие	Группа активности цемента при пропаривании	Температура изотермического прогрева, °С	Относительная прочность бетона, %, при длительности изотермической выдержки, часы			
			4	6	12	18
1	2	3	4	5	6	7
С12/15	1	80	58	65	70	74
		60	34	44	53	62
		40	15	26	36	46
	2	80	52	60	66	71
		60	30	38	47	57
		40	–	22	32	41
	3	80	45	53	60	68
		60	20	31	41	51
		40	–	18	26	35

Окончание табл. 1.6

1	2	3	4	5	6	7
C18/22,5	1	80	65	70	74	76
		60	43	50	57	65
		40	20	34	44	54
	2	80	57	63	70	73
		60	37	44	53	62
		40	15	30	38	47
	3	80	50	57	63	69
		60	25	37	46	57
		40	–	22	29	36
C25/30	1	80	70	74	78	80
		60	46	56	65	74
		40	30	42	57	65
	2	80	61	67	75	79
		60	41	50	60	68
		40	20	36	47	54
	3	80	52	62	70	77
		60	28	40	53	61
		40	15	27	36	44
C30/37	1	80	72	76	82	83
		60	52	61	70	75
		40	38	48	59	65
	2	80	67	73	77	81
		60	49	57	65	71
		40	28	40	53	58
	3	80	60	66	72	78
		60	32	43	56	63
		40	20	32	38	45

Примечание. Во всех случаях время предварительной выдержки принято равным 2 часа, время охлаждения также 2 часа. Время подъема температуры из условия обеспечения равной скорости (20 °С/ч) принято равным 1, 2 и 3 часа для температуры изотермической выдержки 40, 60 и 80 °С соответственно. Прочность определяют через 4 часа после тепловой обработки.

Подобранные (расчетные) составы бетона корректируют на опытных замесах по подвижности смеси и оптимальному количеству песка в смеси заполнителей, проверяют на прочность и другие

свойства бетона в соответствии с техническим заданием и после уточнения их передают на производство.

Удобоукладываемость бетонной смеси. По рассчитанному составу приготавливают бетонную смесь объемом не менее 10 л. Проверяют подвижность (жесткость) бетонной смеси.

Если подвижность (жесткость) соответствует расчетной, данную смесь используют для изготовления образцов при определении физико-механических характеристик бетона.

Если подвижность бетонной смеси меньше заданной (жесткость выше заданной), то в опытный замес добавляют до 5–10 % первоначального расхода цемента на замес, причем обязательно с сохранением расчетного водоцементного отношения.

Если подвижность бетонной смеси больше заданной (жесткость меньше заданной), в замес следует добавить до 5–10 % песка и щебня при сохранении их соотношения.

При несоответствии подвижности (жесткости) откорректированного состава заданному значению необходим полный теоретический перерасчет состава бетона. Если же заданная подвижность (жесткость) достигнута, состав необходимо откорректировать по величинам добавки цемента и воды (либо песка и щебня), а также по получающейся средней плотности бетонной смеси.

Физико-механические характеристики. Основываясь на откорректированном по удобоукладываемости бетонной смеси составе, формуют образцы для определения прочности, морозостойкости и других заданных параметров. Параллельно приготавливают еще два состава бетонной смеси, в которых водоцементное отношение назначают больше и меньше установленного значения на 0,05. При этом расходы воды и щебня на замес составляют неизменными, а изменяют (увеличивают и уменьшают) расход цемента. С целью сохранения объема замеса изменяют (уменьшают и увеличивают) расход песка, причем так, чтобы абсолютный объем добавляемого или убираемого цемента замещался аналогичным абсолютным объемом песка:

$$В_з = В,\ кг, \tag{1.4}$$

$$Щ_з = Щ,\ кг, \tag{1.5}$$

$$Ц_з = \frac{В}{\left(\frac{В}{Ц}\right) \pm 0{,}05}, \text{ кг}, \tag{1.6}$$

$$П_з = \frac{Ц - Ц_з}{\rho_ц} + П, \text{ кг}, \tag{1.7}$$

где Ц, П, Щ, В – ранее подобранные расходы компонентов бетонной смеси;

$Ц_з$, $П_з$, $Щ_з$, $В_з$ – расходы компонентов (цемента, песка, щебня и воды) на составы с измененным на 0,05 исходным значением водоцементного отношения.

После определения в заданные сроки твердения необходимых параметров за основу берут тот состав бетона, характеристики которого наибольшие, причем выше проектных. Этот состав и рекомендуют в производство.

Производственные составы бетонов рассчитывают с учетом фактической влажности заполнителей, применяемых при приготовлении бетона, путем корректировки расходов воды затворения и влажных заполнителей. В лабораторном составе бетона расходы компонентов дают для сухих материалов. В производственных же условиях учитывают влажность заполнителей, поэтому их расходы (а также расход воды) изменяются. Расход цемента в производственном составе такой же, как и в лабораторном. Производственные же расходы мелкого ($П_{пр}$) и крупного ($Щ_{пр}$) заполнителей увеличивают с учетом их влажности:

$$Ц_{пр} = Ц, \text{ кг}. \tag{1.8}$$

$$П_{пр} = П \cdot \left(1 + \frac{W_п}{100}\right), \text{ кг}, \tag{1.9}$$

$$Щ_{пр} = Щ \cdot \left(1 + \frac{W_щ}{100}\right), \text{ кг}, \tag{1.10}$$

где Ц, П, Щ – расходы мелкого и крупного сухих заполнителей (в соответствии с лабораторным составом);

$W_{\text{п}}$, $W_{\text{щ}}$ – влажность мелкого и крупного заполнителей, %.

Производственный расход воды ($\text{В}_{\text{пр}}$) уменьшают в сравнении с лабораторным (В) на массу воды, содержащейся в заполнителе:

$$\text{В}_{\text{пр}} = \text{В} - \text{П} \cdot \frac{W_{\text{п}}}{100} - \text{Щ} \cdot \frac{W_{\text{щ}}}{100}, \text{ кг.} \qquad (1.11)$$

Зачастую подобранный состав бетона выражают в относительных долях (лабораторный или производственный), при этом долю цемента принимают равной единице. Производственный состав выразится так:

$$1 : X : Y = \frac{\text{Ц}}{\text{Ц}} : \frac{\text{П}_{\text{пр}}}{\text{Ц}} : \frac{\text{Щ}_{\text{пр}}}{\text{Ц}}. \qquad (1.12)$$

Рассмотрим рекомендуемые кафедрой «Строительные материалы и технология строительства» студентам для использования при выполнении лабораторных и практических работ, курсовых и дипломных проектов методики проектирования составов бетона.

2. ПРОЕКТИРОВАНИЕ СОСТАВА ТЯЖЕЛОГО БЕТОНА

2.1. Классический метод профессора И. Н. Ахвердова

Рассматриваемый ниже классический метод проектирования состава бетона, предложенный профессором И. Н. Ахвердовым – несомненный вклад в развитие науки о бетоне. Он нетрадиционен, во многом кардинально отличен от существующих методик и обладает рядом достоинств.

Во-первых, это, без сомнения учет в полном объеме многогранных свойств заполнителей. И это не только фракционный состав мелкого и крупного заполнителя, их пустотность, но также и вид. Обычно учет влияния заполнителей в разных методах либо вообще отсутствует, либо осуществляется посредством корректировки лишь расхода воды (например, методы НИИЖБ и абсолютных объемов).

Во-вторых, налицо совершенно иной, в сравнении с другими методами подход к проектированию состава бетона, поскольку он базируется на ясном физическом понимании смысла проектирования, а не абстрактных понятиях.

В-третьих, в основу метода положена формула для расчета прочности бетона, позволяющая, как показывают статистические выкладки, достигать существенно большей точности определений, чем иные формулы.

В-четвертых, подвижность бетонной смеси рассчитывается в зависимости от консистенции цементного теста, его содержания и соотношения мелкого и крупного заполнителей. В большинстве же методик удобоукладываемость бетонной смеси определяется расходом воды.

В-пятых, метод универсален, поскольку позволяет по одному и тому же механизму проектировать состав как тяжелого (уплотняемого вибрированием, центрифугированием, прессованием, так и легкого бетона.

Порядок выполнения расчетов

Необходимые для выполнения расчетов данные представлены в табл. 2.1 и 2.2.

Таблица 2.1

Характеристики заполнителей

Фракции, мм	Характеристики гранитного щебня			Характеристики речного песка		
	$S_{щi}$	$W_{щi}$	$W^{ад}_{щi}$	$S_{пi}$	$W_{пi}$	$W^{ад}_{пi}$
20–40	1,35	0,77	0,27	–	–	–
10–20	2,70	0,92	0,51	–	–	–
5–10	5,40	1,21	0,81	–	–	–
2,5–5,0	–	–	–	9,4	1,9	0,37
1,25–2,5	–	–	–	20,2	2,1	0,81
0,63–1,25	–	–	–	37,0	2,3	1,48
0,315–0,63	–	–	–	72,0	3,5	2,86
0,16–0,315	–	–	–	141,0	6,0	5,65
Менее 0,16	–	–	–	293,0	12,0	11,70

Таблица 2.2

Переходной коэффициент при расчете прочности бетона

$К_{нг}$	0,22	0,23	0,24	0,25	0,26	0,27	0,28	0,29	0,30	0,31	0,32
$k_п$	1,80	1,73	1,65	1,58	1,52	1,45	1,39	1,34	1,27	1,26	1,21

Расчет характеристик заполнителей

Характеристики заполнителей рассчитываются по следующим пунктам:

1. Задаются требуемой прочностью бетона и удобоукладываемостью бетонной смеси.

2. Рассчитывают пустотность мелкого ($m_п$) и крупного ($m_щ$) заполнителя в виброуплотненном состоянии:

$$m_п = 1 - \frac{\rho_{пв}}{\rho_п},\ \text{д. ед.}, \qquad (2.1)$$

$$m_щ = 1 - \frac{\rho_{щв}}{\rho_щ},\ \text{д. ед.}, \qquad (2.2)$$

где $\rho_{пн}$ – плотность мелкого заполнителя в виброуплотненном состоянии, кг/м^3;

$\rho_п$ – плотность мелкого заполнителя в зернах, кг/м^3;

$\rho_{щн}$ – плотность крупного заполнителя в виброуплотненном состоянии, кг/м^3;

$\rho_щ$ – плотность крупного заполнителя в зернах, кг/м^3.

3. Определяют минимальную пустотность смеси заполнителей ($m_{см}^{min}$):

$$m_{см}^{min} = m_п \cdot m_щ, \tag{2.3}$$

4. Определяют удельную поверхность мелкого заполнителя:

$$S_п^{уд} = 0,001 \cdot \sum_{i=1}^{n} \left(P_{пi} \cdot S_{пi} \right), \text{ м}^2/\text{кг}, \tag{2.4}$$

где $P_{пi}$ – фракции (частные остатки) мелкого заполнителя, %;

$S_{пi}$ – удельные поверхности соответствующих фракций мелкого заполнителя (табл. 2.1), см^2/г.

5. Определяют удельную поверхность крупного заполнителя:

$$S_щ^{уд} = 0,001 \cdot \sum_{i=1}^{n} \left(P_{щi} \cdot S_{щi} \right), \text{ м}^2/\text{кг}, \tag{2.5}$$

где $P_{щi}$ – фракции (частные остатки) крупного заполнителя, %;

$S_{щi}$ – удельные поверхности соответствующих фракций крупного заполнителя (табл. 2.1), см^2/г.

6. Определяют удельную водопотребность мелкого заполнителя:

$$W_п^{уд} = 0,0001 \cdot \sum_{i=1}^{n} \left(P_{пi} \cdot W_{пi} \right), \text{ кг/кг}, \tag{2.6}$$

где $W_{пi}$ – удельное водопоглощение соответствующих фракций мелкого заполнителя (табл. 2.1), %.

7. Определяют удельную водопотребность крупного заполнителя:

$$W_щ^{уд} = 0,0001 \cdot \sum_{i=1}^{n} \left(P_{щi} \cdot W_{щi} \right), \text{ кг/кг}, \tag{2.7}$$

где $W_{щi}$ – удельное водопоглощение соответствующих фракций крупного заполнителя (табл. 2.1), %.

8. Определяют удельное количество воды, адсорбированное поверхностью мелкого заполнителя:

$$W_{пад}^{уд} = 0,0001 \cdot \sum_{i=1}^{n} \left(P_{пi} \cdot W_{падi} \right), \text{ кг/кг}, \qquad (2.8)$$

где $W_{падi}$ – удельное количество воды, адсорбированное поверхностью соответствующих фракций мелкого заполнителя (табл. 2.1), %.

9. Определяют удельное количество воды, адсорбированное поверхностью крупного заполнителя:

$$W_{щад}^{уд} = 0,0001 \cdot \sum_{i=1}^{n} \left(P_{щi} \cdot W_{щадi} \right), \text{ кг/кг}, \qquad (2.9)$$

где $W_{щадi}$ – удельное количество воды, адсорбированное поверхностью соответствующих фракций крупного заполнителя (табл. 2.1), %.

10. Строят график изменения пустотности смеси заполнителей в зависимости от соотношения объемов песка и крупного заполнителя (рис. 2.1).

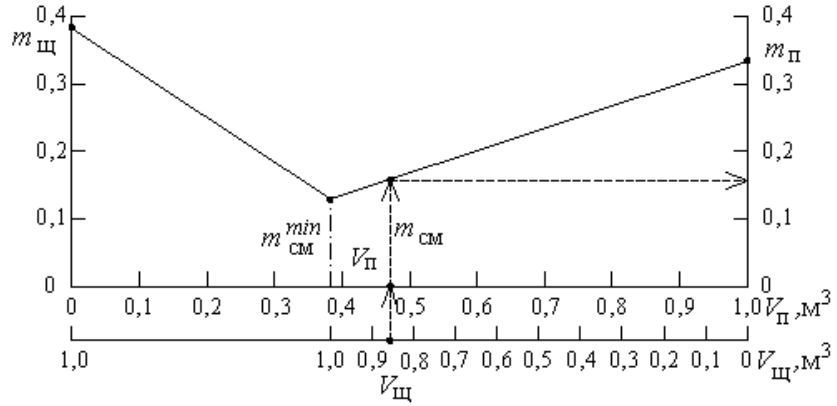


Рис. 2.1. Зависимость пустотности смеси заполнителей от их соотношения

11. Задаются оптимальным (по мнению технолога) объемом крупного заполнителя в виброуплотненном состоянии ($V_{щ}$).

12. Проводя секущую (перпендикулярно к выбранному значению $V_{щ}$) на графике, находят соответствующие величины объема мелкого заполнителя ($V_{п}$) и пустотность смеси заполнителей ($m_{см}$).

13. Рассчитывают расходы мелкого (П) и крупного (Щ) заполнителя:

$$П = V_{п} \cdot \rho_{пв},\ кг, \tag{2.10}$$

$$Щ = V_{щ} \cdot \rho_{щв},\ кг. \tag{2.11}$$

14. Рассчитывают общую площадь поверхности смеси заполнителей:

$$S_{см} = S_{п} + S_{щ} = S_{п}^{уд} \cdot П + S_{щ}^{уд} \cdot Щ,\ м^2. \tag{2.12}$$

15. Принимая, что каждое зерно заполнителя должно иметь оболочку из цементного теста толщиной 13 мкм, рассчитывают объем цементного теста ($V_{т}$):

$$V_{т} = \frac{m_{см} + 0,000013 \cdot S_{см}}{1 + 0,000013 \cdot S_{см}},\ м^3. \tag{2.13}$$

16. Корректируют расходы заполнителей по причине увеличения объема бетонной смеси при обволакивании зерен заполнителя цементным тестом:

$$П' = \frac{П}{1 + 0,000013 \cdot S_{см}},\ кг, \tag{2.14}$$

$$Щ' = \frac{Щ}{1 + 0,000013 \cdot S_{см}},\ кг. \tag{2.15}$$

17. Рассчитывают общую водопотребность смеси заполнителей:

$$В_{з} = В_{п} + В_{щ} = W_{п}^{уд} \cdot П' + W_{щ}^{уд} \cdot Щ',\ кг. \tag{2.16}$$

18. Рассчитывают количество воды, адсорбированной поверхностью заполнителей:

$$В_{ад} = В^{п}_{ад} + В^{щ}_{ад} = W^{уд}_{пад} \cdot П' + W^{уд}_{щад} \cdot Щ', \text{ кг.} \quad (2.17)$$

19. Принимают оптимальное (по мнению технолога, производящего проектирование состава бетона) значение относительного водосодержания цементного теста X (величина X может изменяться от 0,876 до 1,65, то есть в пределах структурной связности цементного теста).

20. Рассчитывают расход цемента:

$$Ц = \frac{1000 \cdot V_{т} - В_{ад}}{1,02 \cdot \left[\frac{1000}{\rho_{ци}} + К_{нг} \cdot (X - 0,293) \right]}, \text{ кг,} \quad (2.18)$$

где $\rho_{ци}$ – истинная плотность цемента, кг/м^3 (составляет примерно 0,85 от плотности цемента);

$К_{нг}$ – коэффициент нормальной густоты цемента, д. ед. (равен водоцементному отношению цементного теста нормальной густоты).

21. Находят водоцементное отношение бетонной смеси:

$$\left(\frac{В}{Ц} \right)_{б} = X \cdot К_{нг} + \frac{В_{з}}{Ц}. \quad (2.19)$$

22. Определяют прочность бетона:

$$f_{б} = \frac{k_{п} \cdot k_{з} \cdot f_{ц}}{\frac{1 + 1,65 \cdot К_{нг}}{К_{нг}} \left(\frac{В}{Ц} \right)_{б} - 1,65 \cdot К_{нг}}, \text{ МПа.} \quad (2.20)$$

где $k_{п}$ – коэффициент, учитывающий влияние на прочность бетона размера образцов и коэффициента нормальной густоты цемента (табл. 2.2);

$k_з$ – коэффициент, учитывающий влияние на прочность бетона характеристик заполнителя (для щебня 1,13, для гравия 1,0);

$f_ц$ – активность цемента, МПа.

Если полученная по формуле (2.20) прочность бетона не соответствует требуемой, следует вернуться к п. 19, изменить величину X и произвести перерасчеты по п. 20–22 до получения необходимого значения $f_б$.

23. Рассчитывают подвижность бетонной смеси:

$$\text{ОК} = 20 \cdot \frac{V_п}{V_п + V_щ} \cdot \frac{\rho_{бсм}}{\rho_в} \cdot V_т \cdot \left(1 + D_ц\right) \cdot \frac{X - 0{,}876}{0{,}774}, \text{ см.} \qquad (2.21)$$

где $\rho_{бсм}$ – плотность бетонной смеси (принимается равной 2 400 кг/м^3;

$\rho_в$ – плотность воды, кг/м^3;

$D_ц$ – добавка цемента, принимаемая в пределах 0–1.

Если рассчитанная подвижность бетонной смеси не соответствует заданной, то следует последовательно изменять величину $D_ц$, добиваясь требуемой осадки конуса бетонной смеси. Но если и этим изменением цель не достигается, то следует вернуться к п. 10, скорректировать объем крупного заполнителя и далее все пересчитать.

24. Определяют полученный (с учетом всех корректировок) объем бетонной смеси ($V_б$):

$$V_б = \frac{Ц}{\rho_ц} \cdot \left(1 + D_ц\right) + \frac{П'}{\rho_п} + \frac{Щ'}{\rho_щ} + \frac{Ц}{\rho_в} \cdot \left(1 + D_ц\right) \cdot \left(\frac{В}{Ц}\right)_б, \text{ м}^3. \qquad (2.22)$$

25. Определяют расчетные расходы компонентов бетонной смеси:

1) цемента:

$$Ц_р = \frac{Ц}{V_б} \cdot \left(1 + D_ц\right), \text{ кг;} \qquad (2.23)$$

2) песка:

$$П_р = \frac{П'}{V_б}, \text{ кг;} \qquad (2.24)$$

3) щебня:

$$Щ_р = \frac{Щ'}{V_б},\ кг; \tag{2.25}$$

4) воды:

$$В_р = Ц_р \cdot \left(\frac{В}{Ц}\right),\ кг. \tag{2.26}$$

26. Расчетная плотность бетонной смеси ($\rho_{бсм}$) составляет:

$$\rho_{бсм} = Ц_р + П_р + Щ_р + В_р,\ кг/м^3. \tag{2.27}$$

Пример

Все примеры в данном разделе приведены для одних и тех же условий. Это сделано с целью сопоставления получаемых результатов.

Необходимо подобрать состав тяжелого бетона класса на сжатие С20/25. Марка бетонной смеси по удобоукладываемости П2. Отпускная прочность бетона 70 %. Армирование обычное. Уровень производства – средний. Твердение бетона в естественных условиях. Температура бетонной смеси 15 °С.

Цемент: марка М500 (активность $f_ц$ = 50 МПа), нормальная густота (НГ) 26 %, коэффициент нормальной густоты ($К_{нг}$) 0,26, плотность $\rho_ц$ = 3 150 кг/м^3.

Мелкий заполнитель: песок кварцевый, модуль крупности (Мк) 1,5, плотность в зернах $\rho_п$ = 2 630 кг/м^3, плотность в насыпном состоянии 1 540 кг/м^3, плотность в виброуплотненном состоянии $\rho_п$ = 1 760 кг/м^3. Содержание глины, ила и пыли – 1,6 %.

Крупный заполнитель: щебень гранитный, прочность породы 120 МПа, наибольшая крупность зерен (НКЩ) 20 мм, плотность в зернах $\rho_п$ = 2 670 кг/м^3, плотность в насыпном состоянии 1 480 кг/м^3, плотность в виброуплотненном состоянии $\rho_п$ = 1 640 кг/м^3. Содержание глины, ила и пыли – 0,8 %, частиц менее 5 мм – 7 %.

В табл. 2.3 приведены частные остатки заполнителей на ситах.

Таблица 2.3

Частные остатки заполнителей на ситах

Фракции, мм	Щебень ($P_{щi}$), %	Песок ($P_{пi}$), %
20–40	–	–
10–20	36	–
5–10	64	–
2,5–5,0	–	8
1,25–2,5	–	22
0,63–1,25	–	27
0,315–0,63	–	22
0,16–0,315	–	17
Менее 0,16	–	4

Требуемая прочность бетона (здесь и далее она обозначена не f_{cm}, а $f_б$):

$$f_б = \frac{C}{0,78} = \frac{20}{0,78} = 32,1 \text{ МПа}.$$

Истинная плотность цемента:

$$\rho_{ци} = 0,85 \cdot \rho_ц = 0,85 \cdot 3150 = 2\,678 \text{ кг/м}^3.$$

По табл. 2.2 переходной коэффициент для цемента с коэффициентом нормальной густоты 0,26 равен $k_п = 1,52$.

Для щебня коэффициент, учитывающий влияние заполнителя на прочность бетона, равен $k_з = 1,13$.

По п. 2 пустотность мелкого ($m_п$) и крупного ($m_щ$) заполнителя в виброуплотненном состоянии:

$$m_п = 1 - \frac{\rho_{пв}}{\rho_п} = 1 - \frac{1\,760}{2\,630} = 0,331 \text{ д. ед.}$$

$$m_щ = 1 - \frac{\rho_{щв}}{\rho_щ} = 1 - \frac{1\,640}{2\,670} = 0,386 \text{ д. ед.}$$

По п. 3 минимальная пустотность смеси заполнителей ($m_{\text{см}}^{\min}$):

$$m_{\text{см}}^{\min} = m_{\text{п}} \cdot m_{\text{щ}} = 0,331 \cdot 0,386 = 0,128 \text{ д. ед.}$$

По п. 4 удельная поверхность мелкого заполнителя:

$$S_{\text{п}}^{\text{уд}} = 0,001 \cdot \sum_{i=1}^{n} \left(P_{\text{п}i} \cdot S_{\text{п}i} \right) = 0,001 \cdot \left(8 \cdot 9,4 + 22 \cdot 20,2 + 27 \cdot 37,0 + \right.$$
$$\left. + 22 \cdot 72,0 + 17 \cdot 141,0 + 4 \cdot 293,0 \right) = 6,672 \text{ м}^2/\text{кг}.$$

По п. 5 удельная поверхность крупного заполнителя:

$$S_{\text{щ}}^{\text{уд}} = 0,001 \cdot \sum_{i=1}^{n} \left(P_{\text{щ}i} \cdot S_{\text{щ}i} \right) = 0,001 \cdot \left(36 \cdot 2,7 + 64 \cdot 5,4 \right) = 0,443 \text{ м}^2/\text{кг}.$$

По п. 6 удельная водопотребность мелкого заполнителя:

$$W_{\text{п}}^{\text{уд}} = 0,0001 \cdot \sum_{i=1}^{n} \left(P_{\text{п}i} \cdot W_{\text{п}i} \right) = 0,001 \cdot \left(8 \cdot 1,9 + 22 \cdot 2,1 + 27 \cdot 2,3 + \right.$$
$$\left. + 22 \cdot 3,5 + 17 \cdot 6,0 + 4 \cdot 12,0 \right) = 0,0349 \text{ кг/кг}.$$

По п. 7 удельная водопотребность крупного заполнителя:

$$W_{\text{щ}}^{\text{уд}} = 0,0001 \cdot \sum_{i=1}^{n} \left(P_{\text{щ}i} \cdot W_{\text{щ}i} \right) =$$
$$= 0,001 \cdot \left(36 \cdot 0,92 + 64 \cdot 1,21 \right) = 0,0111 \text{ кг/кг}.$$

По п. 8 удельное количество воды, адсорбированное поверхностью мелкого заполнителя:

$$W_{\text{пад}}^{\text{уд}} = 0,0001 \cdot \sum_{i=1}^{n} \left(P_{\text{п}i} \cdot W_{\text{пад}i} \right) = 0,001 \cdot \left(8 \cdot 0,37 + 22 \cdot 0,81 + 27 \cdot 1,48 + \right.$$
$$\left. + 22 \cdot 2,86 + 17 \cdot 5,65 + 4 \cdot 11,7 \right) = 0,0267 \text{ кг/кг}.$$

По п. 9 удельное количество воды, адсорбированное поверхностью крупного заполнителя:

$$W_{\text{щад}}^{\text{уд}} = 0,0001 \cdot \sum_{i=1}^{n} \left(P_{\text{щ}i} \cdot W_{\text{щад}i} \right) =$$

$$= 0,001 \cdot \left(36 \cdot 0,51 + 64 \cdot 0,81 \right) = 0,0070 \text{ кг/кг}.$$

По п. 11 по графику оптимальный (по мнению технолога) объем крупного заполнителя в виброуплоуплотненном состоянии $V_{\text{щ}} = 0,85$ м^3.

По п. 12 по графику определяют:

$V_{\text{п}} = 0,478$ м^3;
$m_{\text{см}} = 0,158$ м^3.

По п. 13 расходы мелкого (П) и крупного (Щ) заполнителя:

$$\text{П} = V_{\text{п}} \cdot \rho_{\text{пв}} = 0,478 \cdot 1\,760 = 841 \text{ кг},$$

$$\text{Щ} = V_{\text{щ}} \cdot \rho_{\text{щв}} = 0,85 \cdot 1\,640 = 1\,394 \text{ кг}.$$

По п. 14 общая площадь поверхности смеси заполнителей:

$$S_{\text{см}} = S_{\text{п}}^{\text{уд}} \cdot \text{П} + S_{\text{щ}}^{\text{уд}} \cdot \text{Щ} = 6,672 \cdot 841 + 0,443 \cdot 1\,394 = 6\,229 \text{ м}^2.$$

По п. 15 объем цементного теста:

$$V_{\text{т}} = \frac{m_{\text{см}} + 0,000013 \cdot S_{\text{см}}}{1 + 0,000013 \cdot S_{\text{см}}} = \frac{0,158 + 0,000013 \cdot 6\,229}{1 + 0,000013 \cdot 6\,229} = 0,221 \text{ м}^3.$$

По п. 16 корректируют расходы заполнителей по причине увеличению объема бетонной смеси при обволакивании зерен заполнителя цементным тестом:

$$\text{П}' = \frac{\text{П}}{1 + 0,000013 \cdot S_{\text{см}}} = \frac{841}{1 + 0,000013 \cdot 6\,229} = 778 \text{ кг},$$

$$\text{Щ}' = \frac{\text{Щ}}{1 + 0,000013 \cdot S_{\text{см}}} = \frac{1\,394}{1 + 0,000013 \cdot 6\,229} = 1\,290 \text{ кг}.$$

По п. 17 общая водопотребность смеси заполнителей:

$$В_з = W_п^{уд} \cdot П' + W_щ^{уд} \cdot Щ' = 0,0349 \cdot 778 + 0,0111 \cdot 1\,290 = 41 \text{ кг}.$$

По п. 18 количество воды, адсорбированной поверхностью заполнителей:

$$В_{ад} = W_{пад}^{уд} \cdot П' + W_{щад}^{уд} \cdot Щ' = 0,0267 \cdot 778 + 0,0070 \cdot 1\,290 = 30 \text{ кг}.$$

По п. 19 принимаем относительное водосодержание цементного теста: $X = 1,1$.

По п. 20 расход цемента:

$$Ц = \frac{1000 \cdot V_т - В_{ад}}{1,02 \cdot \left[\frac{1000}{\rho_{ци}} + К_{нг} \cdot (X - 0,293) \right]} =$$

$$= \frac{1000 \cdot 0,221 - 30}{1,02 \cdot \left[\frac{1000}{2\,678} + 0,26 \cdot (1,10 - 0,293) \right]} = 317 \text{ кг}.$$

По п. 21 водоцементное отношение бетонной смеси:

$$\left(\frac{В}{Ц} \right)_б = X \cdot К_{нг} + \frac{В_з}{Ц} = 1,10 \cdot 0,26 + \frac{41}{322} = 0,415.$$

По п. 22 прочность бетона:

$$f_б = \frac{k_п \cdot k_з \cdot f_ц}{\frac{1 + 1,65 \cdot К_{нг}}{К_{нг}} \left(\frac{В}{Ц} \right)_б - 1,65 \cdot К_{нг}} =$$

$$= \frac{1,52 \cdot 1,13 \cdot 50}{\frac{1 + 1,65 \cdot 0,26}{0,26} 0,415 - 1,65 \cdot 0,26} = 46,5 \text{ МПа}.$$

Рассчитанная прочность больше, чем требуемая (25,7 МПа). Следовательно, необходимо увеличить относительное водосодержание цементного теста, тем самым повысить водоцементное отношение и снизить прочность бетона (при сохранении марки цемента).

По п. 19 принимаем относительное водосодержание цементного теста: X =1,65.

По п. 20 расход цемента:

$$Ц = \frac{1000 \cdot 0,221 - 30}{1,02 \cdot \left[\frac{1000}{2\,678} + 0,26 \cdot (1,65 - 0,293) \right]} = 255 \text{ кг}.$$

По п. 21 водоцементное отношение бетонной смеси:

$$\left(\frac{В}{Ц} \right)_б = 1,65 \cdot 0,26 + \frac{41}{258} = 0,590.$$

По п. 22 прочность бетона:

$$f_б = \frac{1,52 \cdot 1,13 \cdot 50}{\frac{1 + 1,65 \cdot 0,26}{0,26} 0,590 - 1,65 \cdot 0,26} = 30,6 \text{ МПа}.$$

Рассчитанная прочность меньше, чем требуемая 32,1 МПа. Следовательно, необходимо уменьшить относительное водосодержание цементного теста, тем самым снизить водоцементное отношение и увеличить прочность бетона (при сохранении марки цемента).

По п. 19 принимаем относительное водосодержание цементного теста: X = 1,57.

По п. 20 расход цемента:

$$Ц = \frac{1000 \cdot 0,221 - 30}{1,02 \cdot \left[\frac{1000}{2\,678} + 0,26 \cdot (1,57 - 0,293) \right]} = 262 \text{ кг}.$$

По п. 21 водоцементное отношение бетонной смеси:

$$\left(\frac{\text{В}}{\text{Ц}}\right)_{\text{б}} = 1,57 \cdot 0,26 + \frac{41}{266} = 0,564.$$

По п. 22 прочность бетона:

$$f_{\text{б}} = \frac{1,52 \cdot 1,13 \cdot 50}{\frac{1+1,65 \cdot 0,26}{0,26} 0,564 - 1,65 \cdot 0,26} = 32,2 \text{ МПа}.$$

Рассчитанная прочность соответствует требуемой. Продолжаем расчеты, оптимизируя подвижность бетонной смеси.

По п. 23 подвижность бетонной смеси, не корректируя объем цементного теста и принимая коэффициент $D_{\text{ц}}$ равным нулю:

$$\text{ОК} = 20 \cdot \frac{V_{\text{п}}}{V_{\text{п}} + V_{\text{щ}}} \cdot \frac{\rho_{\text{бсм}}}{\rho_{\text{в}}} \cdot V_{\text{т}} \cdot \left(1 + D_{\text{ц}}\right) \cdot \frac{X - 0,876}{0,774} =$$

$$= 20 \cdot \frac{0,478}{0,478 + 0,85} \cdot \frac{2\,400}{1000} \cdot 0,221 \cdot \left(1 + 0\right) \cdot \frac{1,57 - 0,876}{0,774} = 3,4 \text{ см}.$$

Осадка конуса меньше заданной (4 см).

Задаем $D_{\text{ц}} = 0,90$.

По п. 23 подвижность бетонной смеси:

$$\text{ОК} = 20 \cdot \frac{0,478}{0,478 + 0,85} \cdot \frac{2\,400}{1000} \cdot 0,221 \cdot \left(1 + 0,90\right) \cdot \frac{1,57 - 0,876}{0,774} = 6,5 \text{ см}.$$

Осадка конуса соответствует расчетной.

По п. 24 объем бетонной смеси:

$$V_{\text{б}} = \frac{\text{Ц}}{\rho_{\text{ц}}} \cdot \left(1 + D_{\text{ц}}\right) + \frac{\text{П}'}{\rho_{\text{п}}} + \frac{\text{Щ}'}{\rho_{\text{щ}}} + \frac{\text{Ц}}{\rho_{\text{в}}} \cdot \left(1 + D_{\text{ц}}\right) \cdot \left(\frac{\text{В}}{\text{Ц}}\right)_{\text{б}} =$$

$$= \frac{266}{3150} \cdot \left(1 + 0,90\right) + \frac{778}{2\,630} + \frac{1\,290}{2\,670} + \frac{266}{1000} \cdot \left(1 + 0,20\right) \cdot 0,564 = 1,22 \text{ м}^3.$$

По п. 25 расчетные расходы компонентов бетонной смеси:
1) цемента:

$$Ц_р = \frac{Ц}{V_б} \cdot \left(1 + D_ц\right) = \frac{266}{1,22} \cdot \left(1 + 0,90\right) = 413 \text{ кг};$$

2) песка:

$$П_р = \frac{П'}{V_б} = \frac{778}{1,22} = 636 \text{ кг};$$

3) щебня:

$$Щ_р = \frac{Щ'}{V_б} = \frac{1\,290}{1,22} = 1\,053 \text{ кг};$$

4) воды:

$$В_р = Ц_р \cdot \left(\frac{В}{Ц}\right) = 413 \cdot 0,564 = 233 \text{ кг}.$$

По п. 26 расчетная плотность бетонной смеси:

$$\rho_{бсм} = Ц_р + П_р + Щ_р + В_р = 413 + 636 + 1\,053 + 233 = 2\,334 \text{ кг/м}^3.$$

Проанализировав представленную последовательность расчетов, можно отметить и слабые стороны метода, требующие дальнейшего совершенствования:

1. Выбор объема крупного заполнителя по графику (а, следовательно, и объема мелкого заполнителя и пустотности смеси заполнителей) производится из общих соображений: чем бетонная смесь жестче, тем требуется больше крупного заполнителя и наоборот. В итоге получается так, что для жестких бетонных смесей объем цементного теста уменьшается вместе с расходом мелкого заполнителя. Однако это не всегда соответствует принятому в технологии бетона принципу, а именно: доля мелкого заполнителя в смеси заполнителей сокращается с увеличением объема цементного теста.

2. Величина относительного водосодержания цементного теста не рассчитывается, а назначается технологом и в дальнейшем определяет как удобоукладываемость бетонной смеси, так и прочность бетона, а это вызывает неизбежную последовательную подгонку.

3. При расчете объема цементного теста (что впоследствии определяет и расход цемента) принимается постоянная толщина прослойки, обволакивающей каждое зерно заполнителя, а именно 13 мкм. Однако эта толщина должна иметь переменное значение, определяемое как консистенцией теста, так и требуемой удобоукладываемостью. Косвенно этот факт учитывается впоследствии, когда при несоответствии подвижности бетонной смеси заданной вводится дополнительное количество (опять-таки интуитивно) теста (п. 23).

4. Отсутствует формула для расчета показателя жесткости бетонной смеси.

5. Верхняя планка относительного водосодержания цементного теста ограничена величиной 1,65. Вместе с тем, простые расчеты показывают, что бетоны с относительно низким расходом цемента, особенно при использовании жесткой бетонной смеси, приготовленной на заполнителях из плотных горных пород (например, практически все плиты пустотного настила), имеют относительное водосодержание свыше 1,65.

Классический метод, несмотря на его кажущуюся громоздкость, легко поддается модификации, попытка которой представлена ниже, при рассмотрении методики проектирования состава легкого бетона на пористых заполнителях.

Для жесткой бетонной смеси целесообразно рассчитать время виброуплотнения бетонной смеси, как косвенный показатель жесткости.

27. Уточняют объем цементного теста:

$$V_{\text{т}} = \frac{\text{Ц}_{\text{р}}}{\rho_{\text{ц}}} + \frac{\text{Ц}_{\text{р}} \cdot X \cdot \text{К}_{\text{НГ}}}{\rho_{\text{в}}},\ \text{м}^3. \qquad (2.28)$$

28. Определяют плотность цементного теста в бетонной смеси, равную отношению сумме масс цемента и воды в тесте к объему теста:

$$\rho_{\text{т}} = \frac{\text{Ц} \cdot \left(1 + X \cdot \text{К}_{\text{НГ}}\right)}{V_{\text{т}}},\ \text{кг/м}^3. \qquad (2.29)$$

29. Далее рассчитывают предельное напряжение сдвига бетонной смеси:

$$\tau_0^{\text{б}} = \frac{1 - X \cdot \text{К}_{\text{НГ}}}{X \cdot \text{К}_{\text{НГ}}} \cdot \left(\frac{V_{\text{п}}}{V_{\text{п}} + V_{\text{щ}}} \right)^2 \cdot g \cdot \left(\rho_{\text{см}} - \rho_{\text{т}} \right) \times \\ \times \frac{V_{\text{п}} + V_{\text{щ}} \cdot \left(1 - m_{\text{щ}} \right)}{V_{\text{т}} + V_{\text{п}} \cdot \left(1 - m_{\text{п}} \right)} \cdot \frac{V_{\text{т}}}{S_{\text{см}}} \cdot 10^4, \text{ Па}. \tag{2.30}$$

30. И, наконец, определяют время виброуплотнения, которое для частоты вибрации 50 Гц и амплитуды колебаний 0,2 мм равно:

$$t_{\text{в}} = 0,05 \cdot \tau_0^{\text{б}} \cdot \frac{\text{Щ}_{\text{р}}}{\rho_{\text{щ}}}, \text{ с}. \tag{2.31}$$

Для предыдущего примера:
По п. 27:

$$V_{\text{т}} = \frac{413}{3150} + \frac{413 \cdot 1,57 \cdot 0,26}{1000} = 0,299 \text{ м}^3.$$

По п. 28:

$$\rho_{\text{т}} = \frac{413 \cdot \left(1 + 1,57 \cdot 0,26 \right)}{0,218} = 1941 \text{ кг/м}^3.$$

По п. 29:

$$\tau_0^{\text{б}} = \frac{1 - 1,57 \cdot 0,26}{1,57 \cdot 0,26} \cdot \left(\frac{0,478}{0,478 + 0,85} \right)^2 \cdot 9,81 \cdot \left(2\,334 - 1\,941 \right) \times \\ \times \frac{0,478 + 0,85 \cdot \left(1 - 0,386 \right)}{0,299 + 0,478 \cdot \left(1 - 0,331 \right)} \cdot \frac{0,299}{6,229} \cdot 10^4 = 562 \text{ Па}.$$

По п. 30:

$$t_{\text{в}} = 0,05 \cdot 562 \cdot \frac{1\,053}{2\,670} = 11\,\text{с}.$$

Для совершенствования процесса проектирования состава бетона разработан программный продукт, позволяющий оперативно выбирать наиболее приемлемый вариант.

Вначале вводят характеристики цемента, мелкого и крупного заполнителей (рис. 2.2–2.4). Далее выбирают частотные параметры виброуплотнения бетонной смеси и размеры образцов. Затем посредством перемещения соответствующих ползунков выбирают требуемые величины объема крупного заполнителя, относительного водосодержания цементного геля и коэффициента увеличения объема геля, получая значения прочности бетона, подвижности смеси и расходы компонентов (рис. 2.5).

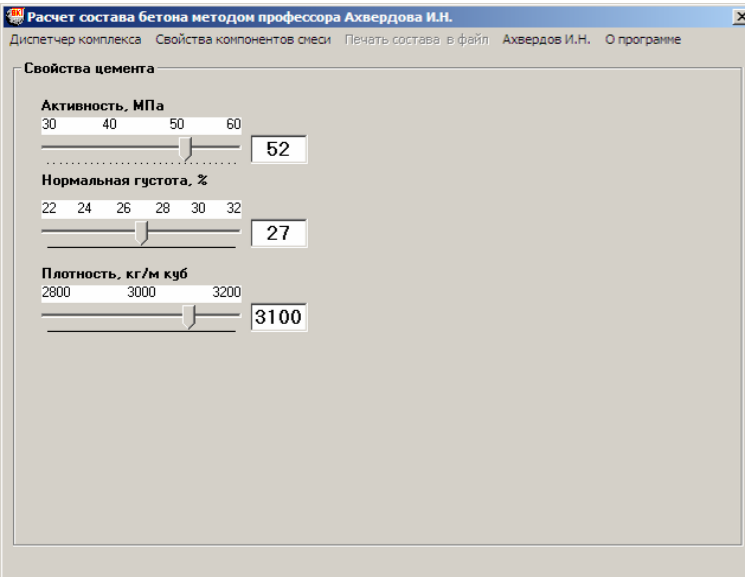


Рис. 2.2. Введение свойств цемента

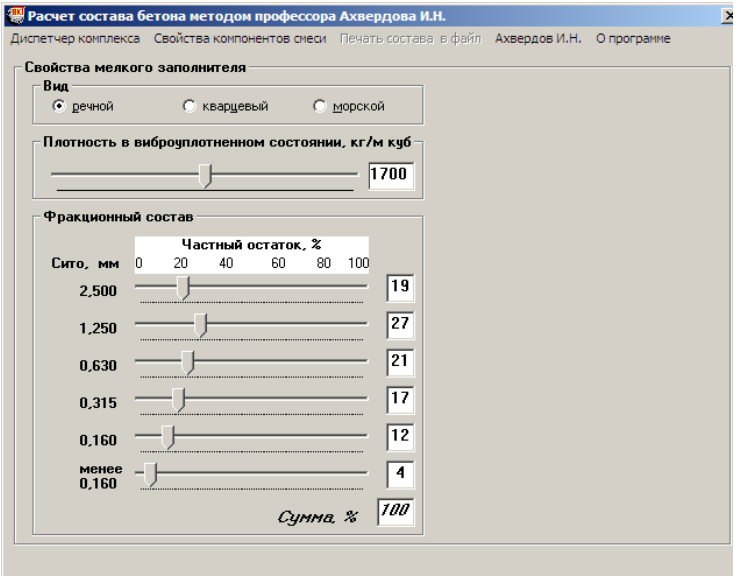


Рис. 2.3. Введение свойств мелкого заполнителя

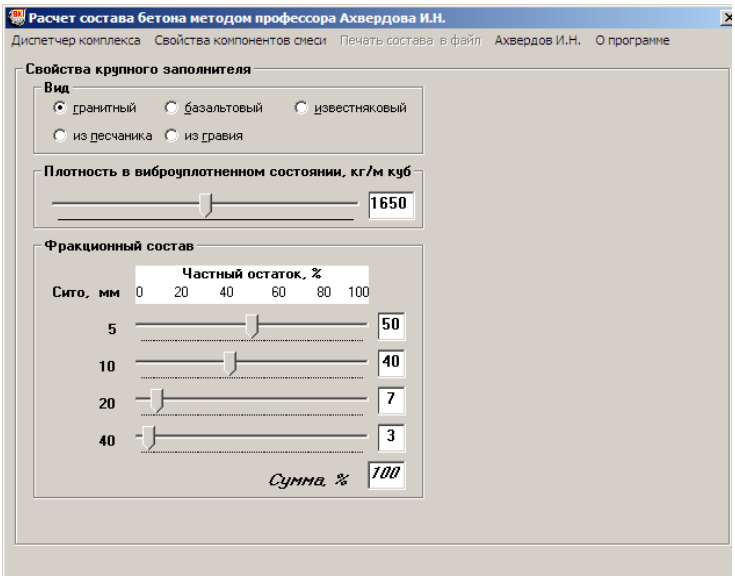


Рис. 2.4. Введение свойств крупного заполнителя

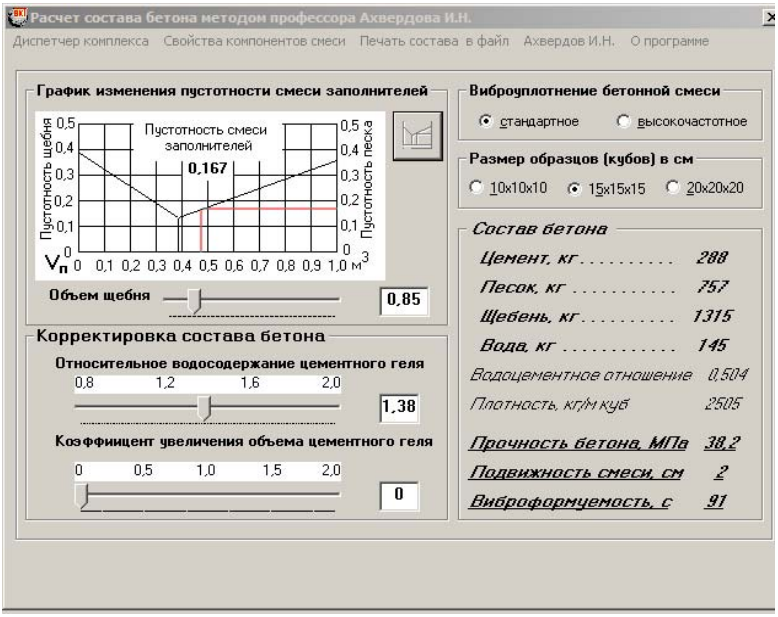


Рис. 2.5. Расчет состава бетона

2.2. Модифицированный метод профессора И. Н. Ахвердова

Рассмотрим сильные стороны традиционного метода проектирования состава бетона профессора И. Н. Ахвердова.

Во-первых, это, без сомнения учет в полном объеме многогранных свойств заполнителей. И это не только фракционный состава, пустотность, но и вид заполнителей. Вспомним, что обычно учет влияния заполнителей в разных методах либо вообще отсутствует, либо осуществляется посредством корректировки лишь расхода воды.

Во-вторых, налицо совершенно иной, в сравнении с другими методами, подход к проектированию состава бетона, поскольку он базируется на ясном физическом понимании смысла проектирования, а не абстрактных понятиях.

В-третьих, подвижность бетонной смеси рассчитывается в зависимости от консистенции цементного теста, его содержания и соотно-

шения мелкого и крупного заполнителей. В большинстве же методик удобоукладываемость бетонной смеси определяется расходом воды.

В-четвертых, метод универсален, поскольку позволяет по одному и тому же механизму проектировать состав как тяжелого, так и легкого бетона.

К слабым сторонам метода можно отнести следующее:

1. Величина относительного водосодержания цементного теста не рассчитывается, а назначается технологом и в дальнейшем определяет как удобоукладываемость бетонной смеси, так и прочность бетона. а это вызывает неизбежную последовательную подгонку.

2. При расчете объема цементного теста (что впоследствии определяет и расход цемента) принимается постоянная толщина прослойки, обволакивающей каждое зерно заполнителя, а именно 13 мкм. Однако эта толщина должна иметь переменное значение, определяемое как консистенцией теста, так и требуемой удобоукладываемостью. Косвенно этот факт учитывается впоследствии, когда при несоответствии подвижности бетонной смеси заданной вводится дополнительное количество (опять-таки интуитивно) теста.

3. Выбор объема крупного заполнителя по графику (а, следовательно, и объема мелкого заполнителя и пустотности смеси заполнителей) производится из общих соображений – чем бетонная смесь жестче, тем требуется больше крупного заполнителя и наоборот. В итоге получается так, что для жестких бетонных смесей объем цементного теста уменьшается вместе с расходом мелкого заполнителя. Однако это не всегда соответствует принятому в технологии бетона принципу, а именно: доля мелкого заполнителя в смеси заполнителей сокращается с увеличением объема цементного теста.

4. При расчетах состава бетона без внесения корректировок по расходу цемента полученный расход воды представляется недостаточным. Например, если запроектировать состав бетона класс С20/25 на бетонной смеси подвижностью 3 см, то при использовании цемента марки М500 получим расход цемента около 270 кг и расход воды около 150 кг (все расходы приведены к 1 $м^3$ бетонной смеси). В данном случае расход воды существенно ниже общепринятого (около 170–180 кг).

5. Формула (2.21) линейно связывает влияющие факторы (объем цементного теста, относительное водосодержание его) с осадкой

конуса, что не вполне соответствует реальности. Поэтому имеет ограниченное применение: 2–6 см.

6. Отсутствует формула для расчета жесткости бетонной смеси.

7. Верхняя планка относительного водосодержания цементного теста ограничена величиной 1,65. Вместе с тем, простые расчеты показывают, что бетоны с относительно низким расходом цемента, особенно при использовании жесткой бетонной смеси, приготовленной на заполнителях из плотных горных пород (например, практически все плиты пустотного настила) имеют относительное водосодержание свыше 1,65.

Для совершенствования метода профессора И. Н. Ахвердова можно использовать следующие выкладки. Вначале реализуется грубый, приближенный расчет состава без учета всего многообразия свойств цемента и заполнителя. А в дальнейшем реализуется уточненный состав, уже с учетом всех свойств.

Любой состав бетона должен обеспечить две важнейшие заданные характеристики: прочность бетона и удобоукладываемость смеси.

Формула для расчета прочности достаточно полно учитывает влияющие факторы и не требует корректировки, в связи с чем она и может быть положена в основу усовершенствованного метода.

Что касается второго важнейшего положения, а именно связи удобоукладываемости бетонной смеси с влияющими факторами, то здесь необходимы уточнения. Анализ многочисленных составов бетона, почерпнутых из литературы (рис. 2.6), показывает связь водоцементного отношения бетонной смеси и общего содержания цементного теста в бетоне.

Эта зависимость описывается семейством кривых, определяемых маркой бетонной смеси по удобоукладываемости. Удобство такой интерпретации результатов обработки экспериментальных данных заключается в отходе от понятия толщины пленки цементного теста, обволакивающей каждое зерно заполнителя и в переходе к общему объему цементного теста, что существенно упрощает первоначальные расчеты. В связи с этим открывается возможность в первом приближении при известном значении водоцементного отношения (определяется в зависимости от прочности бетона) рассчитать необходимое содержание цементного теста. Воспользовавшись экспериментальными и теоретическими выкладками профессора В. П. Сизова, можно получить оптимальное значение доли песка в смеси запол-

нителей. В последующем посредством элементарных формул легко рассчитываются расходы цемента, песка, щебня и воды.

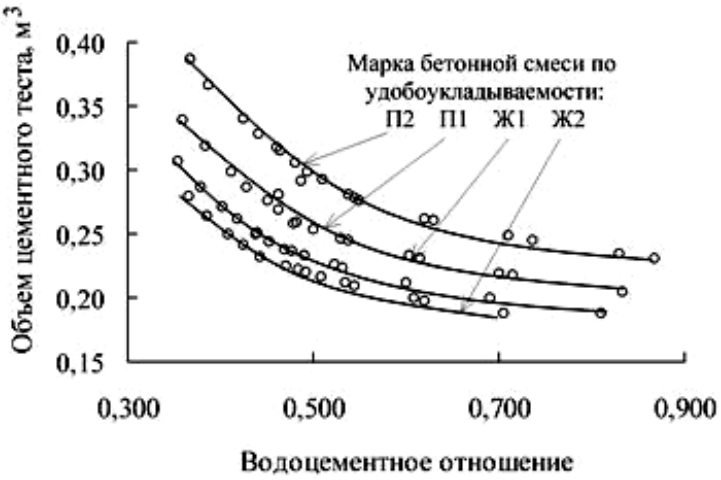


Рис. 2.6. Зависимость объема цементного теста от водоцементного отношения бетонной смеси разной марки по удобоукладываемости

Далее следует уточненный расчет состава бетона, уже с учетом всего многообразия влияющих факторов. Для этого требуется теоретически осмыслить взаимосвязь параметров. Например, весь ли объем цементного теста влияет на удобоукладываемость смеси, как это отражено в формуле И. Н. Ахвердова?

Как правильно показал в своих исследованиях профессор Н. П. Блещик, следует учитывать лишь тот объем цементного теста, который идет на раздвижку зерен заполнителя. Тот же объем цементного теста, который находится в пустотах мелкого и крупного заполнителя, практическое влияние на удобоукладываемость бетонной смеси не оказывает. Но можно пойти и дальше, попытавшись ответить на вопрос: влияет ли первый, находящийся непосредственно на поверхности заполнителя слой цементного теста (монослой) на удобоукладываемость бетонной смеси? Логически рассуждая, на этот вопрос можно ответить отрицательно.

Попытаемся представить (после соответствующего перерасчета) графики на рис. 2.6 в виде зависимостей «относительное водосо-

держание – избыточный объем цементного теста (разность общего объема, объема, заполоняющего пустоты заполнителя и объема, образующего монослой)» (рис. 2.7). Представленные данные ясно показывают возможность, зная консистенцию цементного теста, рассчитать величину его избыточного объема. Понятие монослоя позволяет устранить и еще одно противоречие, связанное с фракционным составом. Если производить расчеты классическим методом с учетом толщины пленки, то необходимый объем цементного теста при уменьшении крупности мелкого заполнителя нарастает прямо пропорционально, что не подтверждается практическими составами бетона. Но если принять понятие монослоя, то только объем монослоя зависит от удельной поверхности заполнителя, а величина остального (избыточного) объема теста определяется лишь требуемой удобоукладываемостью бетонной смеси.

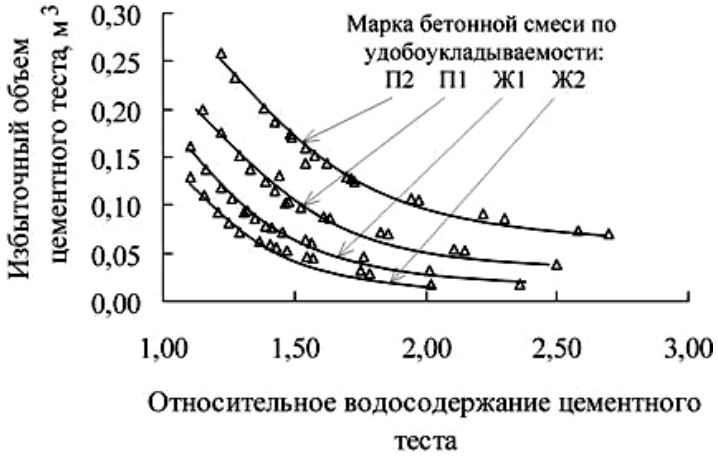


Рис. 2.7. Зависимость избыточного объема цементного теста от относительного водосодержания цементного теста для бетонной смеси разной марки по удобоукладываемости

Представленная на рис. 2.6 и 2.7 информация, как и данные В. П. Сизова, после получения соответствующих формул, положены в основу рассмотренного ниже модифицированного метода профессора И. Н. Ахвердова.

Порядок выполнения расчетов

Расчеты выполняются в следующей последовательности:

1. Рассчитывают водоцементное отношение бетонной смеси:

$$\left(\frac{\text{В}}{\text{Ц}}\right)=\frac{\dfrac{k_{\text{п}}\cdot k_{\text{з}}\cdot f_{\text{ц}}}{f_{\text{б}}}+1{,}65\cdot \text{К}_{\text{нг}}}{\dfrac{1+\text{К}_{\text{нг}}}{\text{К}_{\text{нг}}}},\ \text{д. ед.} \qquad (2.32)$$

2. В зависимости от полученного значения водоцементного отношения рассчитывают объем цементного теста:

$$V_{\text{т}}=k\frac{1}{\sqrt[3]{\left(\dfrac{\text{В}}{\text{Ц}}\right)^2}},\ \text{м}^3. \qquad (2.33)$$

В формуле (2.33) коэффициент k определяет консистенцию бетонной смеси и равен:

1. Для подвижной смеси (ОК в см):

$$k=0{,}147\cdot \text{ОК}^{0{,}13}. \qquad (2.34)$$

2. Для жесткой (Ж в с):

$$k=\frac{0{,}192}{\text{Ж}^{0{,}13}}. \qquad (2.35)$$

3. Начальная доля (по массе) песка в смеси заполнителей (для мелкого заполнителя с модулем крупности 1) равна:

$$r_0=41{,}2-80\cdot\left(V_{\text{т}}-0{,}2\right),\ \%. \qquad (2.36)$$

4. Далее рассчитывают поправки к r_0:

по удобоукладываемости:

для подвижной смеси (ОК в см):

$$\Delta r_{\text{у}}=1{,}4\cdot\sqrt[3]{\left(\text{ОК}-1\right)^2},\ \%, \qquad (2.37)$$

а для жесткой (Ж в с):

$$\Delta r_{\text{у}} = -0,75 \cdot \sqrt[3]{(\text{Ж} - 5)^2}, \ \%; \tag{2.38}$$

для модуля крупности песка (Мк):

$$\Delta r_{\text{Мк}} = 0,75 \cdot (\text{Мк} - 1), \ \%; \tag{2.39}$$

Для наибольшей крупности щебня ($D_{\text{щ}}$ в мм):

$$k_{\text{кз}} = 1 - 0,008 \cdot \sqrt[3]{(D_{\text{щ}} - 10)^2}. \tag{2.40}$$

5. Окончательно доля песка в смеси заполнителей равна:

$$r = k_{\text{кз}} \cdot (r_0 + r_{\text{у}} + r_{\text{Мк}}), \%. \tag{2.41}$$

6. Определяют расход мелкого заполнителя:

$$\text{П} = \frac{1 - V_{\text{т}}}{\frac{1}{\rho_{\text{п}}} + \frac{1}{\rho_{\text{щ}}} \cdot \left(\frac{1}{r/100} - 1 \right)}, \text{ кг}. \tag{2.42}$$

7. Определяют расход крупного заполнителя:

$$\text{Щ} = \text{П} \left(\frac{1}{r/100} - 1 \right), \tag{2.43}$$

8. Рассчитывают расход цемента:

$$\text{Ц} = \frac{V_{\text{т}}}{\frac{1}{\rho_{\text{ц}}} + \frac{(\text{В}/\text{Ц})}{1000}}, \text{ кг}. \tag{2.44}$$

9. Рассчитывают расход воды:

$$В = Ц \cdot \left(\frac{В}{Ц} \right), \text{ кг.} \quad (2.45)$$

10. Расчетная плотность бетонной смеси ($\rho_{бсм}$) составляет:

$$\rho_{бсм} = Ц + П + Щ + В, \text{ кг/м}^3. \quad (2.46)$$

Далее производят уточнение состава бетона с учетом многообразных свойств заполнителей (по данным профессора И. Н. Ахвердова).

11. Рассчитывают по формуле (2.1) пустотность мелкого заполнителя, по (2.4) его удельную поверхность, по (2.5) удельную поверхность крупного заполнителя, по (2.6) и (2.7) удельную водопотребность мелкого и крупного заполнителей, по (2.12) общую площадь поверхность смеси заполнителей, а по (2.16) – общую водопотребность смеси заполнителей.

12. Определяют водоцементное отношение цементного теста:

$$\left(\frac{В}{Ц} \right)_т = \frac{В - В_з}{Ц}. \quad (2.47)$$

13. Рассчитывают относительное водосодержание цементного теста:

$$X = \frac{\left(\frac{В}{Ц} \right)_т}{К_{нг}}. \quad (2.48)$$

Верхний потолок относительного водосодержания (1,65) для жестких и малоподвижных бетонных смесей предлагается не ограничивать, поскольку в таких смесях возможное отслоение воды не столь существенно сказывается на последующих свойствах бетона, как, например, для литых смесей.

14. Определяют объем цементного теста, идущего на заполнение пустот смеси заполнителей:

$$V_{\text{пуст}} = m_{\text{п}} \frac{\text{П}}{\rho_{\text{пв}}}, \text{ м}^3. \quad (2.49)$$

15. Определяют объем цементного теста на образование первого монослоя:

$$V_1 = \frac{r_{\text{ц}} \cdot S_{\text{см}}}{1\,000\,000}, \text{ м}^3. \quad (2.50)$$

В формуле (2.50) радиус цементного зерна может быть рассчитан с использованием зависимости, полученной профессором Н. П. Блещиком:

$$r_{\text{ц}} = 9{,}15 - 23{,}8 \cdot \text{К}_{\text{нг}}, \text{ мкм}. \quad (2.51)$$

16. Определяют избыточный объем цементного теста, который собственно и обеспечивает требуемую удобоукладываемость бетонной смеси:

$$V_{\text{изб}} = k_{\text{у}} \frac{1}{\left(X - 0{,}876\right)^{0{,}9}}, \text{ м}^3. \quad (2.52)$$

В (2.52) для подвижной смеси:

$$k_{\text{у}} = 0{,}045 \cdot \text{ОК}^{0{,}4}, \quad (2.53)$$

а для жесткой:

$$k_{\text{у}} = \frac{0{,}09}{\text{Ж}^{0{,}4}}. \quad (2.54)$$

17. Определяют окончательный (уточненный) объем цементного теста:

$$V_{\text{ут}} = V_{\text{изб}} + V_1 + V_{\text{пуст}}, \text{ м}^3. \quad (2.55)$$

18. Определяют уточненный расход цемента:

$$Ц_у = \frac{V_{ут}}{V_т} Ц, \text{ кг.} \quad (2.56)$$

19. Определяют уточненный расход воды:

$$В_у = Ц_у \cdot \left(\frac{В}{Ц} \right), \text{ кг.} \quad (2.57)$$

20. Определяют объем бетонной смеси:

$$V_б = \frac{Ц_у}{\rho_ц} + \frac{П}{\rho_п} + \frac{Щ}{\rho_щ} + \frac{В_у}{\rho_в}, \text{ м}^3. \quad (2.58)$$

21. Определяют расчетные расходы компонентов бетонной смеси:
1) цемента:

$$Ц_р = \frac{Ц_у}{V_б}, \text{ кг;} \quad (2.59)$$

2) воды:

$$В_р = \frac{В_у}{V_б}, \text{ кг;} \quad (2.60)$$

3) песка:

$$П_р = \frac{П}{V_б}, \text{ кг;} \quad (2.61)$$

4) щебня:

$$Щ_р = \frac{Щ}{V_б}, \text{ кг.} \quad (2.62)$$

22. Плотность бетонной смеси составляет:

$$\rho_{бсм} = Ц_р + П_р + Щ_р + В_р, \text{ кг/м}^3. \quad (2.63)$$

Пример

По п. 1 рассчитывают водоцементное отношение бетонной смеси:

$$\left(\frac{\text{В}}{\text{Ц}}\right)=\frac{\dfrac{k_{\text{п}}\cdot k_{\text{з}}\cdot f_{\text{ц}}}{f_{\text{б}}}+1{,}65\cdot \text{К}_{\text{нг}}}{\dfrac{1+\text{К}_{\text{нг}}}{\text{К}_{\text{нг}}}}=\frac{\dfrac{1{,}39\cdot 1{,}1\cdot 50}{32{,}1}+1{,}65\cdot 0{,}28}{\dfrac{1+0{,}28}{0{,}28}}=0{,}545.$$

По п. 2 рассчитывают коэффициент k:

$$k=0{,}147\cdot 7^{0{,}13}=0{,}189,$$

а затем объем цементного теста:

$$V_{\text{т}}=k\frac{1}{\sqrt[3]{\left(\dfrac{\text{В}}{\text{Ц}}\right)^2}}=0{,}189\frac{1}{\sqrt[3]{(0{,}545)^2}}=0{,}284\ \text{м}^3.$$

По п. 3 начальная доля песка в смеси заполнителей равна:

$$r_0=41{,}2-80\cdot\left(V_{\text{т}}-0{,}2\right)=41{,}2-80\cdot\left(0{,}284-0{,}2\right)=34{,}5\ \%.$$

По п. 4 рассчитывают поправки к r_0:
– по удобоукладываемости:

$$\Delta r_{\text{у}}=1{,}4\cdot\sqrt[3]{(\text{ОК}-1)^2}=1{,}4\cdot\sqrt[3]{(7-1)^2}=4{,}6\ \%;$$

– по модулю крупности:

$$\Delta r_{\text{Мк}}=0{,}75\cdot\left(\text{Мк}-1\right)=0{,}75\cdot\left(3{,}0-1\right)=1{,}5\ \%;$$

– по наибольшей крупности щебня:

$$k_{\text{кз}}=1-0{,}008\cdot\sqrt[3]{\left(D_{\text{щ}}-10\right)^2}=1-0{,}008\cdot\sqrt[3]{(20-10)^2}=0{,}963.$$

По п. 5 окончательно доля песка в смеси заполнителей равна:

$$r = k_{\text{кз}} \cdot \left(r_0 + r_{\text{у}} + r_{\text{Мк}} \right) = 0{,}963 \cdot \left(34{,}5 + 4{,}6 + 1{,}5 \right) = 39{,}1\ \%.$$

По п. 6 определяют расход мелкого заполнителя:

$$\text{П} = \frac{1 - V_{\text{т}}}{\frac{1}{\rho_{\text{п}}} + \frac{1}{\rho_{\text{щ}}} \cdot \left(\frac{1}{r / 100} - 1 \right)} = \frac{1 - 0{,}284}{\frac{1}{2\,630} + \frac{1}{2\,670} \cdot \left(\frac{1}{39{,}1 / 100} - 1 \right)} = 743\ \text{кг}.$$

По п. 7 определяют расход крупного заполнителя:

$$\text{Щ} = \text{П} \cdot \left(\frac{1}{r / 100} - 1 \right) = 743 \cdot \left(\frac{1}{39{,}1 / 100} - 1 \right) = 1158\ \text{кг}.$$

По п. 8 рассчитывают расход цемента:

$$\text{Ц} = \frac{V_{\text{т}} + \frac{\text{В}_{\text{см}}}{1000}}{\frac{1}{\rho_{\text{ц}}} + \frac{\left(\frac{\text{В}}{\text{Ц}} \right)}{1000}} = \frac{0{,}284 + \frac{36{,}3}{1000}}{\frac{1}{3\,000} + \frac{(0{,}545)}{1000}} = 365\ \text{кг}.$$

По п. 9 рассчитывают расход воды:

$$\text{В} = \text{Ц} \cdot \left(\frac{\text{В}}{\text{Ц}} \right) = 365 \cdot (0{,}545) = 199\ \text{кг}.$$

По п. 10 рассчитывают плотность бетонной смеси:

$$\rho_{\text{бсм}} = \text{Ц} + \text{П} + \text{Щ} + \text{В} = 365 + 743 + 1158 + 199 = 2\,465\ \text{кг/м}^3.$$

Уточнение состава бетона

Из предыдущего примера:
– пустотность мелкого в виброуплотненном состоянии:

$$m_{\text{п}} = 0,331;$$

– удельная поверхность мелкого заполнителя:

$$S_{\text{п}}^{\text{уд}} = 6,672 \text{ м}^2/\text{кг};$$

– удельная поверхность крупного заполнителя:

$$S_{\text{щ}}^{\text{уд}} = 0,443 \text{ м}^2/\text{кг};$$

– удельная водопотребность мелкого заполнителя:

$$W_{\text{п}}^{\text{уд}} = 0,0349 \text{ кг/кг};$$

– удельная водопотребность крупного заполнителя:

$$W_{\text{щ}}^{\text{уд}} = 0,0111 \text{ кг/кг}.$$

По (2.12) рассчитывают общую поверхность смеси заполнителей:

$$S_{\text{см}} = S_{\text{п}}^{\text{уд}} \cdot \text{П} + S_{\text{щ}}^{\text{уд}} \cdot \text{Щ} = 6,672 \cdot 743 + 0,443 \cdot 1158 = 5\,470,3 \text{ м}^2.$$

По (2.16) рассчитывают общую водопотребность смеси заполнителей:

$$\text{В}_{\text{см}} = W_{\text{п}}^{\text{уд}} \cdot \text{П} + W_{\text{щ}}^{\text{уд}} \cdot \text{Щ} = 0,0349 \cdot 743 + 0,0111 \cdot 1158 = 38,8 \text{ кг}.$$

По п. 12 определяют водоцементное отношение цементного теста:

$$\left(\frac{\text{В}}{\text{Ц}}\right)_{\text{т}} = \frac{\text{В} - \text{В}_{\text{см}}}{\text{Ц}} = \frac{199 - 38,8}{365} = 0,439 \text{ кг}.$$

По п. 16 рассчитывают относительное водосодержание цементного теста:

$$X = \frac{\left(\frac{\text{В}}{\text{Ц}}\right)_{\text{т}}}{\text{К}_{\text{нг}}} = \frac{0,439}{0,26} = 1,69.$$

По п. 15 определяют объем цементного теста, идущего на заполнение пустот смеси заполнителей:

$$V_{\text{пуст}} = m_{\text{п}} \frac{\text{П}}{\rho_{\text{пв}}} = 0,331 \frac{743}{1760} = 0,140 \text{ м}^3.$$

По п. 15 определяют:

1) радиус цементного зерна:

$$r_{\text{ц}} = 9,15 - 23,8 \cdot \text{К}_{\text{нг}} = 9,15 - 23,8 \cdot 0,26 = 2,96 \text{ мкм};$$

2) объем цементного теста на образование первого монослоя:

$$V_1 = \frac{r_{\text{ц}} \cdot S_{\text{см}}}{1\,000\,000} = \frac{2,96 \cdot 5\,470}{1\,000\,000} = 0,016 \text{ м}^3.$$

По п. 16 определяют:

$$k_{\text{у}} = 0,045 \cdot \text{ОК}^{0,4} = 0,045 \cdot 7^{0,4} = 0,098.$$

Избыточный объем цементного теста:

$$V_{\text{изб}} = k_{\text{у}} \frac{1}{\left(X - 0,876\right)^{0,9}} = 0,098 \frac{1}{\left(1,69 - 0,876\right)^{0,9}} = 0,118 \text{ м}^3.$$

По п. 17 определяют окончательный объем цементного теста:

$$V_{\text{ут}} = 0,118 + 0,016 + 0,140 = 0,274 \text{ м}^3.$$

По п. 18 – уточненный расход цемента:

$$Ц_у = \frac{V_{ут}}{V_т} Ц = \frac{0,274}{0,284} 365 = 352 \text{ кг}.$$

По п. 19 уточненный расход воды:

$$В_у = Ц_у \cdot \left(\frac{В}{Ц} \right) = 352 \cdot 0,545 = 192 \text{ кг}.$$

По п. 20 определяют объем бетонной смеси:

$$V_б = \frac{Ц_у}{\rho_ц} + \frac{П}{\rho_п} + \frac{Щ}{\rho_щ} + \frac{В_у}{\rho_в} = \frac{352}{3150} + \frac{743}{2630} + \frac{1158}{2670} + \frac{192}{1000} = 1,02 \text{ м}^3.$$

По п. 21 определяют расчетные расходы компонентов бетонной смеси:

1) цемента:

$$Ц_р = \frac{352}{1,02} = 345 \text{ кг};$$

2) песка:

$$П_р = \frac{743}{1,02} = 728 \text{ кг};$$

3) щебня:

$$Щ_р = \frac{1158}{1,02} = 1135 \text{ кг};$$

4) воды:

$$В_р = \frac{192}{1,02} = 188 \text{ кг}.$$

По п. 22 плотность бетонной смеси составляет:

$$\rho_{бсм} = Ц_р + П_р + Щ_р + В_р = 345 + 728 + 1135 + 188 = 2\,397 \text{ кг/м}^3.$$

2.3. Упрощенный метод

Метод разработан на кафедре «Строительные материалы и технология строительства». Он кардинально отличается от иных способов тем, что удобоукладываемость бетонной смеси увязана с объемом и консистенцией (посредством водоцементного отношения) цементного теста. И в этом видится логичное развитие идей профессора И. Н. Ахвердова, заложенных в классическом методе проектирования состава бетона, и доведенное до практического воплощения. Такая структура расчетов в перспективе позволит наконец-то получить универсальную методику расчетов составов бетона тяжелых, легких, поризованных и т. д. Методика расчета состава тяжелого бетона без химических добавок представлена ниже. Она служит основой для проектирования состава бетона с пластифицирующими, воздухововлекающими добавками, а также с добавками ускорителями твердения бетона.

Порядок выполнения расчетов

Расчеты выполняются в следующей последовательности:

1. Рассчитывают водоцементное отношение $\left(\frac{В}{Ц}\right)_б$:

$$\left(\frac{В}{Ц}\right) = \frac{0,3 \cdot k_з \cdot f_ц}{f_б} + 0,08, \qquad (2.64)$$

где $k_з$ – коэффициент, учитывающий влияние крупного заполнителя на прочность бетона (для щебня равен 1,0, а для гравия 0,9).

2. Рассчитывают объем цементного теста ($V_т$):

$$V_т = \frac{k_{ОК}}{\sqrt[3]{\left[\left(\frac{В}{Ц}\right)\right]^2}} + 0,07 \cdot \left(\frac{В}{Ц}\right)^3, \text{ м}^3. \qquad (2.65)$$

Коэффициент $k_{ок}$ для подвижной смеси (ОК в см) равен:

$$k_{\text{ОК}} = 0{,}17 \cdot \text{ОК}^{0{,}1}, \tag{2.66}$$

а для жесткой (Ж в с):

$$k_{\text{ОК}} = \frac{0{,}2}{\text{Ж}^{0{,}1}}. \tag{2.67}$$

3. Определяют расход цемента (Ц):

$$\text{Ц} = \frac{V_{\text{т}}}{\dfrac{1}{\rho_{\text{ц}}} + \dfrac{\left(\dfrac{\text{В}}{\text{Ц}}\right)}{\rho_{\text{в}}}}, \text{ кг}, \tag{2.68}$$

где $\rho_{\text{ц}}$, $\rho_{\text{в}}$ – плотность цемента, воды соответственно, кг/м^3.

4. Рассчитывают расход воды (В):

$$\text{В} = \text{Ц} \cdot \left(\frac{\text{В}}{\text{Ц}}\right), \text{ кг}. \tag{2.69}$$

5. Определяют долю песка в смеси заполнителей (r):
для подвижной смеси (ОК в см):

$$r = r_0 - 80 \cdot \left(V_{\text{т}} - 0{,}2\right) + 1{,}4 \cdot \sqrt[3]{\left(\text{ОК} - 1\right)^2}, \%; \tag{2.70}$$

для жесткой (Ж в с):

$$r = r_0 - 80 \cdot \left(V_{\text{т}} - 0{,}2\right) - 0{,}75 \cdot \sqrt[3]{\left(\text{Ж} - 5\right)^2}, \text{ кг}, \tag{2.71}$$

где r_0 – начальная доля песка в смеси заполнителей (для конструкций с обычным армированием принимается равной 40 %, а для густоармированных – 45 %).

6. Определяют расход мелкого заполнителя (П):

$$П = \frac{1 - V_т}{\frac{1}{\rho_п} \cdot \frac{100}{r}}, \text{ кг}, \quad (2.72)$$

где $\rho_п$ и $\rho_щ$ – плотность в зернах песка и щебня соответственно, кг/м^3.

7. Определяют расход крупного заполнителя (Щ):

$$Щ = П \cdot \frac{\rho_щ}{\rho_п} \cdot \left(\frac{100}{r} - 1 \right), \text{ кг}. \quad (2.73)$$

8. Расчетная плотность бетонной смеси представляет собой сумму всех компонентов ($\rho_{бсм}$):

$$\rho_{бсм} = Ц + П + Щ + В, \text{ кг/м}^3. \quad (2.74)$$

Пример

По п. 1 водоцементное отношение бетонной смеси:

$$\left(\frac{В}{Ц} \right) = \frac{0,3 \cdot k_з \cdot f_ц}{f_б} + 0,08 = \frac{0,3 \cdot 1,0 \cdot 50}{32,1} + 0,08 = 0,548.$$

По п. 2 коэффициент $k_{ок}$ для смеси с осадкой конуса 7 см:

$$k_{ОК} = 0,17 \cdot ОК^{0,1} = 0,17 \cdot 7^{0,1} = 0,320,$$

объем цементного теста:

$$V_т = \frac{k_{ОК}}{\sqrt[3]{\left[\left(\frac{В}{Ц} \right) \right]^2}} + 0,07 \cdot \left(\frac{В}{Ц} \right)^3 = \frac{0,207}{\sqrt[3]{0,548^2}} + 0,07 \cdot 0,548^3 = 0,320 \text{ м}^3.$$

По п. 3 расход цемента:

$$Ц = \frac{V_т}{\frac{1}{\rho_ц} + \frac{\left(\frac{В}{Ц}\right)_б}{\rho_в}} = \frac{0{,}320}{\frac{1}{3100} + \frac{0{,}548}{1000}} = 368 \text{ кг}.$$

По п. 4 расход воды:

$$В = Ц \cdot \left(\frac{В}{Ц}\right) = 368 \cdot 0{,}548 = 201 \text{ кг}.$$

По п. 5 доля песка в смеси заполнителей:

$$r = r_0 - 80 \cdot (V_т - 0{,}2) + 1{,}4 \cdot \sqrt[3]{(ОК - 1)^2} =$$

$$= 40 - 80 \cdot (0{,}320 - 0{,}2) + 1{,}4 \cdot \sqrt[3]{(7-1)^2} = 35{,}0 \text{ %}.$$

По п. 6 расход мелкого заполнителя:

$$П = \frac{1 - V_т}{\frac{1}{\rho_п} \cdot \frac{100}{r}} = \frac{1 - 320}{\frac{1}{2\,630} \cdot \frac{100}{35{,}0}} = 626 \text{ кг}.$$

По п. 7 расход крупного заполнителя:

$$Щ = П \cdot \frac{\rho_щ}{\rho_п} \cdot \left(\frac{100}{r} - 1\right) = 626 \cdot \frac{2\,670}{2\,630} \cdot \left(\frac{100}{35{,}0} - 1\right) = 1180 \text{ кг}.$$

По п. 8 расчетная плотность бетонной смеси:

$$\rho_{бсм} = 368 + 626 + 1180 + 201 = 2\,375 \text{ кг/м}^3.$$

2.4. Метод НИИЖБ

Рассматриваемый метод по праву относится к наиболее простым. Эта простота достигается максимально возможным удалением числа влияющих факторов, что несколько снижает достоверность получаемых результатов. С другой стороны, метод НИИЖБа позволяет рассчитывать составы бетона при 100 – процентной отпускной прочности, что не позволяет реализовывать иные методы.

Порядок выполнения расчетов

Расчеты выполняются в следующей последовательности:

1. Рассчитывают водоцементное отношение бетонной смеси $\left(\frac{В}{Ц}\right)_б$:

– если расчет ведется применительно к прочности бетона в проектном возрасте (28 суток твердения в нормальных условиях) или бетона, подвергаемого тепловой обработки с получением 70 % отпускной прочности, то применяют формулу:

$$\left(\frac{В}{Ц}\right)_б = \frac{0,23 \cdot f_ц + 10}{f_б + 8}, \text{ д. ед.,} \qquad (2.75)$$

– для бетона со 100 % отпускной прочности формула следующая:

$$\left(\frac{В}{Ц}\right)_б = \frac{0,16 \cdot f_ц + 7}{f_б + 56}, \text{ д. ед.} \qquad (2.76)$$

2. По табл. 2.4 в зависимости от марки бетонной смеси по удобоукладываемости и свойств крупного заполнителя назначают табличный расход воды ($В_т$).

Таблица 2.4

Ориентировочный расход воды для бетонной смеси

Марка смеси	Расход воды, кг/м^3, при наибольшей крупности гравия или щебня, мм					
	Гравий			Щебень		
	10	20	40	10	20	40
П3	218	198	188	227	208	198
П2	207	183	178	217	198	188
П1	190	165	160	200	180	170
Ж1	175	155	145	185	165	155
Ж2	160	145	140	170	155	150
Ж3	155	140	135	165	150	145

3. Рассчитывают расход цемента (Ц):

$$Ц = \frac{В_т}{\left(\frac{В}{Ц}\right)_б}, \text{ кг.} \qquad (2.77)$$

4. Если расход цемента превышает 400 кг, то вначале увеличивают расход воды:

$$В = В_т + 0{,}1 \cdot (Ц - 400), \text{ кг.} \qquad (2.78)$$

а затем пересчитывают расход цемента:

$$Ц = \frac{В}{\left(\frac{В}{Ц}\right)_б}, \text{ кг.} \qquad (2.79)$$

5. По табл. 2.5 в зависимости от рассчитанного расхода цемента и свойств крупного заполнителя определяют долю песка в смеси заполнителей (*r*).

Таблица 2.5

Доля песка в смеси заполнителей

Расход цемента, кг/м^3	Доля песка в смеси заполнителей, д. ед., при наибольшей крупности гравия или щебня, мм					
	Гравий			Щебень		
	10	20	40	10	20	40
200	0,40	0,39	0,37	0,42	0,41	0,40
250	0,39	0,37	0,36	0,41	0,40	0,39
300	0,37	0,36	0,35	0,40	0,39	0,38
350	0,35	0,34	0,33	0,38	0,37	0,36
400 и более	0,34	0,33	0,32	0,36	0,35	0,34

6. Плотность бетонной смеси ($\rho_{бсм}$) для заполнителей из плотных пород принимают равной 2 400 кг/м^3, а для карбонатных заполнителей 2 350 кг/м^3.

7. Рассчитывают расход песка (П):

$$П = \left(\rho_{бсм} - Ц - В\right) \cdot r, \text{ кг.} \quad (2.80)$$

8. Рассчитывают расход крупного заполнителя:

$$Щ = \rho_{бсм} - Ц - В - П, \text{ кг.} \quad (2.81)$$

Пример

По п. 1 водоцементное отношение бетонной смеси:

$$\left(\frac{В}{Ц}\right)_б = \frac{0,23 \cdot f_ц + 10}{f_б + 8} = \frac{0,23 \cdot 50 + 10}{32,1 + 8} = 0,537 \text{ д. ед.}$$

По п. 2 табличный расход воды по табл. 2.4: $В_т$ = 198 кг.

По п. 3 расход цемента:

$$Ц = \frac{В_т}{\left(\frac{В}{Ц}\right)_б} = \frac{198}{0,537} = 369 \text{ кг.}$$

По п. 4, поскольку расход цемента не превышает 400 кг, то увеличивать расход воды по (2.80) и пересчитывать расход цемента по (2.81) не нужно.

По п. 5 доля песка в смеси заполнителей по табл. 2.5: $r = 0{,}36$.

По п. 7 расход песка:

$$П = (\rho_{бсм} - Ц - В) \cdot r = (2\,400 - 369 - 198) \cdot 0{,}36 = 660 \text{ кг}.$$

По п. 8 расход крупного заполнителя:

$$Щ = \rho_{бсм} - Ц - В - П = 2\,400 - 369 - 198 - 660 = 1173 \text{ кг}.$$

2.5. Метод абсолютных объемов

Одним из наиболее известных и распространенных методов расчета состава бетона является расчетно-экспериментальный метод «абсолютных объемов», разработанный профессором Б. Г. Скрамтаевым. Метод базируется на двух взаимно дополняющих условиях. Во-первых, свежеприготовленная бетонная смесь, уложенная в форму и уплотненная, не должна иметь пустот, то есть сумма абсолютных объемов всех составляющих исходных материалов в бетоне приближается к 1 м^3. Во-вторых, цементно-песчаный раствор (смесь цемента, песка и воды) должен заполнять все пустоты в крупном заполнителе. Наложение этих двух условий позволяет рассчитывать расходы составляющих бетонной смеси. Особенностью метода является использование двух формул для расчета водоцементного отношения, то есть предполагается, что зависимость прочности бетона от водоцементного отношения (или цементно-водного) изменяется в критической точке, равной 0,4.

Порядок выполнения расчетов

Расчеты выполняются в следующей последовательности:

1. Рассчитывают водоцементное отношение бетонной смеси $\left(\frac{В}{Ц}\right)_б$:

$$\left(\frac{В}{Ц}\right)_б = \frac{A \cdot f_ц}{f_б + 0{,}5 \cdot A \cdot f_ц}, \text{ д. ед.} \qquad (2.82)$$

Если водоцементное отношение получилось меньше 0,4, то его пересчитывают по следующей формуле:

$$\left(\frac{\text{В}}{\text{Ц}}\right)_{\text{б}} = \frac{A_1 \cdot f_{\text{ц}}}{f_{\text{б}} - 0{,}5 \cdot A_1 \cdot f_{\text{ц}}}, \text{ д. ед.} \qquad (2.83)$$

Величины коэффициентов A и A_1 назначают по табл. 2.6 в зависимости от качества используемых заполнителей.

Таблица 2.6

Значения коэффициентов A и A_1

Заполнители бетона	A	A_1
Высококачественные (мытые и фракционированные щебень и песок)	0,65	0,43
Рядовые	0,60	0,40
Пониженного качества (гравий и мелкий песок)	0,55	0,37

2. По табл. 2.7 в зависимости от марки бетонной смеси по удобоукладываемости и свойств крупного заполнителя назначают табличный расход воды ($В_т$).

Таблица 2.7

Ориентировочный расход воды для бетонной смеси

Марка смеси	Расход воды, кг/м^3, при наибольшей крупности гравия или щебня, мм					
	Гравий			Щебень		
	10	20	40	10	20	40
П4	227	218	203	237	228	213
П3	217	208	193	227	217	204
П2	207	187	172	212	203	187
П1	190	175	160	200	190	175
Ж1	175	160	145	185	175	160
Ж2	165	150	135	175	165	150
Ж3	160	145	130	170	160	145
Ж4	150	135	125	160	150	135

Примечание. Если нормальная густота цемента отлична от 27 %, то определенный по табл. 2.7 расход воды уменьшают на 3–5 кг на каждый процент менее 27 %, а если больше 27 %, то, соответственно, увеличивают.

При изменении модуля крупности песка на каждые 0,5 в меньшую сторону от 2,0 расход воды увеличивают на 3–5 кг, а если в большую сторону от 2,0, то, соответственно, уменьшают на 3–5 кг.

3. Рассчитывают расход цемента (Ц):

$$Ц = \frac{В_т}{\left(\frac{В}{Ц}\right)_б}, \text{ кг.} \quad (2.84)$$

4. Если расход цемента превышает 400 кг, то вначале увеличивают расход воды:

$$В = В_т + 0{,}1 \cdot (Ц - 400), \text{ кг,} \quad (2.85)$$

а затем пересчитывают расход цемента:

$$Ц = \frac{В}{\left(\frac{В}{Ц}\right)_б}, \text{ кг.} \quad (2.86)$$

5. По табл. 2.8 в зависимости от рассчитанного расхода цемента и водоцементного отношения определяют коэффициент раздвижки зерен крупного заполнителя цементно-песчаным раствором (α).

Таблица 2.8

Значения коэффициента раздвижки зерен крупного заполнителя α для пластичных бетонных смесей

Расход цемента, кг/м^3	Значения коэффициента α при водоцементном отношении					
	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8
250	–	–	–	1,26	1,32	1,38
300	–	–	1,30	1,36	1,42	–
350	–	1,32	1,38	1,44	–	–
400	1,31	1,40	1,46	–	–	–
500	1,44	1,52	1,56	–	–	–
600	1,52	1,56	–	–	–	–

Примечание. Для жестких бетонных смесей при расходе цемента менее 400 кг/м^3 коэффициент α принимают равным 1,05–1,15 (меньшая величина для мелких песков), а при расходе более 400 кг/м^3 α принимают равным не менее 1,10.

6. Рассчитывают расход крупного заполнителя (Щ):

$$Щ = \frac{1}{\left(\frac{1}{\rho_{щн}} - \frac{1}{\rho_{щ}}\right) \cdot \alpha + \frac{1}{\rho_{щ}}}, \text{ кг}, \qquad (2.87)$$

где $\rho_{щн}$ – плотность крупного заполнителя в насыпном состоянии, кг/м^3;

$\rho_{щ}$ – плотность крупного заполнителя в зернах, кг/м^3.

7. Рассчитывают расход песка (П):

$$П = \left(1 - \frac{Ц}{\rho_{ц}} - \frac{Щ}{\rho_{щ}} - \frac{В}{\rho_{в}}\right) \cdot \rho_{п}, \text{ кг}, \qquad (2.88)$$

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

$\rho_{п}$ – плотность мелкого заполнителя в зернах, кг/м^3.

8. Рассчитывают плотность бетонной смеси ($\rho_{бсм}$):

$$\rho_{бсм} = Ц + П + Щ + В, \text{ кг/м}^3. \qquad (2.89)$$

Пример

По п. 1 водоцементное отношение бетонной смеси:

По табл. 2.6 $A = 0{,}6$.

$$\left(\frac{В}{Ц}\right)_{б} = \frac{A \cdot f_{ц}}{f_{б} + 0{,}5 \cdot A \cdot f_{ц}} = \frac{0{,}6 \cdot 50}{32{,}1 + 0{,}5 \cdot 0{,}6 \cdot 50} = 0{,}638 \text{ д. ед.}$$

Поскольку водоцементное отношение получилось больше 0,4, то его не пересчитывают.

По п. 2 (по табл. 2.7) табличный расход воды: $В_т = 203$ кг.

Нормальная густота цемента 26 % – поправка к расходу воды составляет –4 кг (27 % – 26 %).

Модуль крупности песка 1,5 – поправка к расходу воды составляет +4 кг (2,0 – 1,5).

Табличный расход воды с учетом поправок:

$$В_т = 203 - 4 + 4 = 203 \text{ кг}.$$

По п. 3 расход цемента:

$$Ц = \frac{В_т}{\left(\frac{В}{Ц}\right)_б} = \frac{203}{0{,}638} = 318 \text{ кг}.$$

По п. 4 расход цемента не превышает 400 кг, поэтому расходы воды и цемента не пересчитывают.

По п. 5 (по табл. 2.8) коэффициент раздвижки зерен крупного заполнителя цементно-песчаным раствором (определяют интерполяцией): $\alpha = 1{,}4$.

По п. 6 расход крупного заполнителя:

$$Щ = \frac{1}{\left(\frac{1}{\rho_{щн}} - \frac{1}{\rho_{щ}}\right)\cdot\alpha + \frac{1}{\rho_{щ}}} = \frac{1}{\left(\frac{1}{1\,480} - \frac{1}{2\,670}\right)\cdot 1{,}4 + \frac{1}{2\,670}} = 1\,256 \text{ кг}.$$

По п. 7 расход песка:

$$П = \left(1 - \frac{Ц}{\rho_ц} - \frac{Щ}{\rho_щ} - \frac{В}{\rho_в}\right)\cdot\rho_п =$$

$$= \left(1 - \frac{318}{3\,100} - \frac{1256}{2\,670} - \frac{203}{1000}\right)\cdot 2\,630 = 589 \text{ кг}.$$

По п. 8 плотность бетонной смеси:

$$\rho_{бсм} = Ц + П + Щ + В = 318 + 589 + 1\,256 + 203 = 2\,366 \text{ кг/м}^3.$$

2.6. Метод профессора В. П. Сизова

Рассмотренный ранее метод абсолютных объемов достаточно прост и на определенном этапе развития технологии бетона был вполне премлем. Но он не учитывает всего разнообразия свойств цемента и заполнителей. Поэтому последовала модернизация данного метода, позволяющая приспособить его к современному уровню бетоноведения. Была сохранена структура метода, но в расчетные формулы вводятся корректирующие поправки, учитывающие различные влияющие факторы.

Порядок выполнения расчетов

Расчеты выполняются в следующей последовательности:

1. Рассчитывают ориентировочное вододоцементное отношение бетонной смеси (В/Ц):

$$\left(\frac{\text{В}}{\text{Ц}}\right)_{\text{б}} = \frac{A \cdot f_{\text{ц}}}{\dfrac{f_{\text{б}}}{\text{К}_1 \cdot \text{К}_2} + 0{,}5 \cdot A \cdot f_{\text{ц}}}, \qquad (2.90)$$

где К_1, К_2 – поправочные коэффициенты

Величину коэффициента качества заполнителей A назначают по данным табл. 2.9, исходя из загрязненности песка и щебня (гравия) (в случае необходимости значение коэффициента A определяют интерполяцией).

Таблица 2.9

Коэффициент качества заполнителей A

Вид заполнителя	$m_{\text{ГЛ}}$	$m_{\text{ГЛ}}^{\text{С}}$	Значение коэффициента A для бетона на		
			щебне	гравии горном	гравии речном и морском
1	2	3	4	5	6
Щебень (гравий)	0	0	0,64	0,60	0,57
Песок	0				

Окончание табл. 2.9

1	2	3	4	5	6
Щебень (гравий)	0	0,75	0,61	0,56	0,53
Песок	3				
Щебень (гравий)	1	1,50	0,58	0,53	0,50
Песок	3				
Щебень (гравий)	2	2,20	0,55	0,50	0,47
Песок	3				
Щебень (гравий)	2*	2,80	0,52	0,47	0,44
Песок	3*				

Примечания:

$m_{ГЛ}$ – содержание глины, ила и пыли в песке и щебне, %;

$m_{ГЛ}^{С}$ – суммарние содержание глины, ила и пыли в % при отношении песка к щебню, равном 1:3;

* – если на зернах щебня и песка имеется пылевидная рубашка, такие заполнители допускается применять только для бетонов прочностью 20 МПа и ниже после опытной проверки в бетонах.

Значения поправочных коэффициентов назначают по табл. 2.10 и табл. 2.11.

Таблица 2.10

Поправочный коэффициент $К_1$

Минералогический состав клинкера цемента для бетона, изготавливаемого с пропариванием	Коэффициент $К_1$
Высокоалюминатный (C_3A от 10 до 15 %)	0,88
Среднеалюминатный (C_3A от 6 до 10 %)	0,92
Низкоалюминатный (C_3A менее 6 %)	0,99
Высокоалитовый (C_3S более 55 %)	0,92
Среднеалитовый (C_3S менее 55 %)	0,94
Высокобелитовый (C_2S более 40 %)	1,02
Среднебелитовый (C_2S более 25 %)	0,98
Алюмоферритовый (C_4AF более 18 %)	0,97

Таблица 2.11

Поправочный коэффициент $К_2$

Минералогический состав клинкера цемента для бетона естественного твердения и изготавливаемого с пропариванием	Коэффициент $К_2$
Высокий уровень производства (дозировка материалов по массе, хорошие формы оснастки и контрольных образцов-кубиков, совершенный контроль за качеством бетона, надлежащий уход за твердением бетона): коэффициент вариации прочности бетона 9–12 %	0,98
Средний уровень производства: коэффициент вариации прочности бетона 13 %	0,95
Низкий уровень производства: коэффициент вариации прочности бетона 14–17 %	0,92

Примечание. Введение поправочных коэффициентов производится при наличии подробных данных по составу цемента и производственным условиям.

2. По табл. 2.12–2.18 определяют поправки (с указанными в таблицах знаками) к первоначально установленному по табл. 2.9 коэффициенту качества заполнителей, исходя из удобоукладываемости бетонной смеси, нормальной густоты цементного теста, отношения прочности каменной породы к прочности бетона, водоцементного отношения, модуля крупности песка и максимальной крупности зерен щебня.

Таблица 2.12

Поправка в значении коэффициента качества заполнителя ΔA в зависимости от подвижности бетонной смеси (ОК)

ОК, см	2	3	4	5	7	9	11	15	20
ΔA	0	–0,002	–0,005	–0,010	–0,020	–0,025	–0,035	–0,048	–0,067

Таблица 2.13

Поправка в значении коэффициента качества заполнителя ΔA в зависимости от жесткости бетонной смеси (Ж)

Ж, с	5	7	10	15	20	25	30	35	40
ΔA	0	+0,005	+0,010	+0,018	+0,021	+0,027	+0,033	+0,041	+0,045

Таблица 2.14

Поправка в значении коэффициента качества заполнителя ΔA в зависимости от нормальной густоты цементного теста (НГЦТ)

НГЦТ, %	24	25	26	27	28	29	30	31	32
ΔA	+0,040	+0,031	+0,015	0	–0,007	–0,015	–0,022	–0,030	–0,038

Таблица 2.15

Поправка в значении коэффициента качества заполнителя ΔA в зависимости от отношения прочности каменной породы к прочности бетона ($f_{КП}/f_{Б}$)

$f_{КП}/f_{Б}$	≥ 1,50	1,25	1,00	0,75	0,50
ΔA	0	–0,005	–0,015	–0,030	–0,048

Таблица 2.16

Поправка в значении коэффициента качества заполнителя ΔA в зависимости от водоцементного отношения (В/Ц)

В/Ц	≥ 0,45	0,40	0,36	0,33	0,31
ΔA	0	–0,01	–0,02	–0,03	–0,04

Таблица 2.17

Поправка в значении коэффициента качества заполнителя ΔA в зависимости от модуля крупности песка (Мкр)

$М_{КР}$	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0
ΔA	–0,035	–0,028	–0,020	–0,013	–0,007	0	+0,007	+0,015

Таблица 2.18

Поправка в значении коэффициента качества заполнителя ΔA в зависимости от наибольшей крупности зерен щебня (НКЩ)

НКЩ, мм	10	20	40	80	120	150
ΔA	–0,030	–0,020	–0,010	0	+0,008	+0,015

3. Пересчитывают водоцементное отношение бетонной смеси, предварительно просуммировав все найденные поправки $\sum \Delta A$:

$$\left(\frac{\text{В}}{\text{Ц}}\right)_{\text{б}} = \frac{\left(A + \sum \Delta A\right) \cdot f_{\text{ц}}}{\frac{f_{\text{б}}}{\text{К}_1 \cdot \text{К}_2} + 0{,}5 \cdot \left(A + \sum \Delta A\right) \cdot f_{\text{ц}}}. \qquad (2.91)$$

4. По табл. 2.19, в зависимости от удобоукладываемости бетонной смеси и крупности зерен щебня назначают ориентировочный расход воды $\text{В}_\text{т}$.

Таблица 2.19

Расход воды при затворении бетона на гранитном щебне, песке с модулем крупности 3, цементе с нормальной густотой 28 %

Удобоукладываемость бетонной смеси		Максимальная крупность зерен щебня, мм				
ОК, см	Ж, с	10	20	40	80	150
1	2	3	4	5	6	7
–	40	125	115	103	90	80
–	35	129	118	106	94	84
–	30	133	121	110	98	89
–	25	138	126	115	104	94
–	20	144	131	121	110	100
–	15	154	141	130	119	108
–	10	165	152	140	128	117
1	7	182	169	156	143	132
2	5	188	175	162	150	140
3	–	194	181	168	157	145
4	–	198	186	173	161	151

Окончание табл. 2.19

1	2	3	4	5	6	7
5	–	203	190	178	166	158
7	–	210	198	185	173	165
9	–	218	204	191	180	172
11	–	222	210	198	186	178
15	–	232	220	208	195	187
20	–	239	229	214	202	193

5. Поправки к найденному расходу воды устанавливают по данным табл. 2.20.

Таблица 2.20

Поправки к расходу воды

Характеристики бетонной смеси	Расход воды, кг/м^3		Дополнительные указания
	Увеличение	Уменьшение	
1	2	3	4
Щебень из метаморфических и осадочных пород	4–13	–	4 – при прочности камня 80 МПа; 13 – при прочности камня 40 МПа. Для другой прочности поправки определяются по интерполяции
Горный гравий	–	5–10	Меньшие значения – при средней окатанности зерен, большие – 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 при содержании пыли, глины соответственно до 1, 3 и 5 %
При изменении модуля крупности песка на каждые 0,5 в большую сторону от 3	–	3; 4; 5	

Окончание табл. 2.20

1	2	3	4
Щебень из пород камня с гладкой поверхностью излома (диабаз, базальт, кварцитовый песчаник и др.)	–	3	–
Песок с гладкой, хорошо окатанной поверхностью	–	4	–
При изменении нормальной густоты цемента на каждый процент в большую сторону от 28 %	4	–	–
При изменении нормальной густоты цемента на каждый процент в меньшую сторону от 28 %	–	4	–
При изменении расхода цемента на каждые 10 кг сверх 350 кг/м^3	1	–	–
Промытый щебень	–	6	–
Промытый песок	–	7	–
При увеличении содержания в щебне ила, пыли на каждый процент сверх 1 процента	1	–	–
При увеличении содержания в щебне частиц меньше 5 мм на каждый процент сверх 5 %	2	–	–
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	–	–	–
25	3	–	–
30	7	–	–
35	11	–	–

Поправки суммируют ($\sum \Delta B$), определяя окончательный расход воды:

$$B = B_т + \sum \Delta B, \text{ кг.} \quad (2.92)$$

6. Определяют расход цемента:

$$Ц = \frac{B}{\left(\frac{B}{Ц}\right)_б}, \text{ кг.} \quad (2.93)$$

7. Рассчитывают абсолютный объем цементного теста:

$$V_{цт} = \frac{Ц}{\rho_ц} + \frac{B}{\rho_в}, \text{ м}^3. \quad (2.94)$$

8. Определяют абсолютный объем заполнителей:

$$V_з = 1 - V_{цт}, \text{ м}^3. \quad (2.95)$$

9. По табл. 2.21, исходя из пустотности крупного и мелкого заполнителей, устанавливают табличный коэффициент раздвижки зерен щебня раствором $\alpha_т$.

Таблица 2.21

Коэффициент раздвижки зерен щебня раствором ($\alpha_т$)

Пустотстотность песка, доли	Величина коэффициента $\alpha_т$ при пустотности щебня, доли										
	0,35	0,37	0,39	0,41	0,43	0,45	0,47	0,49	0,51	0,53	0,55
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
0,35	1,51	1,47	1,43	1,39	1,36	1,32	1,28	1,24	1,21	1,17	1,14
0,37	1,49	1,45	1,41	1,37	1,33	1,30	1,26	1,22	1,19	1,15	1,12
0,39	1,47	1,43	1,39	1,35	1,31	1,28	1,24	1,21	1,17	1,14	1,10
0,41	1,45	1,41	1,37	1,33	1,29	1,26	1,22	1,19	1,15	1,12	1,08

Окончание табл. 2.21

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
0,43	1,43	1,39	1,35	1,31	1,28	1,24	1,20	1,17	1,13	1.10	1,06
0,45	1,40	1,36	1,32	1,29	1,25	1,22	1,18	1,15	1,11	1,08	1,04
0,47	1,38	1,34	1,30	1,27	1,23	1,20	1,16	1,13	1,09	1,06	1,02
0,49	1,36	1,32	1,28	1,25	1,21	1,18	1,14	1,10	1,07	1,04	1,10
0,51	1,34	1,30	1,27	1,23	1,19	1,16	1,12	1,08	1,05	1,02	0,99
0,53	1,32	1,28	1,24	1,21	1,17	1,14	1,10	1,06	1,03	1,10	0,97
0,55	1,30	1,26	1,22	1,19	1,15	1,12	1,08	1,05	1,02	0,98	0,95

В табл. 2.21:

– значения приведены для бетонных смесей пластичностью 2 см (жесткостью 5 с) при расходах цемента до 350 кг/м^3, уплотненных вибрацией (обычные конструкции);

– при использовании в качестве крупного заполнителя гравия значение коэффициента раздвижки зерен уменьшается на 0,04–0,05;

– для тонкостенных и густоармированных конструкций (бетонные смеси пластичные и литые) значение коэффициента раздвижки зерен увеличивается на 0,03–0,04.

10. По табл. 2.22–2.24 определяют поправки (с указанными в таблицах знаками) к установленному по табл. 2.21 коэффициенту раздвижки зерен, исходя из расхода цемента и удобоукладываемости бетонной смеси.

Таблица 2.22

Поправка в значении коэффициента раздвижки зерен при расходе цемента сверх 350 кг/м^3

Расход цемента, кг/м^3	350	400	450	500	550	600
Поправка $\Delta\alpha$	0	+0,022	+0,050	+0,007	+0,095	+0,123

Таблица 2.23

Поправка в значении коэффициента раздвижки зерен при пластичности бетонной смеси сверх 2 см

ОК, см	2	3	4	5	7	9	11	15	20
Поправка $\Delta\alpha$	0	+0,04	+0,07	+0,10	+0,15	+0,20	+0,24	+0,30	+0,36

Таблица 2.24

Поправка в значении коэффициента раздвижки зерен при жесткости бетонной смеси сверх 5 с

Ж, с	5	7	10	15	20	25	30	35	40
Поправка $\Delta\alpha$	0	–0,05	–0,10	–0,10	–0,16	–0,24	–0,26	–0,30	–0,33

Поправки суммируют, определяя окончательный коэффициент раздвижки зерен заполнителя раствором:

$$\alpha = \alpha_{т} + \sum \Delta\alpha. \tag{2.96}$$

11. Рассчитывают расход щебня:

$$Щ = \frac{\rho_{щн}}{1 + m_{щ} \cdot (\alpha - 1)}, \text{ кг}. \tag{2.97}$$

12. Рассчитывают расход песка:

$$П = \left(1 - \frac{Ц}{\rho_{ц}} - \frac{Щ}{\rho_{щ}} - \frac{В}{\rho_{в}}\right) \cdot \rho_{п}, \text{ кг}. \tag{2.98}$$

Расход песка может быть определен и как:

$$П = \left(V_{з} - V_{щ}\right) \cdot \rho_{п}, \text{ кг},$$

но в этом случае предварительно должен быть рассчитан абсолютный объем крупного заполнителя:

$$V_{щ} = \frac{Щ}{\rho_{щ}}, \text{ м}^3. \tag{2.99}$$

13. Рассчитывают теоретическую среднюю плотность бетонной смеси:

$$\rho_{бсм} = Ц + П + Щ + В, \text{ кг/м}^3. \tag{2.100}$$

14. Рассчитывают абсолютный объем материалов:

$$V_{\text{бсм}} = \frac{\text{Ц}}{\rho_{\text{ц}}} + \frac{\text{П}}{\rho_{\text{п}}} + \frac{\text{Щ}}{\rho_{\text{щ}}} + \frac{\text{В}}{\rho_{\text{в}}},\ \text{м}^3. \qquad (2.101)$$

При правильно спроектированном составе бетона абсолютный объем материалов должен быть около 1,0 м^3.

Пример

Отношение прочности каменной породы щебня к прочности бетона составляет:

$$\frac{f_{\text{кп}}}{f_{\text{б}}} = \frac{120}{30} = 3,7.$$

Определяют пустотность песка в насыпном состоянии:

$$m_{\text{п}} = 1 - \frac{\rho_{\text{пн}}}{\rho_{\text{п}}} = 1 - \frac{1\,640}{2\,630} = 0,376.$$

Определяют пустотность щебня в насыпном состоянии:

$$m_{\text{щ}} = 1 - \frac{\rho_{\text{щн}}}{\rho_{\text{щ}}} = 1 - \frac{1\,480}{2\,670} = 0,446.$$

По табл. 2.9 определяют коэффициент качества заполнителей, который равен 0,60.

Для бетона естественного твердения коэффициент $К_1$ принимается равным 1 (табл. 2.10).

По табл. 2.11 устанавливают, что для среднего уровня производства величина $К_2$ равна 0,95.

По п. 1 рассчитывают ориентировочное водоцементное отношение бетонной смеси

$$\left(\frac{\text{В}}{\text{Ц}}\right)_{\text{б}} = \frac{A \cdot f_{\text{ц}}}{\frac{f_{\text{б}}}{\text{К}_1 \cdot \text{К}_2} + 0,5 \cdot A \cdot f_{\text{ц}}} = \frac{0,55 \cdot 50}{\frac{32,1}{1,0 \cdot 0,95} + 0,5 \cdot 0,60 \cdot 50} = 0,613.$$

Определяют поправки к табличному коэффициенту качества заполнителей:

– по подвижности смеси – –0,02 (табл. 2.12);

– по нормальной густоте цемента – +0,015 (табл. 2.14);

– по соотношению прочности щебня и бетона – 0 (табл. 2.15);

– по водоцементному отношению – 0 (табл. 2,16);

– по модулю крупности песка – –0,011 (табл. 2.17);

– по наибольшей крупности щебня – –0,020 (табл. 2.18).

По п. 2 определяют уточненный коэффициент качества заполнителей:

$$A + \sum \Delta A = 0,60 - 0,02 + 0,015 - 0,011 - 0,020 = 0,564.$$

По п. 3 рассчитывают уточненное значение водоцементного отношения:

$$\left(\frac{\text{В}}{\text{Ц}}\right)_{\text{б}} = \frac{\left(A + \sum \Delta A\right) \cdot f_{\text{ц}}}{\frac{f_{\text{б}}}{\text{К}_1 \cdot \text{К}_2} + 0,5 \cdot \left(A + \sum \Delta A\right) \cdot f_{\text{ц}}} =$$

$$= \frac{0,564 \cdot 50,0}{\frac{32,1}{1,00 \cdot 0,95} + 0,5 \cdot 0,564 \cdot 50,0} = 0,589.$$

По п. 4 по табл. 2.19 назначают расход воды для получения бетонной смеси с подвижностью 7 см (марка П2) – 198 кг.

По п. 5 последовательно просматривая табл. 2.20, определяют необходимые поправки в расходе воды:

– для модуля крупности песка 2,5 при содержании глины, ила и пыли 3 % – +6,4 кг;

– для нормальной густоты цемента 26,0 % – –8 кг.

Расход воды с учетом поправок составляет:

$$\text{В} = \text{В}_{\text{т}} + \sum \Delta \text{В} = 198 + 6,4 - 8 = 196 \text{ кг}.$$

По п. 6 определяют расход цемента:

$$Ц = \frac{В}{\left(\frac{В}{Ц}\right)_т} = \frac{196}{0,589} = 332 \text{ кг}.$$

Поскольку расход цемента менее 350 кг, поправка в расходе воды по данному параметру не требуется.

Сопоставляют полученный расход цемента с минимально допустимым – 200 кг. Поскольку полученный результат это значение не превышает, то расход цемента не изменяем и расчет продолжают.

По п. 7 устанавливают абсолютный объем цементного теста:

$$V_{цт} = \frac{Ц}{\rho_ц} + \frac{В}{\rho_в} = \frac{332}{3100} + \frac{196}{1000} = 0,301 \text{ м}^3.$$

По п. 8 абсолютный объем заполнителей тогда равен:

$$V_з = 1 - V_{цт} = 1 - 0,301 = 0,699 \text{ м}^3.$$

По п. 9 по табл. 2.21 устанавливают, что при пустотности песка и щебня соответственно 0,376 и 0,446 м^3 табличный коэффициент раздвижки зерен заполнителя раствором ($\alpha_т$) составляет 1,323.

По п. 10 определяют поправки к найденному коэффициенту $\alpha_т$:

– расход цемента менее 350 кг, поэтому поправка $\Delta\alpha$ равна 0 (табл. 2.22);

– для подвижности бетонной смеси 7 см поправка $\Delta\alpha$ равна +0,15 (табл. 2.23).

Окончательно коэффициент раздвижки зерен заполнителя раствором равен:

$$\alpha = \alpha_т + \sum \Delta\alpha = 1,323 + 0,15 = 1,473.$$

По п. 11 расход щебня:

$$Щ = \frac{\rho_{щн}}{1 + m_щ \cdot (\alpha - 1)} = \frac{1480}{1 + 0,446 \cdot (1,473 - 1)} = 1222 \text{ кг}.$$

По п. 12 расход песка:

$$П = \left(1 - \frac{Ц}{\rho_ц} - \frac{Щ}{\rho_щ} - \frac{В}{\rho_в}\right) \cdot \rho_п =$$

$$= \left(1 - \frac{332}{3\,100} - \frac{1\,222}{2\,670} - \frac{196}{1000}\right) \cdot 2\,630 = 635 \text{ кг}.$$

Аналогичный результат получается, если расход песка определить по выражению:

$$V_щ = \frac{Щ}{\rho_щ} = \frac{1\,222}{2\,670} = 0,458 \text{ м}^3.$$

$$П = \left(V_з - V_щ\right) \cdot \rho_п = \left(0,699 - 0,458\right) \cdot 2\,630 = 635 \text{ кг}.$$

По п. 13 рассчитывают среднюю плотность бетонной смеси:

$$\rho_{бсм} = Ц + П + Щ + В = 332 + 635 + 1\,222 + 196 = 2\,385 \text{ кг/м}^3.$$

По п. 14 определяют абсолютный объем материалов:

$$V_{бсм} = \frac{Ц}{\rho_ц} + \frac{П}{\rho_п} + \frac{Щ}{\rho_щ} + \frac{В}{\rho_в} = \frac{332}{3\,150} + \frac{635}{2\,630} + \frac{1\,222}{2\,670} + \frac{196}{1000} = 1,00 \text{ м}^3.$$

3. ПРОЕКТИРОВАНИЕ СОСТАВА ЛЕГКОГО БЕТОНА

Классический метод проектирования состава легкого бетона, также разработанный профессором И. Н. Ахвердовым, сохранил недостатки, присущие и методу для тяжелого бетона. А именно: интуитивное назначение объема крупного заполнителя, относительного водосодержания цементного теста и добавки к исходному объему цементного теста для обеспечения заданной удобоукладываемости бетонной смеси. Описанная ниже методика, предложенная профессором Э. И. Батяновским, исключает какое-либо интуитивное вмешательство в расчетный процесс. Объем крупного заполнителя назначается в соответствии с особенностями технологии производства изделий и марки бетонной смеси по удобоукладываемости. Прямой расчет истинного водоцементного отношения бетонной смеси исключил необходимость последовательного назначения относительного водосодержания цементного теста и последующего расчета прочности бетона вплоть до оптимальной величины. Толщина пленки цементного теста на поверхности рассчитывается в связи с удобоукладываемостью бетонной смеси и особенностями заполнителей. Конечно, в чем-то методика и не позволяет достаточно точно проектировать состав бетона, что объясняется в первую очередь недоучетом плотностей крупного и мелкого заполнителей как в виброуплотнном состоянии, так и в зернах. Однако в целом спроектированный состав для оптимизации требует лишь незначительной экспериментальной корректировки.

Порядок выполнения расчетов

Расчеты ведутся в следующем порядке:

1. Рассчитывают пустотность крупного заполнителя (аглопоритового щебня или керамзитового гравия) в виброуплотненном состоянии ($m_{кз}$):

$$m_{кз} = 1 - \frac{\rho_{кзв}}{\rho_{кз}}, \qquad (3.1)$$

где $\rho_{кзв}$ – плотность крупного заполнителя в виброуплотненном состоянии, кг/м^3 (может быть принята в 1,2 раза больше насыпной плотности);

$\rho_{кз}$ – плотность крупного заполнителя в зернах (может быть принята равной для аглопоритового щебня 1 350, для керамзитового гравия 900 или определена экспериментально), кг/м^3.

2. Рассчитывают пустотность мелкого заполнителя (кварцевого, аглопоритового или керамзитового песка) в виброуплотненном состоянии ($m_{мз}$):

$$m_{мз} = 1 - \frac{\rho_{мзв}}{\rho_{мз}}, \qquad (3.2)$$

где $\rho_{мзв}$ – плотность мелкого заполнителя в виброуплотненном состоянии, кг/м^3 (может быть принята в 1,2 раза больше насыпной плотности);

$\rho_{мз}$ – плотность мелкого заполнителя в зернах (может быть принята равной для аглопоритового песка 1 900, для керамзитового – 1 600 или определена экспериментально), кг/м^3.

3. Исходя из технологических особенностей формования изделий и марки бетонной смеси по удобоукладываемости, по табл. 3.1 назначают объем крупного заполнителя ($V_{кз}$) в 1м^3 его смеси с мелким заполнителем.

Таблица 3.1

Рекомендуемые значения $V_{кз}$, м^3

Условия формования изделий	Марка бетонной смеси по удобоукладываемости			
	Ж1–Ж4	П1	П2	П3
1	2	3	4	5
Горизонтальное формование на виброплощадках или уплотнение глубинными вибраторами	0,85–0,90	0,83–0,85	0,80–0,83	–
В формах высотой до 1,5 м с навесными вибраторами или на кассетно-конвейерных линиях	0,75–0,85	0,80–0,83	0,75–0,80	–

Продолжение табл. 3.1

1	2	3	4	5
Стенд-кассеты, объемно-блочные элементы в стенд-формах и на «каруселях» и пр.	–	–	–	0,75–0,80
Виброштампование, вибропрокат, вальцевание, роликовое формование и пр.	0,75–0,78	0,73–0,75	–	–
Нагнетательные методы, экструзия, пресс-вакуумирование, пневмотранспорт бетонной смеси	–	0,70–0,73	0,65–0,70	0,60–0,65

4. Рассчитывают объем песка в виброуплотненном состоянии ($V_{\text{мз}}$):

$$V_{\text{мз}} = 1 - V_{\text{кз}} \cdot \left(1 - m_{\text{кз}}\right), \text{ м}^3. \quad (3.3)$$

5. Рассчитывают пустотность смеси заполнителей в виброуплотненном состоянии ($m_{\text{см}}$):

$$m_{\text{см}} = V_{\text{мз}} \cdot m_{\text{мз}}. \quad (3.4)$$

6. Рассчитывают расход крупного заполнителя (КЗ):

$$\text{КЗ} = V_{\text{кз}} \cdot \rho_{\text{кзв}}, \text{ кг}. \quad (3.5)$$

7. Рассчитывают расход мелкого заполнителя (МЗ):

$$\text{МЗ} = V_{\text{мз}} \cdot \rho_{\text{мзв}}, \text{ кг}. \quad (3.6)$$

8. Рассчитывают удельную поверхность крупного заполнителя ($S_{\text{удкз}}$):

$$S_{\text{удкз}} = \frac{k_{\text{фкз}} \cdot \left(F_{40} + 2 \cdot F_{20} + 4 \cdot F_{10} + 8 \cdot F_5\right)}{100}, \text{ м}^2/\text{кг}, \quad (3.7)$$

где $k_{\text{фкз}}$ – коэффициент формы зерен крупного заполнителя (может быть принят: для аглопоритового щебня – 1,9–2,0 и керамзитового гравия – 1,7–1,8, м^2/кг);

$F40$, $F20$, $F10$, $F5$ – частные остатки крупного заполнителя на ситах 40, 20, 10, 5 мм, %.

9. Рассчитывают удельную поверхность мелкого заполнителя ($S_{\text{удмз}}$):

$$S_{\text{удмз}} = \frac{k_{\text{фмз}} \cdot \left(\begin{matrix} F_{2,5} + 2 \cdot F_{1,25} + 4 \cdot F_{0,63} + \\ +8 \cdot F_{0,315} + 16 \cdot F_{0,16} + 32 \cdot F_{<0,16} \end{matrix} \right)}{100}, \text{ м}^2/\text{кг}, \qquad (3.8)$$

где $k_{\text{фмз}}$ – коэффициент формы зерен мелкого заполнителя (может быть принят: для кварцевого песка – 1,3–1,5, аглопоритового – 1,6–1,8 и керамзитового – 1,4–1,6, м^2/кг);

$F2{,}5$, $F1{,}25$… $F < 0{,}16$ – частные остатки мелкого заполнителя на ситах 2,5, 1,25… менее 0,16 мм, %;

10. Рассчитывают площадь поверхности смеси заполнителей:

$$S_{\text{см}} = S_{\text{удкз}} \cdot \text{КЗ} + S_{\text{удмз}} \cdot \text{МЗ}, \text{ м}^2. \qquad (3.9)$$

11. Рассчитывают толщину пленки цементного теста на смазывание каждого зерна крупного и мелкого заполнителей (δ):

– при поверхности смеси заполнителей 8 000 м^2 и менее:

$$\delta = \delta_0 + 0{,}5 \cdot (\text{ОК} - 1), \text{ мкм}, \qquad (3.10)$$

– при поверхности смеси заполнителей 8 000 м^2 и более:

$$\delta = \delta_0 - 0{,}00025 \cdot (S_{\text{см}} - 8\,000) + 0{,}5 \cdot (\text{ОК} - 1), \text{ мкм}, \qquad (3.11)$$

где δ_0 – начальная толщина пленки цементного теста на смазывание каждого зерна смеси заполнителей, принимаемая равной: для аглопоритового щебня и керамзитового гравия 15,5 и 14,5 мкм соответственно.

12. Рассчитывают объем бетонной смеси ($V_б$):

$$V_б = 1 + 1 \cdot 10^{-6} \cdot \delta \cdot S_{см},\ м^3. \quad (3.12)$$

13. Рассчитывают объем цементного теста ($V_т$):

$$V_т = \frac{1 \cdot m_{см} + 1 \cdot 10^{-6} \cdot \delta \cdot S_{см}}{V_б},\ м^3. \quad (3.13)$$

14. Пересчитывают расход крупного заполнителя (КЗ):

$$КЗ' = \frac{КЗ}{V_б},\ кг. \quad (3.14)$$

15. Пересчитывают расход мелкого заполнителя (МЗ):

$$МЗ' = \frac{МЗ}{V_б},\ кг. \quad (3.15)$$

16. Рассчитывают общую водопотребность крупного заполнителя ($В_{кзобщ}$):

$$В_{кзобщ} = КЗ' \cdot \frac{W_{кз}}{100},\ кг, \quad (3.16)$$

где $W_{кз}$ – водопоглощение крупного заполнителя, % (определяют экспериментально, но может быть принято равным для аглопоритового щебня 8–10, а для керамзитового гравия – 18–20 %).

17. Рассчитывают общую водопотребность мелкого заполнителя ($В_{мзобщ}$):

$$В_{мзобщ} = МЗ' \cdot \frac{W_{мз}}{100},\ кг, \quad (3.17)$$

где $W_{мз}$ – водопоглощение мелкого заполнителя, % (определяют экспериментально, но может быть принято равным для кварцевого песка 4,5, а для аглопоритового и керамзитового – 10–15 %.

18. Рассчитывают количество воды, поглощенное зернами крупного заполнителя ($В_{кзпогл}$):

$$В_{кзпогл} = k_{кзпогл} \cdot В_{кзобщ}, \text{ кг}, \quad (3.18)$$

где $k_{кзпогл}$ – коэффициент перехода от общей водопотребности крупного заполнителя к поглощенной, д. ед. (может быть принят равным для аглопоритового щебня 0,7, а для керамзитового гравия – 0,8).

19. Рассчитывают количество воды, поглощенное зернами мелкого заполнителя ($В_{мзпогл}$):

$$В_{мзпогл} = k_{мзпогл} \cdot В_{мзобщ}, \text{ кг}, \quad (3.19)$$

где $k_{мзпогл}$ – коэффициент перехода от общей водопотребности мелкого заполнителя к поглощенной, д. ед. (может быть принят равным для кварцевого песка 0,3, аглопоритового – 0,75 и керамзитового – 0,65).

20. Рассчитывают истинное (без учета воды, поглощенной зернами заполнителей) водоцементное отношение бетона $\left(\frac{В}{Ц}\right)_{ист}$:

$$\left(\frac{В}{Ц}\right)_{ист} = \frac{\alpha \cdot k_з \cdot k_\delta \cdot f_ц}{f_б} + \beta, \quad (3.20)$$

где α, δ – коэффициенты, зависящие от особенностей технологии производства изделий, для вибрированного и центрифугированного бетона без активации цементного теста и без применения добавок ускорителей твердения равные 0,248 и 0,092 соответственно;

$k_з$ – коэффициент, учитывающий свойства заполнителей и равный:

– для аглопоритового щебня и кварцевого песка 0,90;

– для аглопоритового щебня и пористого песка 0,85;

– для керамзитового гравия и кварцевого или пористого песка:

$$k_з = 0,25 + 0,000875 \cdot (\rho_{кз} - 400), \text{ д. ед.}; \quad (3.21)$$

k_δ – коэффициент, зависящий от толщины пленки цементного теста на смазывание каждого зерна смеси заполнителей (δ) и равный:

$$k_\delta = 1 + 0,1 \cdot (\delta - \delta_0), \text{ д. ед.} \quad (3.22)$$

21. Рассчитывают расход цемента (Ц):

$$\text{Ц} = \frac{V_{\text{т}}}{k_{\text{вв}} \cdot \left[\frac{1}{\rho_{\text{ц}}} + \left(\frac{\text{В}}{\text{Ц}} \right)_{\text{ист}} \cdot \frac{1}{\rho_{\text{в}}} \right]}, \text{ кг}, \quad (3.23)$$

где $k_{\text{вв}}$ – коэффициент, учитывающий воздухововлечение бетонной смеси и принимаемый равным 1,03 и 1,02 для аглопорито- и керамзитобетонных смесей соответственно;

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

$\rho_{\text{в}}$ – плотность воды, кг/м^3.

22. Рассчитывают расход воды (В):

$$\text{В} = \left(\frac{\text{В}}{\text{Ц}} \right)_{\text{ист}} \cdot \text{Ц} + \text{В}_{\text{кзпогл}} + \text{В}_{\text{мзпогл}}, \text{ кг}. \quad (3.24)$$

23. Рассчитывают уточненный объем бетонной смеси:

$$V_{\text{б1}} = \frac{\text{Ц}}{\rho_{\text{ц}}} + \frac{\text{МЗ}'}{\rho_{\text{мз}}} + \frac{\text{КЗ}'}{\rho_{\text{кз}}} + \left(\frac{\text{В}}{\text{Ц}} \right)_{\text{ист}} \cdot \frac{\text{Ц}}{\rho_{\text{в}}}, \text{ м}^3, \quad (3.25)$$

24. Уточняют расход цемента:

$$\text{Ц}_1 = \frac{\text{Ц}}{V_{\text{б1}}}, \text{ кг}. \quad (3.26)$$

25. Уточняют расход мелкого заполнителя:

$$\text{МЗ}_1 = \frac{\text{МЗ}'}{V_{\text{б1}}}, \text{ кг}. \quad (3.27)$$

26. Уточняют расход крупного заполнителя:

$$\text{КЗ}_1 = \frac{\text{КЗ}'}{V_{\text{б1}}}, \text{ кг}. \quad (3.28)$$

27. Уточняют расход воды:

$$В_1 = \frac{В}{V_{б1}},\ кг. \qquad (3.29)$$

28. Определяют расчетную среднюю плотность бетонной смеси ($\rho_{бсм}$):

$$\rho_{бсм} = Ц_1 + МЗ_1 + КЗ_1 + В_1,\ кг/м^3. \qquad (3.30)$$

29. Определяют расчетную среднюю плотность бетона в высушенном состоянии ($\rho_б$):

$$\rho_б = 1{,}15 \cdot Ц_1 + МЗ_1 + КЗ_1,\ кг/м^3. \qquad (3.31)$$

Пример

Требуется спроектировать состав легкого бетона: класс по прочности на сжатие LC20/25; средняя плотность в высушенном состоянии D1300; марка бетонной смеси по удобоукладываемости П1. Уплотнение бетонной смеси производится на виброплощадке.

Используется цемент, крупный заполнитель и мелкий заполнитель.

Цемент: марки М500, плотность 3 100 кг/м^3.

Крупный заполнитель: керамзитовый гравий плотностью в виброуплотненном состоянии и в зернах 600 и 900 кг/м^3 соответственно; частные остатки на ситах 40, 20, 10 и 5 мм равны соответственно 0, 0, 40 и 60 %; коэффициент формы зерен 1,7 м^2/кг; водопоглощение 19 %; коэффициент перехода от общей водопотребности крупного заполнителя к поглощенной 0,8.

Мелкий заполнитель: керамзитовый песок плотностью в виброуплотненном состоянии и в зернах 1000 и 1 600 кг/м^3 соответственно; частные остатки на ситах 2,5, 1,25, 0,63, 0,315, 0,16 и менее 0,16 мм равны соответственно 15, 25, 20, 20, 15 и 5 %; коэффициент формы зерен 1,5 м^2/кг; водопоглощение 15 %; коэффициент перехода от общей водопотребности крупного заполнителя к поглощенной 0,65.

По п. 1 пустотность крупного заполнителя в виброуплотненном состоянии:

$$m_{\text{кз}} = 1 - \frac{\rho_{\text{кзв}}}{\rho_{\text{кз}}} = 1 - \frac{600}{900} = 0{,}333.$$

По п. 2 пустотность мелкого заполнителя в виброуплотненном состоянии:

$$m_{\text{мз}} = 1 - \frac{\rho_{\text{мзв}}}{\rho_{\text{мз}}} = 1 - \frac{1000}{1\,600} = 0{,}375.$$

По п. 3 объем крупного заполнителя в виброуплотненном состоянии ($V_{\text{кз}}$) по табл. 3.1 равен 0,83 м^3.

По п. 4 объем песка в виброуплотненном состоянии:

$$V_{\text{мз}} = 1 - V_{\text{кз}} \cdot \left(1 - m_{\text{кз}}\right) = 1 - 0{,}83 \cdot \left(1 - 0{,}333\right) = 0{,}447 \text{ м}^3.$$

По п. 5 пустотность смеси заполнителей в виброуплотненном состоянии:

$$m_{\text{см}} = V_{\text{мз}} \cdot m_{\text{мз}} = 0{,}447 \cdot 0{,}375 = 0{,}168.$$

По п. 6 расход крупного заполнителя:

$$\text{КЗ} = V_{\text{кз}} \cdot \rho_{\text{кзв}} = 0{,}83 \cdot 600 = 498 \text{ кг}.$$

По п. 7 расход мелкого заполнителя:

$$\text{МЗ} = V_{\text{мз}} \cdot \rho_{\text{мзв}} = 0{,}447 \cdot 1000 = 447 \text{ кг}.$$

По п. 8 удельная поверхность крупного заполнителя:

$$S_{\text{удкз}} = \frac{k_{\text{фкз}} \cdot \left(F_{40} + 2 \cdot F_{20} + 4 \cdot F_{10} + 8 \cdot F_5\right)}{100} =$$

$$= \frac{1{,}7 \cdot \left(4 \cdot 40 + 8 \cdot 60\right)}{100} = 10{,}9 \text{ м}^2/\text{кг}.$$

По п. 9 удельная поверхность мелкого заполнителя:

$$S_{\text{удмз}} = \frac{k_{\text{фмз}} \cdot \left(F_{2,5} + 2 \cdot F_{1,25} + 4 \cdot F_{0,63} + 8 \cdot F_{0,315} + 16 \cdot F_{0,16} + 32 \cdot F_{<0,16}\right)}{100} =$$

$$= \frac{1,5 \cdot \left(15 + 2 \cdot 25 + 4 \cdot 20 + 8 \cdot 20 + 16 \cdot 15 + 32 \cdot 5\right)}{100} = 10,5 \text{ м}^2/\text{кг}.$$

По п. 10 площадь поверхности смеси заполнителей:

$$S_{\text{см}} = S_{\text{удкз}} \cdot \text{КЗ} + S_{\text{удмз}} \cdot \text{МЗ} = 10,9 \cdot 498 + 10,5 \cdot 447 = 10\,142 \text{ м}^2.$$

По п. 11 толщина пленки цементного теста на смазывание каждого зерна крупного и мелкого заполнителей:

$$\delta = \delta_0 - 0,00025 \cdot \left(S_{\text{см}} - 8\,000\right) + 0,5 \cdot \left(\text{ОК} - 1\right) =$$

$$= 14,5 - 0,00025 \cdot \left(10\,142 - 8\,000\right) + 0,5 \cdot \left(3 - 1\right) = 14,96 \text{ мкм}.$$

По п. 12 объем бетонной смеси:

$$V_{\text{б}} = 1 + 1 \cdot 10^{-6} \cdot \delta \cdot S_{\text{см}} = 1 + 1 \cdot 10^{-6} \cdot 14,96 \cdot 10\,142 = 1,152 \text{ м}^3.$$

По п. 13 объем цементного теста:

$$V_{\text{т}} = \frac{1 \cdot m_{\text{см}} + 1 \cdot 10^{-6} \cdot \delta \cdot S_{\text{см}}}{V_{\text{б}}} =$$

$$= \frac{1 \cdot 0,168 + 1 \cdot 10^{-6} \cdot 14,96 \cdot 10\,142}{1,152} = 0,277 \text{ м}^3.$$

По п. 14 расход крупного заполнителя:

$$\text{КЗ}' = \frac{\text{КЗ}}{V_{\text{б}}} = \frac{498}{1,152} = 432 \text{ кг}.$$

По п. 15 расход мелкого заполнителя:

$$\text{МЗ}' = \frac{\text{МЗ}}{V_{\text{б}}} = \frac{447}{1{,}152} = 388 \text{ кг.}$$

По п. 16 общая водопотребность крупного заполнителя:

$$\text{В}_{\text{кзобщ}} = \text{КЗ}' \cdot \frac{W_{\text{кз}}}{100} = 432 \cdot \frac{19}{100} = 82{,}2 \text{ кг.}$$

По п. 17 общая водопотребность мелкого заполнителя:

$$\text{В}_{\text{мзобщ}} = \text{МЗ}' \cdot \frac{W_{\text{мз}}}{100} = 388 \cdot \frac{15}{100} = 58{,}2 \text{ кг.}$$

По п. 18 количество воды, поглощенное зернами крупного заполнителя:

$$\text{В}_{\text{кзпогл}} = k_{\text{кзпогл}} \cdot \text{В}_{\text{кзобщ}} = 0{,}8 \cdot 82{,}2 = 65{,}7 \text{ кг.}$$

По п. 19 количество воды, поглощенное зернами мелкого заполнителя:

$$\text{В}_{\text{мзпогл}} = k_{\text{мзпогл}} \cdot \text{В}_{\text{мзобщ}} = 0{,}65 \cdot 58{,}2 = 37{,}8 \text{ кг.}$$

По п. 20 истинное водоцементное отношение бетона:

$$k_{\text{з}} = 0{,}25 + 0{,}000875 \cdot \left(\rho_{\text{кз}} - 400\right) =$$

$$= 0{,}25 + 0{,}000875 \cdot \left(900 - 400\right) = 0{,}688.$$

$$k_{\delta} = 1 + 0{,}1 \cdot \left(\delta - \delta_0\right) = 1 + 0{,}1 \cdot \left(14{,}96 - 14{,}5\right) = 1{,}05.$$

$$\left(\frac{\text{В}}{\text{Ц}}\right)_{\text{ист}} = \frac{\alpha \cdot k_{\text{з}} \cdot k_{\delta} \cdot f_{\text{ц}}}{f_{\text{б}}} + \beta = \frac{0{,}248 \cdot 0{,}688 \cdot 1{,}05 \cdot 50}{32} + 0{,}092 = 0{,}371.$$

По п. 21 расход цемента:

$$Ц = \frac{V_т}{k_{вв} \cdot \left[\frac{1}{\rho_ц} + \left(\frac{В}{Ц} \right)_{ист} \cdot \frac{1}{\rho_в} \right]} = \frac{0,277}{1,02 \cdot \left[\frac{1}{3100} + 0,371 \cdot \frac{1}{1000} \right]} = 392 \text{ кг.}$$

По п. 22 расход воды:

$$В = \left(\frac{В}{Ц} \right)_{ист} \cdot Ц + В_{кзпогл} + В_{мзпогл} = 0,371 \cdot 392 + 65,7 + 37,8 = 249 \text{ кг.}$$

По п. 23 уточненный объем бетонной смеси:

$$V_{б1} = \frac{Ц}{\rho_ц} + \frac{МЗ'}{\rho_{мз}} + \frac{КЗ'}{\rho_{кз}} + \left(\frac{В}{Ц} \right)_{ист} \cdot \frac{Ц}{\rho_в} =$$

$$= \frac{392}{3100} + \frac{388}{1600} + \frac{432}{900} + 0,371 \cdot \frac{392}{1000} = 0,995 \text{ м}^3.$$

По п. 24 расход цемента:

$$Ц_1 = \frac{Ц}{V_{б1}} = \frac{392}{0,995} = 394 \text{ кг.}$$

По п. 25 расход мелкого заполнителя:

$$МЗ_1 = \frac{МЗ'}{V_{б1}} = \frac{388}{0,995} = 390 \text{ кг.}$$

По п. 26 расход крупного заполнителя:

$$КЗ_1 = \frac{КЗ'}{V_{б1}} = \frac{432}{0,995} = 435 \text{ кг.}$$

По п. 27 расход воды:

$$В_1 = \frac{В}{V_{б1}} = \frac{249}{0,995} = 250 \text{ кг.}$$

По п. 28 расчетная средняя плотность бетонной смеси:

$$\rho_{бсм} = Ц_1 + МЗ_1 + КЗ_1 + В = 394 + 390 + 435 + 250 = 1\,469 \text{ кг/м}^3.$$

По п. 29 расчетная средняя плотность бетона в высушенном состоянии:

$$\rho_б = 1,15 \cdot Ц_1 + МЗ_1 + КЗ_1 = 1,15 \cdot 394 + 390 + 435 = 1\,278 \text{ кг/м}^3.$$

4. ОСОБЕННОСТИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ СОСТАВА БЕТОНА С ХИМИЧЕСКИМИ ДОБАВКАМИ

4.1. Бетон с пластифицирующими добавками

Пластифицирующие добавки вводят в бетонную смесь для повышения ее подвижности. По эффективности добавки этого типа разделяют на четыре группы. Оценить ту или иную добавку достаточно просто. Предположим, на предприятие поступила широко рекламируемая добавка. Необходимо приготовить бетонную смесь стандартного состава: расход цемента 350 кг, доля песка в смеси заполнителей 0,4, расход воды, обеспечивающий подвижность 2–3 см (марка по удобоукладываемости П1). Затем в аналогичную смесь ввести требующую оценки добавки в разных количествах. И если при введении добавки марка бетонной смеси по удобоукладываемости увеличилась с П1 (без добавки) до П5, то имеем дело с пластификатором 1 группы эффективности. Если же с П1 до П4, то 2 группы, с П1 до П3 – 3 группы и с П1 до П2 – 4 группы. Но при этом надо иметь в виду очень важное условие – прочность бетона в проектном возрасте с исследуемой добавкой не должна быть меньше прочности бетона без добавки. И именно этим обусловлена необходимость варьирования дозировки. Таким образом, в результате простого эксперимента получают две характеристики – эффективность добавки и ее предельную дозировку, не вызывающую замедления процессов твердения.

Расчет состава бетона с пластифицирующими добавками целесообразен по двум направлениям. Необходимо спроектировать состав бетона без добавки, удовлетворяющий предъявляемым к нему требованиям. Затем рассчитать количество воды, которое можно сократить (в сравнении с составом бетона без добавки) при сохранении заданной удобоукладываемости бетонной смеси. Для выявления этого количества, к сожалению, в бетоноведении существуют лишь общие тенденции: пластифицирующий эффект определяется видом и количеством химической добавки, ее дозировкой (чем больше, тем выше эффект), расходом цемента (чем больше вяжущего, тем эффект выше), исходной удобоукладываемостью бетонной смеси (в более подвижных смесях пластифицирующий эффект выше), содержанием C_3A в цементе (с увеличением C_3A эффективность доба-

вок падает) и т. д. В литературе можно найти лишь отрывочные рекомендации, позволяющие инженеру-технологу произвести необходимые расчеты. Однако инженеру, работающему на производстве, необходимы не общие тенденции, а конкретные формулы, графики, таблицы. И на кафедре «Строительные материалы и технология строительства» такая формула (быть может, пока и не совсем совершенная) получена.

Снижение расхода воды (при использовании пластифицирующей добавки) позволяет (при сохранении расхода цемента) снизить водоцементное отношение, повысить прочность, морозостойкость, водонепроницаемость и коррозионную стойкость бетона, сократить длительность или температуру тепловой обработки бетона. И это первое направление использования пластифицирующих добавок.

С другой стороны, если сохранить неизменным (в сравнении с составом без добавки) водоцементное отношение, то при сокращении расхода воды можно экономить и расход цемента – это второе направление.

Рассмотрим соответствующие расчетные формулы.

Порядок выполнения расчетов

Расчеты выполняются в следующей последовательности:

1. Рассчитывают возможное сокращение расхода воды в бетоне с пластифицирующей добавкой при сохранении заданной удобоукладываемости бетонной смеси:

$$\Delta \mathrm{B} = k_{\mathrm{п}} \cdot \sqrt{\frac{0{,}5 \cdot D}{\left(\frac{\mathrm{B}}{\mathrm{Ц}}\right)_{\mathrm{б}}}} \cdot V_{\mathrm{т}}^{1{,}7} \cdot \left(1 - 0{,}0015 \cdot \mathrm{C_3A}^2\right),\ \%, \qquad (4.1)$$

где $k_{\mathrm{п}}$ – коэффициент пластификации, зависящий от группы эффективности (по СТБ 1112-98) пластифицирующей добавки и удобоукладываемости бетонной смеси;

D – дозировка пластифицирующей добавки по сухому веществу, % от массы цемента;

$\mathrm{C_3A}$ – содержание $\mathrm{C_3A}$ в цементе, %.

2. Коэффициент пластификации при осадке конуса (ОК в см) бетонной смеси равен:

$$k_{\text{п}} = k_{\text{эф}} + 2 \cdot \text{ОК}, \%, \tag{4.2}$$

а при жесткости (Ж в с) бетонной смеси:

$$k_{\text{п}} = k_{\text{эф}} - 0,5 \cdot \text{Ж}, \%. \tag{4.3}$$

В формулах (4.2) и (4.3) коэффициент эффективности пластифицирующей добавки ($k_{\text{эф}}$), например, для суперпластификатора С-3 равен 70.

3. Рассчитывают расход воды в бетонной смеси с пластифицирующей добавкой при сохранении заданной удобоукладываемости смеси:

$$\text{В}_{\text{д}} = \text{В} \cdot \left(1 - \frac{\Delta \text{В}}{100}\right), \text{ кг}. \tag{4.4}$$

4. **Если пластифицирующую добавку вводят** с целью повышения физико-механических характеристик бетона, то вначале пересчитывают водоцементное отношение бетонной смеси с добавкой при сохранении величины расхода цемента:

$$\left(\frac{\text{В}}{\text{Ц}}\right)_{\text{д}} = \frac{\text{В}_{\text{д}}}{\text{Ц}}, \text{ д. ед.} \tag{4.5}$$

5. Затем пересчитывают прочность бетона:

$$f_{\text{б}} = \frac{0,3 \cdot k_{\text{з}} \cdot f_{\text{ц}}}{\left(\frac{\text{В}}{\text{Ц}}\right)_{\text{д}} - 0,08}, \text{ МПа}. \tag{4.6}$$

6. По приведенной выше табл. 1.1 в зависимости от водоцементного отношения бетонной смеси с добавкой определяют морозостойкость и водонепроницаемость бетона с добавкой (при наличии требований по данным параметрам).

7. Далее увеличивают расход песка для компенсации уменьшения объема бетонной смеси из-за снижения расхода воды:

$$П_д = П + \left(В - В_д\right) \cdot \frac{\rho_п}{1000}, \text{ кг.} \quad (4.7)$$

8. Расход щебня не меняется.

9. Плотность бетонной смеси равна:

$$\rho_{бсм} = Ц + П_д + Щ + В_д, \text{ кг/м}^3. \quad (4.8)$$

10. **Если пластифицирующую добавку вводят** с целью экономии расхода цемента при сохранении водоцементного отношения, удобоукладываемости бетонной смеси и физико-механических характеристик бетона, то пересчитывают расход цемента:

$$Ц_д = \frac{В_д}{\left(\frac{В}{Ц}\right)_б}, \text{ кг.} \quad (4.9)$$

11. Затем увеличивают расход песка для компенсации уменьшения объема бетонной смеси из-за снижения расходов воды и цемента:

$$П_д = П + \left(В - В_д\right) \cdot \frac{\rho_п}{1000} + \left(Ц - Ц_д\right) \cdot \frac{\rho_п}{\rho_ц}, \text{ кг.} \quad (4.10)$$

12. Пересчитывают расчетную плотность бетонной смеси с пластифицирующей добавкой:

$$\rho_{бсм} = Ц_д + П_д + Щ + В_д, \text{ кг/м}^3. \quad (4.11)$$

Пример

Необходимо откорректировать состав бетона, спроектированный по любому методу. Предположим, класс бетона по прочности С20/25, марка бетонной смеси по удобоукладываемости П2. Расход цемен-

та, песка, щебня и воды составил соответственно 368, 626, 1 180 и 201 кг. Объем цементного теста 0,320 м^3. Вводится добавка суперпластификатора С-3 в количестве 0,6 % от массы цемента по сухому веществу. Содержание C_3A в цементе составляет 5 %.

По п. 1 возможное сокращение расхода воды:

$$\Delta В = 84 \cdot \sqrt{\frac{0,5 \cdot D}{\left(\frac{В}{Ц}\right)_б}} \cdot V_т^{1,7} \cdot \left(1 - 0,0015 \cdot C_3A^2\right) =$$

$$= k_п \cdot \sqrt{\frac{0,5 \cdot 6}{0,548}} \cdot 0,320^{1,7} \cdot \left(1 - 0,0015 \cdot 5^2\right) = 8,6 \text{ %}.$$

По п. 2 коэффициент пластификации при осадке конуса бетонной смеси 7 см:

$$k_п = k_{эф} + 2 \cdot ОК = 70 + 2 \cdot 7 = 84 \text{ %}.$$

По п. 3 расход воды в бетонной смеси с пластифицирующей добавкой при сохранении заданной удобоукладываемости смеси:

$$В_д = В \cdot \left(1 - \frac{\Delta В}{100}\right) = 201 \cdot \left(1 - \frac{8,6}{100}\right) = 184 \text{ кг}.$$

По п. 4 водоцементное отношение бетонной смеси с добавкой:

$$\left(\frac{В}{Ц}\right)_д = \frac{В_д}{Ц} = \frac{184}{368} = 0,501, \text{ д. ед.}$$

По п. 5 прочность бетона:

$$f_б = \frac{0,3 \cdot k_з \cdot f_ц}{\left(\frac{В}{Ц}\right)_д - 0,08} = \frac{0,3 \cdot 1,0 \cdot 50}{0,501 - 0,08} = 35,6 \text{ МПа}.$$

По п. 7 расход песка:

$$П_д = П + (В - В_д) \cdot \frac{\rho_п}{1000} = 626 + (201 - 184) \cdot \frac{2\,630}{1000} = 672 \text{ кг.}$$

По п. 9 плотность бетонной смеси:

$$\rho_{бсм} = Ц + П_д + Щ + В_д = 368 + 672 + 1180 + 184 = 2\,403 \text{ кг/м}^3.$$

По п. 10 расход цемента:

$$Ц_д = \frac{В_д}{\left(\frac{В}{Ц}\right)_б} = \frac{184}{0{,}548} = 336 \text{ кг.}$$

По п. 11 расход песка:

$$П_д = П + (В - В_д) \cdot \frac{\rho_п}{1000} + (Ц - Ц_д) \cdot \frac{\rho_п}{\rho_ц} =$$

$$= 626 + (201 - 184) \cdot \frac{2\,630}{1000} + (368 - 336) \cdot \frac{2\,630}{3\,100} = 699 \text{ кг.}$$

По п. 12 плотность бетонной смеси:

$$\rho_{бсм} = Ц_д + П_д + Щ + В_д = 336 + 699 + 1180 + 184 = 2\,399 \text{ кг/м}^3.$$

4.2. Бетон с ускорителями твердения

Добавки ускорители твердения бетона в основном применяют для реализации двух направлений в технологии бетона:

а) корректировка режима тепловлажностной обработки бетонных и железобетонных изделий. Введение добавок ускорителей позволяет интенсифицировать процесс нарастания прочности бетона на начальной стадии твердения. Это позволяет инженеру технологу

либо сократить длительность, либо уменьшить температуру изотермического прогрева изделий (а иногда и вообще отказаться). В том и другом случае вероятна экономия расхода теплоносителя. При длительном же режиме тепловой обработки бетона эффект ускорения твердения нивелируется: прочность бетона без добавки и с добавкой становятся близки. Для выявления эффекта необходимо проведение экспериментов, поскольку надежные аналитические зависимости для расчетов процесса твердения бетона с добавками ускорителей пока отсутствуют. Поэтому технологи вынуждены в данном случае не проектировать, а последовательно подбирать составы бетона, варьируя не только расходы компонентов, включая и добавки ускорители твердения, но и режимы тепловой обработки изделий;

б) получение заданной прочности бетона естественного твердения в необходимые сроки. Для реализации этого направления наукой о бетоне накоплены экспериментальные данные, позволяющие производить инженерные расчеты. Метод проектирования состава бетона (без добавки ускорителя твердения и с добавкой) представлен ниже.

Порядок выполнения расчетов

Перед технологом поставлена задача: рассчитать состав бетона, твердеющего в естественных условиях, обеспечивающий заданную относительную прочность бетона, то есть отношение прочности бетона в заданный срок твердения к прочности бетона в возрасте 28 суток твердения в нормальных условиях ($f_{\text{отн}}$ в д. ед.), получаемую в указанный срок твердения (τ). Эффективность вводимой добавки характеризуется коэффициентом $k_{\text{ут}}$, равным отношению прочности бетона с добавкой к прочности без добавки (табл. 4.2).

Расчеты состава бетона без добавок

Расчеты выполняются в следующей последовательности:

1. По известной формуле рассчитывают водоцементное отношение, обеспечивающее прочность бетона в проектном возрасте:

$$\left(\frac{\text{В}}{\text{Ц}}\right)_{\text{б}} = \frac{0{,}3 \cdot k_{\text{з}} \cdot f_{\text{ц}}}{f_{\text{б}}} + 0{,}08. \qquad (4.12)$$

2. По табл. 4.1 для заданного срока твердения (τ) и рассчитанной величины $(В/Ц)_б$ находят табличное значение относительной прочности бетона ($f_{отнт}$), которую можно получить интерполированием по водоцементному отношению и возрасту.

Таблица 4.1

Изменение относительной прочности бетона ($f_{отнт}$)

В/Ц	Относительная прочность бетона, доли ед., в возрасте, сутки					
	1	3	7	28	90	360
0,3	0,44	0,59	0,73	1,00	1,08	1,29
0,4	0,24	0,48	0,70	1,00	1,15	1,38
0,5	0,17	0,43	0,66	1,00	1,19	1,47
0,6	0,11	0,37	0,64	1,00	1,21	1,55
0,7	0,08	0,33	0,63	1,00	1,35	1,67

3. Если она больше или равна заданной ($f_{отн}$):

$$f_{отнт} \geq f_{отн}, \tag{4.13}$$

то рассчитывают состав бетона по известным методикам.

4. Если же наоборот:

$$f_{отнт} < f_{отн}, \tag{4.14}$$

то необходимо интуитивно в разумных пределах корректировать водоцементное отношение и последовательно находить требуемое решение.

5. Рассчитывают прочность бетона в МПа, которую необходимо получить в указанный срок твердения ($f_τ$):

$$f_τ = f_{отн} \cdot f_б, \text{ МПа}. \tag{4.15}$$

При этом прочность в проектном возрасте должна быть не меньше рассчитанной по выражению (4.1).

6. Далее интуитивно изменяют (уменьшают, а при необходимости увеличивают с соответствующим знаком) водоцементное отношение на $\Delta(В/Ц)_б$.

7. Затем пересчитывают прочность бетона в проектном возрасте (28 суток):

$$f_{28} = \frac{0,3 \cdot k_з \cdot f_ц}{\left(\frac{В}{Ц}\right)_б + \Delta\left(\frac{В}{Ц}\right)_б - 0,08}, \text{ МПа.} \qquad (4.16)$$

8. Для водоцементного отношения $(В/Ц)_б + \Delta(В/Ц)_б$ находят относительную прочность ($f_{отнт}$) и рассчитывают прочность бетона в указанный срок твердения:

$$f_{бτ} = f_{отнт} \cdot f_{28}, \text{ МПа.} \qquad (4.17)$$

9. Сопоставляют полученное значение прочности ($f_{Бτ}$) с заданной в указанный срок ($f_τ$). Она должна быть в пределах ±0,5 МПа от ($f_τ$) (пределы могут быть заданы технологом для конкретных задач):

$$f_{бτ} = f_τ \pm 0,5 \text{ МПа.} \qquad (4.18)$$

Если условие выполняется, то рассчитывают состав бетона по известным методикам.

10. Если $f_{бτ} < f_τ - 0,5$, то необходимо уменьшить $\Delta(В/Ц)_б$ и перейти к пункту 8.

11. Если $f_{бτ} > f_τ + 0,5$, то необходимо увеличить $\Delta(В/Ц)_б$ и перейти к пункту 8.

Изменение водоцементного отношения (согласно п. 10 и 11) прекращают, пока не будет выполняться условие, указанное в п. 9. Затем рассчитывают состав бетона.

Расчеты состава бетона с добавкой ускорителя твердения

Дополнительно к корректировке водоцементного отношения по п. 7–11 необходимо учитывать и эффективность добавки, которая, в свою очередь, зависит как от вида добавки, так и водоцементного отношения.

Рассчитывают водоцементное отношение, учитывая, что в возрасте 28 суток прочность бетона с добавкой ускорителя твердения несколько больше, чем без добавки:

$$\left(\frac{\text{В}}{\text{Ц}}\right)_{\text{б}} = \frac{0{,}3 \cdot k_{\text{з}} \cdot k_{\text{ут}} \cdot f_{\text{ц}}}{f_{\text{б}}} + 0{,}08, \qquad (4.19)$$

где $k_{\text{ут}}$ – коэффициент эффективности действия используемой добавки ускорителей твердения, назначаемый по табл. 4.2 для 28 суток твердения для водоцементного отношения, рассчитанного по выражению (4.1).

Таблица 4.2

Коэффициенты эффективности действия добавок-ускорителей твердения бетона ($k_{\text{ут}}$)

Вид добавки	В/Ц	Относительная прочность бетона, доли ед., в возрасте, сутки		
		1	3	28
1	2	3	4	5
Хлорид кальция (ХК)	0,3	2,00	1,90	1,20
	0,4	1,75	1,72	1,15
	0,5	1,60	1,50	1,11
	0,6	1,50	1,40	1,10
Сульфат натрия (СН)	0,3	1,60	1,55	1,10
	0,4	1,45	1,42	1,07
	0,5	1,35	1,30	1,06
	0,6	1,30	1,20	1,05
Нитрит-нитрат-хлорид кальция (ННХК)	0,3	1,60	1,50	1,20
	0,4	1,45	1,45	1,15
	0,5	1,35	1,30	1,11
	0,6	1,30	1,20	1,10
Нитрит-нитрат кальция (ННК)	0,3	1,40	1,35	1,10
	0,4	1,30	1,25	1,07
	0,5	1,25	1,25	1,06
	0,6	1,20	1,15	1,05

Окончание табл. 4.2

1	2	3	4	5
Полиметаллический водный концентрат (ПВК)	0,3	1,80	1,40	1,10
	0,4	1,60	1,30	1,07
	0,5	1,45	1,25	1,06
	0,6	1,40	120	1,05

Примечание. За 1 принята прочность бетона без добавки в аналогичном возрасте.

12. По табл. 4.1 для заданного срока твердения (τ) и рассчитанной по п. 2 величины $\Delta(В/Ц)_б$ находят табличное значение относительной прочности бетона ($f_{отнт}$), а по табл. 4.2 определяют коэффициент эффективности действия добавки ($k_{ут}$).

13. Рассчитывают получаемую относительную прочность бетона с добавкой ($f_{отну}$):

$$f_{отну} = f_{отн} \cdot k_{ут}, \text{ МПа.} \tag{4.20}$$

14. Если она больше или равна заданной ($f_{отн}$):

$$f_{отну} \geq f_{отн}, \tag{4.21}$$

то рассчитывают состав бетона по известным методикам.

15. Если же наоборот:

$$f_{отну} < f_{отн}, \tag{4.22}$$

то необходимо последовательно интуитивно в разумных пределах корректировать водоцементное отношение и последовательно находить требуемое решение.

16. Аналогично п. 6 рассчитывают прочность бетона в МПа, которую необходимо получить в указанный срок твердения ($f_τ$):

$$f_τ = f_{отн} \cdot f_б, \text{ МПа.} \tag{4.23}$$

При этом прочность в проектном возрасте должна быть не меньше рассчитанной по п. 8. Дальнейшие расчеты аналогичны расчетам для бетона без добавки ускорителя твердения, но добавляется коэффициент, получаемый из табл. 4.2.

17. Далее интуитивно изменяют (уменьшают, а при необходимости увеличивают с соответствующим знаком) водоцементное отношение на $\Delta(\text{В/Ц})_{\text{б}}$.

18. Затем пересчитывают прочность бетона в проектном возрасте (28 суток):

$$f_{28} = \frac{0{,}3 \cdot k_{\text{з}} \cdot k_{\text{ут}} \cdot f_{\text{ц}}}{\left(\frac{\text{В}}{\text{Ц}}\right)_{\text{б}} + \Delta\left(\frac{\text{В}}{\text{Ц}}\right)_{\text{б}} - 0{,}08}, \text{ МПа.} \qquad (4.24)$$

19. Для водоцементного отношения $(\text{В/Ц})_{\text{б}} + \Delta(\text{В/Ц})_{\text{б}}$ по табл. 4.1 находят относительную прочность ($f_{\text{отнт}}$), а по табл. 4.2 коэффициент эффективности действия добавки ($k_{\text{ут}}$) и рассчитывают прочность в указанный срок твердения:

$$f_{\text{б}\tau} = f_{\text{отнт}} \cdot k_{\text{ут}} \cdot f_{28}, \text{ МПа.} \qquad (4.25)$$

20. Сопоставляют полученное значение прочности ($f_{\text{б}\tau}$) с заданной в указанный срок (f_{τ}). Она должна быть в пределах ±0,5 МПа от (f_{τ}):

$$f_{\text{б}\tau} = f_{\tau} \pm 0{,}5 \text{ МПа.} \qquad (4.26)$$

Если условие выполняется, то рассчитывают состав бетона по известным методикам.

21. Если $f_{\text{б}\tau} < f_{\tau} - 0{,}5$, то необходимо уменьшить $\Delta(\text{В/Ц})_{\text{б}}$ и перейти к пункту 19.

22. Если $f_{\text{б}\tau} > f_{\tau} + 0{,}5$, то необходимо увеличить $\Delta(\text{В/Ц})_{\text{б}}$ и перейти к пункту 19.

И приращения прекращаются, пока не будет выполняться условие, указанное в п. 20. Затем рассчитывают состав бетона. Расход добавки ускорителя твердения бетона назначают в зависимости от

вида добавки и цемента, а также рассчитанного водоцементного отношения согласно данным табл. 4.3. Уточненный расход получают после проведения экспериментов.

Таблица 4.3

Ориентировочное количество вводимых добавок ускорителей твердения бетона

Вид цемента	Водоцементное отношение	Количество добавок ускорителей твердения в расчете на сухое вещество в процентах от массы цемента		
		СН, $НН_1$, ХК, ПВК	НК, ННХК	ННК
Портландцемент, быстротвердеющий, сульфатостойкий портландцемент	0,35–0,55 0,55–0,75	1–2 0,5–1,0	1,5–2,5 1–2	2–3 2,0–2,5
Шлакопортландцемент, пуццолановый пластифицированный и гидрофобный портландцемент	0,35–0,55 0,55–75	1,5–2,0 1,0–1,5	2–3 1,5–2,5	2,0–2,5 2–3

Пример

Требуется спроектировать состав бетона БСГТ П1 С20/25.

В возрасте 3 суток необходимо получить относительную прочность бетона 0,7 (70 %) от проектной. Добавка ускорителя твердения – сульфат натрия СН. Цемент: марка М500, плотность 3 100 кг/м^3.

Бетон без добавок

$$f_б = \frac{25}{0,78} = 32,1 \text{ МПа}.$$

По п. 1:

$$\left(\frac{В}{Ц}\right)_б = \frac{0,3 \cdot 1 \cdot 50}{32,1} + 0,08 = 0,55.$$

По табл. 4.1 для заданного срока твердения (3 суток) и рассчитанной величины $(В/Ц)_б = 0,55$ находят $f_{отнт}$, равную ориентировочно 0,4.

По п. 3:

$$f_{отнт} = 0,4 < f_{отн} = 0,7,$$

поэтому производят последовательную подгонку.

По п. 4 прочность бетона в МПа, которую необходимо получить в возрасте 3 суток, равна:

$$f_{\tau} = 0,7 \cdot 32,1 = 22,5 \text{ МПа}.$$

Эту прочность бетона надо обеспечить в заданный срок твердения.

Интуитивно уменьшают водоцементное отношение на 0,05:

$$\Delta\left(\frac{В}{Ц}\right)_б = -0,05.$$

Пересчитывают по п. 7 прочность бетона в проектном возрасте (28 суток):

$$f_{28} = \frac{0,3 \cdot 1 \cdot 50}{0,55 - 0,05 - 0,08} = 35,7 \text{ МПа}.$$

По табл. 4.1 для водоцементного отношения 0,55 – 0,05 = 0,50 находят $f_{отнт}$ равным 0,43.

По п. 6 прочность в 3 суток равна:

$$f_{бт} = 0,43 \cdot 35,7 = 15,4 \text{ МПа}.$$

Сопоставляют полученное значение прочности ($f_{Бт}$) с заданной в указанный срок (f_{τ}). Условие (п. 5) не выполняется – расчетная прочность меньше заданной:

$$f_{бт} = 15,4 < f_{\tau} = 22,5 \pm 0,5 \text{ МПа}.$$

Уменьшают исходное водоцементное отношение на 0,2.

Пересчитывают по п. 7 прочность бетона в проектном возрасте (28 суток):

$$f_{28} = \frac{0,3 \cdot 1 \cdot 50}{0,55 - 0,2 - 0,08} = 55,6 \text{ МПа.}$$

По табл. 4.1 для водоцементного отношения 0,55 – 0,2 = 0,35 находят $f_{\text{отнт}}$ равным 0,54.

По п. 5 прочность в 3 суток равна:

$$f_{\text{бт}} = 0,54 \cdot 55,6 = 30,0 \text{ МПа.}$$

Условие (п. 7) опять не выполняется – расчетная прочность больше заданной:

$$f_{\text{бт}} = 30,0 > f_{\tau} = 22,5 \pm 0,5 \text{ МПа.}$$

Уменьшают исходное водоцементное отношение на 0,15.

Пересчитывают по п. 5 прочность бетона в проектном возрасте (28 суток):

$$f_{28} = \frac{0,3 \cdot 1 \cdot 50}{0,55 - 0,15 - 0,08} = 46,9 \text{ МПа.}$$

По табл. 4.1 для водоцементного отношения 0,55 – 0,15 = 0,4 находят $f_{\text{отнт}}$ равным 0,48.

По п. 6 прочность в 3 суток равна:

$$f_{\text{бт}} = 0,48 \cdot 46,9 = 22,5 \text{ МПа.}$$

Условие (п. 7) выполняется:

$$f_{\text{Бт}} = 22,5 = f_{\tau} = 22,5 \pm 0,5 \text{ МПа.}$$

Рассчитывают состав бетона упрощенным методом.
Объем цементного теста:

$$k_{\text{ОК}} = 0{,}17 \cdot 3^{0{,}1} = 0{,}190.$$

$$V_{\text{Т}} = \frac{0{,}190}{\sqrt[3]{(0{,}40)^2}} + 0{,}07 \cdot (0{,}40)^3 = 0{,}354 \text{ м}^3.$$

Расход цемента:

$$\text{Ц} = \frac{0{,}354}{\frac{1}{3\,100} + \frac{0{,}40}{1000}} = 490 \text{ кг}.$$

Расход воды:

$$\text{В} = 490 \cdot 0{,}40 = 196 \text{ кг}.$$

Доля песка в смеси заполнителей:

$$r = 40 - 80 \cdot (0{,}354 - 0{,}2) + 1{,}4 \cdot \sqrt[3]{(3-1)^2} = 34{,}9 \text{ \%}.$$

Расход мелкого заполнителя:

$$\text{П} = \frac{1 - 0{,}354}{\frac{1}{2\,630} \cdot \frac{100}{34{,}9}} = 593 \text{ кг}.$$

Расход крупного заполнителя:

$$\text{Щ} = 593 \cdot \frac{2\,670}{2\,630} \cdot \left(\frac{100}{34{,}9} - 1 \right) = 1123 \text{ кг}.$$

Расчетная плотность бетонной смеси составляет:

$$\rho_{\text{бсм}} = 490 + 593 + 1123 + 196 = 2\,402 \text{ кг/м}^3.$$

Бетон с добавкой ускорителя твердения

По п. 1 водоцементное отношение равно 0,55.

По табл. 4.2 при $(В/Ц)_б = 0,55$ в 28 суток $k_{ут} = 1,055$.

По п. 2:

$$\left(\frac{В}{Ц}\right)_б = \frac{0,3 \cdot 1 \cdot 1,055 \cdot 50}{32,1} + 0,08 = 0,57.$$

По табл. 4.1 для заданного срока твердения (3 суток) и рассчитанной величины $(В/Ц)_б = 0,57$ находят $f_{отнт}$, равную ориентировочно 0,39, а по табл. 4.2 находим $k_{ут} = 1,23$.

По п. 9:

$$f_{отну} = 0,40 \cdot 1,25 = 0,48.$$

По п. 10:

$$f_{отну} = 0,48 < f_{отн} = 0,7,$$

поэтому производят последовательную подгонку.

По п. 12 прочность бетона в МПа, которую необходимо получить в возрасте 3 суток, равна:

$$f_τ = 0,7 \cdot 32,1 = 22,5 \text{ МПа}.$$

Уменьшают водоцементное отношение на 0,05:

$$\Delta\left(\frac{В}{Ц}\right)_б = -0,05.$$

Пересчитывают по п. 13 прочность бетона в проектном возрасте (28 суток):

$$f_{28} = \frac{0,3 \cdot 1 \cdot 1,055 \cdot 50}{0,57 - 0,05 - 0,08} = 36,0 \text{ МПа}.$$

По табл. 4.1 для водоцементного отношения 0,57 – 0,05 = 0,52 находят $f_{отнт}$ равным 0,42, по табл. 4.2 находим $k_{ут}$ = 1,28.

По п. 14 прочность в 3 суток равна:

$$f_{б\tau} = 0,43 \cdot 1,30 \cdot 35,7 = 19,3 \text{ МПа}.$$

Сопоставляют полученное значение прочности ($f_{Б\tau}$) с заданной в указанный срок (f_{τ}). Условие (п. 15) не выполняется – расчетная прочность меньше заданной:

$$f_{Б\tau} = 19,3 < f_{\tau} = 22,5 \pm 0,5 \text{ МПа}.$$

Уменьшают исходное водоцементное отношение на 0,10.

Пересчитывают по п. 13 прочность бетона в проектном возрасте (28 суток):

$$f_{28} = \frac{0,3 \cdot 1 \cdot 1,055 \cdot 50}{0,55 - 0,15 - 0,08} = 40,6 \text{ МПа}.$$

По табл. 4.1 для водоцементного отношения 0,57 – 0,10 = 0,47 находят $f_{отнт}$ равным 0,45, по табл. 4.2 находят $k_{ут}$ = 1,35.

По п. 14 прочность в 3 суток равна:

$$f_{б\tau} = 0,45 \cdot 1,35 \cdot 40,6 = 24,7 \text{ МПа}.$$

Условие (п. 21) опять не выполняется – расчетная прочность больше заданной:

$$f_{б\tau} = 24,7 > f_{\tau} = 22,5 \pm 0,5 \text{ МПа}.$$

Уменьшают исходное водоцементное отношение на 0,09.

Пересчитывают по п. 6 прочность бетона в проектном возрасте (28 суток):

$$f_{28} = \frac{0,3 \cdot 1 \cdot 1,055 \cdot 50}{0,55 - 0,09 - 0,08} = 39,6 \text{ МПа}.$$

По табл. 4.1 для водоцементного отношения 0,55 – 0,08 = 0,48 находят $f_{отнт}$ равным 0,44, по табл. 4.2 находят $k_{ут} = 1,32$.

По п. 14 прочность в 3 суток равна:

$$f_{б\tau} = 0,44 \cdot 1,32 \cdot 39,6 = 23,0 \text{ МПа}.$$

Условие (п. 21) выполняется:

$$f_{б\tau} = 23,0 = f_{\tau} = 22,5 \pm 0,5 \text{ МПа}.$$

Рассчитывают состав бетона упрощенным методом:

$$k_{ОК} = 0,17 \cdot 3^{0,1} = 0,190.$$

Объем цементного теста:

$$V_{Т} = \frac{0,190}{\sqrt[3]{(0,48)^2}} + 0,07 \cdot (0,48)^3 = 0,317 \text{ м}^3.$$

Расход цемента:

$$Ц = \frac{0,317}{\frac{1}{3100} + \frac{0,48}{1000}} = 395 \text{ кг}.$$

Расход воды:

$$В = 395 \cdot 0,48 = 190 \text{ кг}.$$

Доля песка в смеси заполнителей:

$$r = 40 - 80 \cdot (0,317 - 0,2) + 1,4 \cdot \sqrt[3]{(3-1)^2} = 32,8 \text{ \%}.$$

Расход мелкого заполнителя:

$$П = \frac{1 - 0,317}{\frac{1}{2\,630} \cdot \frac{100}{32,8}} = 590 \text{ кг}.$$

Расход крупного заполнителя:

$$Щ = 590 \cdot \frac{2\,670}{2\,630} \cdot \left(\frac{100}{32{,}8} - 1 \right) = 1\,224 \text{ кг}.$$

Расчетная плотность бетонной смеси составляет:

$$\rho_{бсм} = 395 + 590 + 1\,224 + 190 = 2\,399 \text{ кг/м}^3.$$

Расход добавки СН согласно табл. 4.3 можно принять равным 1,2 % или 4,7 кг.

Задание выполнено в обоих случаях, но требуемая прочность бетона получена при расходе цемента 490 и 395 кг в бетоне без добавки ускорителя твердения и с добавкой соответственно.

4.3. Бетон с воздухововлекающими добавками

Введение в бетонную смесь воздухововлекающих добавок позволяет создать в затвердевшем бетоне систему замкнутых и равномерно распределенных по всему объему мельчайших воздушных пузырьков. И этим обусловлена возможность повышения морозостойкости в 2 и более раз (СТБ 1112-98 «Добавки для бетонов. Общие технические условия»). Одновременно при введении в бетонную смесь таких добавок несколько повышается ее удобоукладываемость, что, к сожалению, трудно учесть расчетом. Но надо иметь в виду, что увеличение содержания воздуха в бетонной смеси влечет за собой и существенное падение прочности затвердевшего бетона (до 25 % согласно СТБ 1112-98 «Добавки для бетонов. Общие технические условия»). Это обусловлено аналогией изменения содержания воздуха и расхода воды, а, соответственно, и водоцементного отношения. Учитывая также и то, что практически невозможно на стадии проектирования состава бетона надежно рассчитывать объем воздухововлечения, методика расчета расходов компонентов смеси несколько приближенна. Вначале рассчитывают либо определяют объем вовлеченного воздуха. Затем устанавливают прочность бетона с добавкой. Если снижение прочности бетона с добавкой в сравнении с бетоном без добавки инженера-технолога удовлет-

воряет, то корректируют расходы мелкого и крупного заполнителей, объемы которых в соответствии с долей песка в смеси заполнителей уменьшаются на объем вовлеченного воздуха. Расходы цемента и воды сохраняют такими же, как и в бетоне без добавки. Но если необходимо сохранить заданную прочность бетона в проектном возрасте, то следует вначале рассчитать водоцементное отношение, считая объем вовлеченного воздуха равноценным дополнительному объему воды, а затем в соответствии с известной последовательностью определить расходы компонентов смеси.

Последовательность расчетов

Расчеты выполняются в следующей последовательности:

1. Прочность бетона с воздухововлекающей добавкой равна:

$$f_{б} = \frac{0{,}3 \cdot k_{з} \cdot f_{ц}}{\left(\frac{В}{Ц}\right)_{б} - 0{,}08 + \left(10 \cdot \frac{V_{в}}{Ц}\right)}, \text{ МПа.} \qquad (4.27)$$

где $V_{в}$ – объем вовлеченного воздуха, %.

2. Расход мелкого заполнителя ($П_{д}$) равен:

$$П_{д} = П - \frac{V_{в}}{100} \cdot \frac{r}{1000} \rho_{п}, \text{ кг.} \qquad (4.28)$$

3. Расход крупного заполнителя ($Щ_{д}$) равен:

$$Щ_{д} = Щ - \frac{V_{в}}{100} \cdot \frac{r}{1000} \rho_{щ}, \text{ кг.} \qquad (4.29)$$

4. Средняя расчетная плотность бетонной смеси составляет:

$$\rho_{бсмд} = Ц + П_{д} + Щ_{д} + В, \text{ кг/м}^3. \qquad (4.30)$$

5. Если необходимо получить требуемую прочность бетона в проектном возрасте, то рассчитывают водоцементное отношение $(В/Ц)_{б}$:

$$\left(\frac{\text{В}}{\text{Ц}}\right)_{\text{б}} = \frac{0{,}3 \cdot k_{\text{з}} \cdot f_{\text{ц}}}{f_{\text{б}}} + 0{,}08 - \left(\frac{V_{\text{в}}}{\text{Ц}}\right), \text{ д. ед.,} \qquad (4.31)$$

а затем по описанной в разделе 1 последовательности определяют расходы цемента, воды, мелкого и крупного заполнителей.

Пример

Дополнительное требование к бетону: марка по морозостойкости *F*300.

Для данного примера морозостойкость равна:

$$F = 1\,250 - 2\,000 \cdot 0{,}548 = 154 \text{ цикла.}$$

С целью повышения морозостойкости бетона до проектной величины (увеличения в 2 раза) в бетонную смесь вводят воздухововлекающую добавку (например, СНВ) в количестве 0,025 % от массы цемента. При этом объем вовлеченного воздуха получен в количестве 5,1 %.

По п. 1 прочность бетона с добавкой:

$$f_{\text{б}} = \frac{0{,}3 \cdot 1{,}0 \cdot 50}{0{,}548 - 0{,}08 + \left(10 \cdot \dfrac{5{,}1}{368}\right)} = 24{,}7 \text{ МПа.}$$

Падение прочности бетона с добавкой в сравнении с прочностью без добавки (32,1 МПа) составляет 23 %. Это соответствует требованиям СТБ 1112-98 «Добавки для бетонов. Общие технические условия».

Расходы цемента, щебня и воды для бетона без добавки, равные 368, 1 180 и 201 кг соответственно, оставляют постоянными.

По п. 2 расход песка:

$$\text{П}_{\text{д}} = 626 - \frac{5{,}1}{100} \cdot \frac{35{,}0}{1000} \cdot 2\,630 = 579 \text{ кг.}$$

По п. 3 расход щебня:

$$Щ_д = 1180 - \frac{5,1}{100} \cdot \frac{35,0}{1000} \cdot 2\,670 = 1132 \text{ кг.}$$

По п. 4 средняя расчетная плотность бетонной смеси по (4.4) составляет:

$$\rho_{бсмд} = 368 + 579 + 1132 + 201 = 2\,280 \text{ кг/м}^3.$$

По п. 5 при необходимости сохранения проектной прочности бетона водоцементное отношение равно:

$$\left(\frac{В}{Ц}\right)_б = \frac{0,3 \cdot 1,0 \cdot 50}{32,1} + 0,08 - \left(\frac{5,1}{368}\right) = 0,533 \text{ д. ед.}$$

Дальнейшие расчеты производят по вышеописанной методике.

5. ОСОБЕННОСТИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ СОСТАВА БЕТОНА С УЧЕТОМ ДОЛГОВЕЧНОСТИ ЖЕЛЕЗОБЕТОНА

В настоящее время существует значительное число методов проектирования состава бетона, позволяющих с большей или меньшей точностью определять расходы вяжущего, мелкого и крупного заполнителей, а также воды, соотношение которых обеспечивает получение заданной удобоукладываемости бетонной смеси и прочностных характеристик бетона. Значительно малочисленней методы, позволяющие прогнозировать такие важные характеристики бетона, как водонепроницаемость и морозостойкость. Методы же проектирования состава бетона с элементами прогнозирования долговечности бетона и железобетона в сочетании с составом бетона крайне редки. Кроме того, современная технология бетона и железобетона предполагает использование разнообразных добавок (пластифицирующих, воздухововлекающих, ускорителей твердения, ингибиторов коррозии стали и др.), налагающих дополнительные трудности при проектировании составов бетона.

На овладение студентами в рамках дисциплины «Бетоноведение» современными методами проектирования состава бетона с заданными свойствами, в том числе и изменяющимися во времени, и направлено данное учебно-методическое пособие.

Для расчета состава бетона, к которому предъявляются требования по прочности на сжатие (иногда морозостойкости и водонепроницаемости), а к бетонной смеси – по удобоукладываемости, имеется достаточно большое количество методов. К ним можно отнести как простейшие, например, НИИЖБа и абсолютных объемов и др., так и сложные – методы профессоров И. Н. Ахвердова, Н. П. Блещика, В. Н. Сизова. Вместе с тем, методы расчета состава бетона железобетонных конструкций применительно к различным эксплуатационным условиям практически отсутствуют.

Ниже представлена методика расчета состава бетона для железобетона, подвергающегося воздействию углекислого газа и водных растворов, содержащих хлор-ионы. Фактически реализуется прогнозная модель долговечности железобетонных конструкций, определяемой началом активации стальной арматуры.

Расчеты осуществляются в следующей последовательности:

1. Исходя из проектных требований к бетону (марка бетонной смеси по удобоукладываемости, класс бетона по прочности на сжатие), а также основных свойств компонентов смеси рассчитывают его состав. При необходимости полученный состав корректируют, повышая плотность бетона, а, следовательно, снижая проницаемость, для чего вводят пластифицирующую добавку с целью снижения водоцементного отношения и повышения физико-механических характеристик бетона.

2. Задаются видом и количеством добавки добавки-ингибитора коррозии стали (если она применяется), толщиной защитного слоя бетона, а также требуемым сроком эксплуатации железобетонной конструкции, усредненной за весь период эксплуатации относительной влажностью воздуха, концентрацией углекислого газа и хлорионов на поверхности конструкции.

3. Производят расчеты и оценивают долговечность железобетона. При необходимости (если время начала активации стальной арматуры меньше требуемого срока эксплуатации конструкции) корректируют состав бетона, повышая плотность бетона, увеличивая дозировку добавки ингибитора коррозии стали либо используя более эффективную добавку.

5.1. Долговечность железобетонных конструкций, эксплуатирующихся в условиях воздействия углекислого газа и солей-хлоридов

Полученный по данным примерам состав: расходы цемента, песка, щебня и воды составили соответственно 368, 672, 1 180 и 184 кг. Водоцементное отношение равно 0,501.

Добавка вводилась с целью повышения физико-механических характеристик бетона, то есть бетона с более высокими защитными свойствами по отношению к стальной арматуре.

Объем цементного теста 0,320 м^3. Вводится добавка суперпластификатора С-3 в количестве 0,6 % от массы цемента по сухому веществу. Содержание C_3A в цементе составляет 5 %.

Эксплуатационные условия: время эксплуатации конструкции 40 лет; средняя относительная влажность воздуха 80 %; концентрация углекислого газа в помещении 0,03 % по объему; концентрация

хлор-ионов в растворе на поверхности конструкции 7 %; толщина защитного слоя бетона 20 мм. Для повышения защитных свойств бетона по отношению к стальной арматуре вводится добавка ингибитора коррозии стали нитрит-нитрат кальция (ННК) в количестве 0,8 % от массы цемента.

Ввиду сложности расчетов их последовательность производится параллельно с решением примера.

Последовательность расчетов

Расчеты выполняются в следующей последовательности:

1. Рассчитывают морозостойкость и водонепроницаемость бетона:

$$W = -15,7 \cdot \ln\left(\frac{\text{В}}{\text{Ц}}\right)_{\text{б}} - 4,83, \text{ атм}, \tag{5.1}$$

$$F = 1\,250 - 2\,000 \cdot \left(\frac{\text{В}}{\text{Ц}}\right)_{\text{б}}, \text{ циклы}. \tag{5.2}$$

где $(\text{В/Ц})_{\text{б}}$ – водоцементное отношение бетонной смеси; для данного примера здесь и далее с пластифицирующей добавкой $(\text{В/Ц})_{\text{д}}$.

$$W = -15,7 \cdot \ln(0,501) - 4,83 = 6,0 \text{ атм}.$$

$$F = 1\,250 - 2\,000 \cdot 0,501 = 248 \text{ циклов}..$$

Если величина W получилась менее 2, то водонепроницаемость принимается равной 2 атм.

2. Рассчитывают относительное водосодержание цементного теста в бетонной смеси:

$$X = \frac{\left(\frac{\text{В}}{\text{Ц}}\right)_{\text{б}}}{\text{НГ}/100}, \text{ д. ед.} \tag{5.3}$$

где НГ – нормальная густота цемента, %.

$$X = \frac{0,501}{26/100} = 1,93 \text{ д. ед.}$$

3. Рассчитывают предположительную степень гидратации цемента:

1) при $X \le 1,65$:

$$\alpha = \frac{60 \cdot X - \sqrt[3]{(1,65 \cdot X)^2} \cdot e^{1,65 \cdot X}}{100}, \text{ д. ед.;} \qquad (5.4)$$

2) при $X > 1,65$:

$$\alpha = \frac{70 + 5 \cdot (X - 1,65)}{100}, \text{ д. ед.;} \qquad (5.5)$$

$$\alpha = \frac{70 + 5 \cdot (1,926 - 1,65)}{100} = 0,714 \text{ д. ед.}$$

4. Рассчитывают пористость (по объему) бетона:

1) гелевую:

$$П_г = 0,59 \cdot \frac{Ц}{\rho_ц} \cdot \alpha \cdot 100, \text{ \%;} \qquad (5.6)$$

$$П_г = 0,59 \cdot \frac{368}{3100} \cdot 0,714 \cdot 100 = 5,0 \text{ \%;}$$

2) капиллярную:

$$П_к = Ц \cdot \left[\frac{\left(\frac{В}{Ц}\right)_б}{\rho_в} - \frac{1,1 \cdot \alpha}{\rho_ц} \right] \cdot 100, \text{ \%;} \qquad (5.7)$$

$$П_к = 368 \cdot \left[\frac{0,501}{1000} - \frac{1,1 \cdot 0,714}{3100} \right] \cdot 100 = 9,1 \text{ \%;}$$

3) общую:

$$П_о = П_г + П_к, \%; \quad (5.8)$$

$$П_о = 5,0 + 9,1 = 14,1\ \%.$$

5. Рассчитывают (если не был ранее определен) объем цементного теста в бетонной смеси:

$$V_т = Ц \cdot \left(\frac{1}{\rho_ц} + \frac{\left(\frac{В}{Ц}\right)_б}{\rho_в} \right), \text{ м}^3. \quad (5.9)$$

$$V_т = 368 \cdot \left(\frac{1}{3100} + \frac{0,501}{1000} \right) = 0,303 \text{ м}^3.$$

6. Рассчитывают эффективный коэффициент диффузии углекислого газа в бетоне:

$$D_{CO_2} = \frac{25 \cdot 10^{-7} \cdot П_к^2}{\sqrt[3]{V_т^2}}, \text{ см}^2/\text{с}; \quad (5.10)$$

$$D_{CO_2} = \frac{25 \cdot 10^{-7} \cdot 9,1^2}{\sqrt[3]{0,303}} = 4,59 \cdot 10^{-4} \text{ см}^2/\text{с}.$$

7. Рассчитывают реакционную емкость бетона:

$$m_0 = 0,205 \cdot \alpha \cdot Ц \cdot \left(1 - \frac{D_м}{100}\right), \text{ см}^3, \quad (5.11)$$

где $D_м$ – содержание минеральной добавки, % от массы цемента.

$$m_0 = 0,205 \cdot 0,714 \cdot 368 \cdot \left(1 - \frac{0}{100}\right) = 53,8 \text{ см}^3.$$

8. Рассчитывают глубину карбонизации бетона:

$$x_{\text{к}} = 10 \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot C_{CO_2} \cdot \tau \cdot D_{CO_2}}{m_0}}, \text{ мм}, \qquad (5.12)$$

где C_{CO_2} – концентрация углекислого газа в воздухе, доли единицы (например, для данного примера при объемной концентрации углекислого газа в воздухе 0,03 %: 0,03/100);

τ – длительность эксплуатации конструкции, с.

$$x_{\text{к}} = \sqrt{\frac{2 \cdot \frac{0,03}{100} \cdot 40 \cdot 365 \cdot 24 \cdot 60 \cdot 60 \cdot 4,59 \cdot 10^{-4}}{53,8}} = 25,4 \text{ мм}.$$

9. Делают вывод о вероятности коррозии:

Если глубина карбонизации ($x_{\text{к}}$) больше или равна толщине защитного слоя бетона ($x_{\text{тзс}}$)

$$x_{\text{к}} \geq x_{\text{тзс}}, \qquad (5.13)$$

то вероятна коррозия стальной арматуры.

Поскольку глубина карбонизации (25,4) больше толщины защитного слоя бетона (20 мм)

$$25,4 \geq 20,$$

то коррозия стальной арматуры по причине карбонизации бетона защитного слоя вероятна.

10. Рассчитывают влажность бетона по массе:

$$\omega_{\text{м}} = \frac{\Pi_{\text{г}} \cdot \left(0,01 \cdot \varphi\right)^{0,02 \cdot \Pi_{\text{г}}} \cdot e^{0,1 \cdot (0,01 \cdot \varphi)} + \Pi_{\text{к}} \cdot \left(0,01 \cdot \varphi\right)^5}{2,4}, \ \%; \quad (5.14)$$

$$\omega_{\text{м}} = \frac{5,0 \cdot \left(0,01 \cdot 80\right)^{0,02 \cdot 5,0} \cdot e^{0,1 \cdot (0,01 \cdot 80)} + 9,1 \cdot \left(0,01 \cdot 80\right)^5}{2,4} = 3,4 \ \%.$$

11. Рассчитывают эффективный коэффициент диффузии хлор-ионов в бетоне:

$$D_{\mathrm{Cl}} = \frac{0{,}00000001 \cdot \omega_{\text{м}}{}^{2{,}5}}{1 + 0{,}875 \cdot (W - 2)}, \text{ см}^2/\text{с}; \tag{5.15}$$

$$D_{\mathrm{Cl}} = \frac{0{,}00000001 \cdot 3{,}4^{2{,}5}}{1 + 0{,}875 \cdot (6 - 2)} = 4{,}87 \cdot 10^{-8} \text{ см}^2/\text{с}.$$

12. Рассчитывают интеграл вероятности:

$$z = \frac{x_{\mathrm{Cl}}}{2 \cdot \sqrt{D_{\mathrm{Cl}} \cdot \tau}}, \tag{5.16}$$

где x_{Cl} – глубина слоя бетона (например, толщина защитного слоя), на которой определяется содержание хлор-ионов, см,

τ – длительность эксплуатации конструкции, с.

$$T = \frac{1}{1 + 0{,}3275911 \cdot z}. \tag{5.17}$$

$$erf(z) = 1 - \exp(-z \cdot z) \cdot \left\langle \left\{ \left[(1{,}061405429 \cdot T - 1{,}453152027) \cdot T + \right. \right. \right. \\ \left. \left. \left. + 1{,}421413741 \right] \cdot T - 0{,}284496736 \right\} \cdot T + 0{,}254829592 \right\rangle \cdot T \tag{5.18}$$

$$z = \frac{\frac{20}{10}}{2 \cdot \sqrt{4{,}87 \cdot 10^{-8} \cdot 40 \cdot 365 \cdot 24 \cdot 60 \cdot 60}} = 0{,}128.$$

$$T = \frac{1}{1 + 0{,}3275911 \cdot 0{,}128} = 0{,}960.$$

$$erf\left(z\right)=1-\exp\left(-0,128\cdot 0,128\right)\times$$
$$\times\left\langle\left\{\left[(1,061405429\cdot 0,960-1,453152027)\cdot 0,960+\right.\right.\right.$$
$$\left.+1,421413741\right]\cdot 0,960-0,284496736\left.\right\}\cdot 0,960+$$
$$\left.+0,254829592\right\rangle\cdot 0,960=0,143$$

13. Рассчитывают концентрацию хлор-ионов в поровой жидкости бетона на глубине x_{Cl}:

$$C_{Clx}=C_0\cdot\left(1-erf\left(z\right)\right),\ \%, \tag{5.19}$$

где C_0 – концентрация хлор ионов в растворе на поверхности конструкции, %.

$$C_{Clx}=7\cdot\left(1-0,143\right)=6,0\ \%.$$

14. Рассчитывают массу хлор-ионов (кг) в 1 л поровой жидкости бетона:

$$m_{Cll}=\frac{C_{Clx}}{100-C_{Clx}},\ \text{кг/л}; \tag{5.20}$$

$$m_{Cll}=\frac{6,0}{100-6,0}=0,064\ \text{кг/л}.$$

15. Рассчитывают объем поровой жидкости в 1 м^3 бетона:

$$V_{пж}=\frac{\omega_м\cdot\rho_б}{100},\ \text{л}; \tag{5.21}$$

$$V_{пж}=\frac{3,4\cdot 2403}{100}=82,8\ \text{л}.$$

16. Рассчитывают массу хлор-ионов (кг) в поровой жидкости бетона:

$$m_{\text{Cl}} = m_{\text{Cl1}} \cdot V_{\text{пж}},\ \text{кг}; \tag{5.22}$$

$$m_{\text{Cl}} = 0,064 \cdot 82,8 = 5,28\ \text{кг}.$$

17. Рассчитывают содержание хлор-ионов в % от массы цемента:

$$Cl_x = \frac{m_{\text{Cl}}}{\text{Ц}} \cdot 100,\ \%. \tag{5.23}$$

$$\text{Cl}_x = \frac{5,28}{368} \cdot 100 = 1,44\ \%.$$

18. Рассчитывают критическое (вызывающее активацию стальной арматуры) содержание хлор-ионов в % от массы цемента:

$$\text{Cl}_{\text{кр}} = \sqrt[3]{\frac{4,39}{\text{П}_{\text{к}}}},\ \%; \tag{5.24}$$

$$\text{Cl}_{\text{кр}} = \sqrt[3]{\frac{4,39}{9,1}} = 0,78\ \%.$$

Для прикидочных расчетов критическое содержание хлор-ионов может быть принято равным 0,4 % от массы цемента.

19. Делают вывод о вероятности коррозии.

Если содержание хлор-ионов в приарматурной зоне бетона равно или превышает критическое значение

$$\text{Cl}_x \geq \text{Cl}_{\text{кр}}, \tag{5.25}$$

то вероятна коррозия стальной арматуры.

Поскольку содержание хлор-ионов (1,44 %) больше критического значения (0,78 % от массы цемента), то коррозия стальной арматуры вероятна.

20. В случае введения в бетон ингибитора коррозии стали выбирают его вид, назначают дозировку ($D_и$) в % от массы цемента, по табл. 5.1 определяют коэффициент эффективности действия ингибитора $k_{эф}$.

Таблица 5.1

Коэффициенты эффективности ингибиторов коррозии стальной арматуры железобетона

Ингибитор	$k_{эф}$	Ингибитор	$k_{эф}$
Нитрит натрия (НН)	0,40	Бихромат калия (БХК)	0,28
Нитрит-нитрат кальция (ННК)	0,20	Тринатрийфосфат (ТНФ)	0,35
Тетраборат натрия (ТБН)	0,30	ОХП	0,33
Бихромат натрия (БХН)	0,32	ПО-1	0,60

В данном примере использована добавка ингибитора ННК дозировкой 0,8 %. В соответствии с табл. 5.1 коэффициент эффективности можно принять равным 0,2.

21. Поскольку в процессе эксплуатации конструкции часть ингибитора «вымывается» из поровой жидкости, то, считая эффективный коэффициент диффузии ингибитора примерно равным рассчитанному выше эффективному коэффициенту диффузии хлор-ионов, рассчитывают конечное содержание добавки ингибитора в бетоне на той же глубине, что и при определении содержания хлор-ионов (x_{Cl}) в % от массы цемента:

$$C_{их} = D_и \cdot erf\left(z\right),\ \%; \tag{5.26}$$

$$C_{их} = 0,8 \cdot 0,143 = 0,11\ \%.$$

22. Рассчитывают критическую концентрацию хлор-ионов в бетоне с добавкой ингибитора в % от массы цемента:

$$Cl^{и}_{кр} = Cl_{кр} + k_{эф} \cdot C_{их},\ \%; \tag{5.27}$$

$$Cl^{и}_{кр} = 0,78 + 0,20 \cdot 0,11 = 0,81\ \%.$$

23. Делают вывод о вероятности коррозии.

Если содержание хлор-ионов в приарматурной зоне бетона (на глубине, соответствующей толщине защитного слоя) равно или превышает критическое значение ($Cl^{и}_{кр}$):

$$Cl_x \geq Cl^{и}_{кр}, \qquad (5.28)$$

то вероятна коррозия стальной арматуры.

Поскольку содержание хлор-ионов в приарматурной зоне бетона (1,44 %) больше критического значения (0,81 %), коррозия стальной арматуры вероятна. Необходимо либо увеличить дозировку добавки ингибитора коррозии стали, либо использовать более эффективную добавку, либо повысить плотность бетона.

5.2. Бетон с противоморозными добавками

Один из методов, обеспечивающих твердение бетона при отрицательных температурах, – введение в бетонную смесь противоморозных добавок. Их назначение – снизить температуру замерзания поровой жидкости бетона и тем самым обеспечить протекание гидратационных процессов. В сравнении с другими методами зимнего бетонирования преимуществом данного является простота. Для его реализации нет необходимости в создании, например, систем обогрева или иных приспособлений, предназначенных для сохранения положительной температуры бетона вплоть до набора им «критической прочности». Среди рекомендуемых противоморозных добавок есть и содержащие хлор-ионы, например, хлориды кальция и натрия. Эти добавки достаточно эффективны, дешевы, но могут при определенных условиях вызвать коррозию стальной арматуры. Существующие методики прогнозирования состояния стальной арматуры позволяют рассчитывать допускаемое количество хлорсодержащих добавок, не вызывающих коррозию стальной арматуры.

Последовательность расчетов

Вначале по приведенным выше методам рассчитывают состав бетона, обеспечивающий требуемый класс бетона по прочности на

сжатие и необходимую марку смеси по удобоукладываемости. При необходимости корректируют полученный состав, используя пластифицирующие добавки с целью повышения физико-механических характеристик или экономии цемента.

В зависимости от предполагаемой температуры твердения в соответствии с имеющимися рекомендациями, например ТКП 45-5.03-21-2006 (02250). «Бетонные работы при отрицательных температурах воздуха. Правила производства» выбирают вид и дозировку противоморозной добавки ($D^t_{\text{пм}}$ в % от массы цемента). Рассчитывают содержание (долю) хлор-ионов в выбранной противоморозной добавке (k_{Cl} в д. ед.).

Рассчитывают относительное водосодержание цементного теста в бетонной смеси, степень гидратации цемента, капиллярную пористость бетона, критическое количество хлор-ионов ($\text{Cl}_{\text{кр}}$ в % от массы цемента), не вызывающее коррозию стальной арматуры.

Далее рассчитывают допустимую дозировку противоморозной добавки ($D_{\text{пм}}$ в % от массы цемента), не вызывающую коррозию стальной арматуры:

$$D_{\text{пм}} = \frac{\text{Cl}_{\text{кр}}}{k_{\text{Cl}}},\ \%. \tag{5.29}$$

Ранее выбранная (исходя из предполагаемой температуры твердения) дозировка противоморозной добавки не должна превышать допустимую

$$D^t_{\text{пм}} \le D_{\text{пм}}. \tag{5.30}$$

Если для нейтрализации отрицательного действия хлор-ионов в бетонную смесь вводится и добавка ингибитора коррозии стали, то рассчитывать критическое количество хлор-ионов в бетоне с добавкой ингибитора ($\text{Cl}^{\text{и}}_{\text{кр}}$ в % от массы цемента) можно в зависимости от критического количества хлор-ионов в бетоне без добавки ингибитора ($\text{Cl}_{\text{кр}}$ в % от массы цемента), коэффициента эффектив-

ности добавки ингибитора ($k^{и}_{эф}$ в д. ед. по табл. 5.1) и дозировки добавки ингибитора ($D_{и}$ в % от массы цемента):

$$Cl^{и}_{кр} = Cl_{кр} + k^{и}_{эф} \cdot D_{и}, \ \%. \qquad (5.31)$$

Затем рассчитывают допустимую дозировку противоморозной добавки в комплексе с добавкой ингибитора коррозии стали:

$$D^{и}_{пм} = \frac{Cl^{и}_{кр}}{k_{Cl}}, \ \%. \qquad (5.32)$$

Пример

Требования к бетонной смеси, бетону, а также свойства компонентов смеси такие же, как в разделе 2. Пластифицирующая добавка не применяется. Расчетная температура твердения бетона от –6 до –10 °С. В качестве противоморозной добавки применяют хлористый кальций (ХК) в количестве ($D^{t}_{пм}$) 4 % от массы цемента. Применяемый ингибитор коррозии стали (одновременно и противоморозная добавка) – нитрит натрия (НН), дозировку которого необходимо рассчитать.

Атомные веса кальция и хлора 40 и 35,5. Содержание хлор-ионов составляет $k_{Cl} = \frac{35,5 \cdot 2}{40 + 35,5 \cdot 2} = 0,64$ от массы добавки $CaCl_2$.

Коэффициент эффективности ингибитора ($k^{и}_{эф}$) согласно табл. 5.1 равен 0,4 д. ед.

Расходы цемента, песка, щебня и воды равными соответственно 368, 626, 1 180 и 201 кг при водоцементном отношении 0,548.

Получаем в соответствии с примером: относительное водосодержание цементного теста равно 2,108, степень гидратации цемента 0,723, капиллярная пористость бетона 0,107 д. ед. (10,7 %), критическое содержание хлор-ионов ($Cl_{кр}$) равно 0,74 %.

Допустимая дозировка противоморозной добавки по (5.29):

$$D_{\text{пм}} = \frac{0,74}{0,64} = 1,16 \ \ \%.$$

Согласно (5.30) допустимая дозировка противоморозной добавки ниже назначенной:

$$D_{\text{пм}}^{t} = 4,0 > D_{\text{пм}} = 1,16.$$

То есть возможна коррозия стальной арматуры. Назначают дозировку добавки ингибитора ($D_{\text{и}}$) в количестве 4,5 % от массы цемента).

По (5.31) рассчитывают критическое количество хлор-ионов в бетоне с добавкой ингибитора коррозии стали (НН):

$$\text{Cl}_{\text{кр}}^{\text{и}} = 0,74 + 0,4 \cdot 4,5 = 2,54 \ \ \%.$$

Рассчитывают допустимую дозировку противоморозной добавки по (5,32):

$$D_{\text{пм}}^{\text{и}} = \frac{2,54}{0,64} = 3,98, \ \ \%.$$

Условие (5.30) выполняется. В противном случае необходимо интуитивно изменять дозировку ингибитора коррозии стали, последовательно добиваясь выполнения условия.

Полученные дозировки соответствуют рекомендациям, приведенным в табл. 12 ТКП 45-5.03-21-2006 (02250) «Бетонные работы при отрицательных температурах воздуха. Правила производства».

6. МНОГОФАКТОРНЫЙ МЕТОД ПРОЕКТИРОВАНИЯ СОСТАВА ТЯЖЕЛОГО БЕТОНА

Данный метод позволяет проектировать составы тяжелого бетона с учетом достоверных закономерностей, полученных в настоящее время в технологии бетона. Цель расчетов – получение состава бетонной смеси требуемой марки по удобоукладываемости, а также бетона заданного класса бетона по прочности на сжатие, марок по морозостойкости и водонепроницаемости в проектном возрасте. Адаптирован для проектирования состава бетона как естественного твердения, так и подвергаемого тепловой обработки с отпускной прочностью бетона 50, 55, 60, 65, 70, 75, 80, 85, 90, 95 и 100 % от проектной. Требуемая прочность бетона рассчитывается по коэффициенту вариации для данного изделия. Дополнительно рассчитывается модуль упругости бетона. Учитываются многочисленные свойства цемента (завод-производитель, минералогический состав и удельную поверхность, активность, нормальную густоту, плотность), крупного заполнителя (вид, наибольшую крупность зерен, фракционный состав, прочность и модуль упругости породы, содержание мелких фракций, ила, глины и пыли), мелкого заполнителя (вид, модуль крупности, содержание крупных фракций, ила, глины и пыли). Метод позволяет варьировать видом и количеством вводимых химических добавок – пластифицирующих, воздухововлекающих и ускорителей твердения. Применительно к производственному составу рассчитывают расходы компонентов бетонной смеси в зависимости от ее потребного объема, влажности заполнителей, характеристик приготовленных растворов химических добавок. Вводимые цены всех компонентов бетонной смеси позволяют из множества возможных вариантов получения бетона с заданными техническими характеристиками выбрать тот, который обеспечивает минимальную стоимость.

Система расчетов содержит несколько сотен взаимно увязанных формул, поэтому реализация данного метода проектирования состава бетона возможна только с использованием вычислительной техники. Важной особенностью приведенного ниже программного продукта является исключение каких-либо ошибок, поскольку ввод информации производится без использования клавиатуры. Варьирование влияющих факторов добиваются того, чтобы сигналы возле

«Расчетных характеристик бетона» сменили красный цвет (величины параметров недостаточны) на зеленый (параметры равны или превышают расчетные).

Основные окна программного продукта представлены на рис. 6.1–6.4.

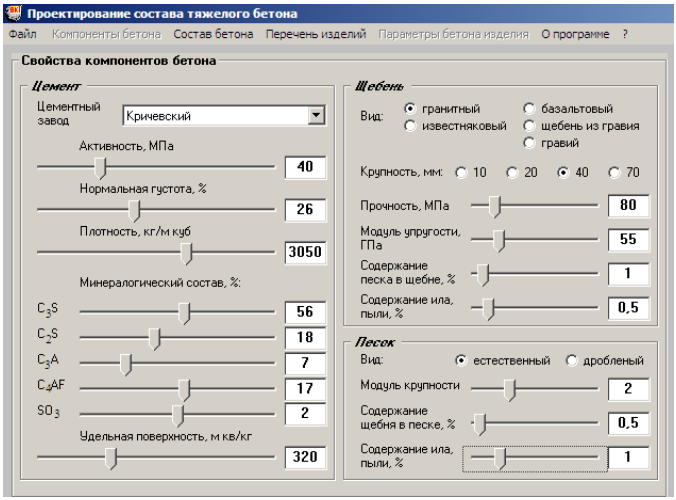


Рис. 6.1. Введение свойств компонентов бетона

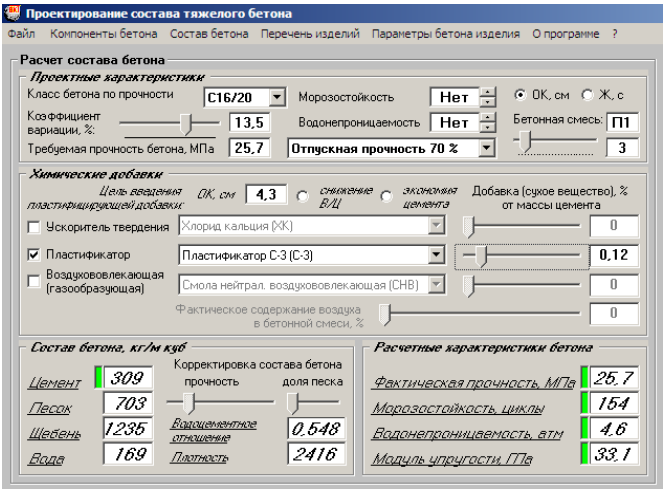


Рис. 6.2. Расчет лабораторного состава бетона

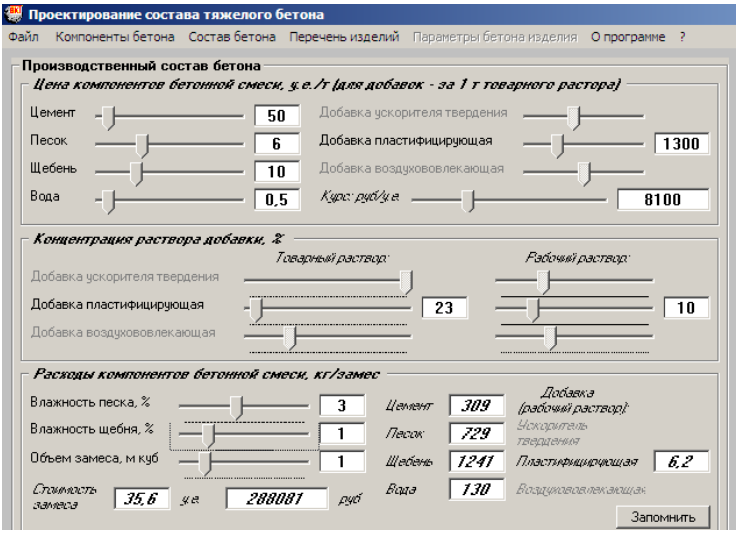


Рис. 6.3. Расчет производственного состава бетона

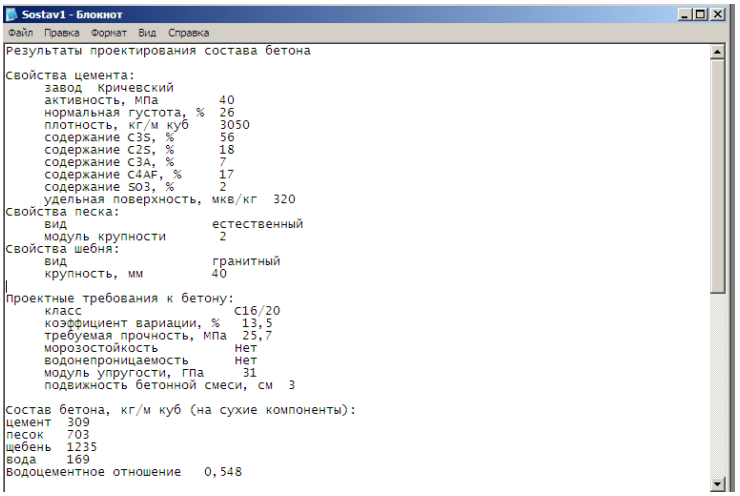


Рис. 6.4. Пример распечатки (части) состава бетона

7. РАСЧЕТНО-ГРАФИЧЕСКИЙ МЕТОД

В соответствии со словарем иностранных слов номография (гр. nomos закон + grapho пишу) – область математики, изучающая теорию и способы построения особых чертежей, называемых номограммами, с помощью которых можно, не производя вычислений, получать решения уравнений, для которых номограммы специально построены.

Номограммы являются одним из наиболее простых, дешевых и доступных средств механизации вычислительных работ. Построение номограмм для какой-либо формулы, особенно выгодно, когда по ней необходимо производить массовые вычисления.

Номограммы можно использовать в научно-исследовательской работе, проводя на них анализ номографических зависимостей, изучая взаимное влияние влияющих факторов.

Порядок выполнения расчетов

Расчеты выполняются в следующей последовательности:

1. Назначают класс бетона по прочности на сжатие, марку бетонной смеси по удобоукладываемости, а также активность цемента.

2. По номограмме на рис. 7.1 рассчитывают водоцементное отношение бетонной смеси.

3. По номограмме на рис. 7.2 в зависимости от марки бетонной смеси по удобоукладываемости, а также водоцементного отношения определяют объем цементного теста и далее по номограмме на рис. 7.3 рассчитывают расход цемента и долю песка в смеси заполнителей.

4. Номограмма на рис. 7.4 предназначена для расчета расхода воды по величинам расхода цемента и водоцементного отношения, а по номограмме на рис. 7.5 рассчитывают расходы песка и щебня.

Задание по проектированию состава бетона аналогично предыдущему.

Последовательность расчетов

На рис. 7.1 на шкале «Класс бетона по прочности на сжатие (или обратную шкалу «Прочность бетона на сжатие») откладывают точ-

ку M_1 – класс бетона С20/25. Через полученную точку M_1 и M_2 – активность цемента 50 МПа проводят прямую до пересечения на шкале «Водоцементное отношение бетонной смеси» точки M_3 – В/Ц равно 0,54.

Расчеты продолжают, используя номограмму на рис. 7.2. Точку M_1 на шкале «Водоцементное отношение бетонной смеси» (0,54) – направляют перпендикулярно вверх до получения точки M_2 на пересечении с наклонной линией, соответствующей марке бетонной смеси по удобоукладываемости 2П. Далее полученную точку M_2 сносят влево до получения точки M_3 – объем цементного теста равен 325 л.

На шкале «Объем цементного теста в бетонной смеси» номограммы на рис. 7.3 откладывают точку M_1 (325 л) и соединяют прямой с точкой M_2 (водоцементное отношение равно 0,54), получая на точку M_3 шкале «Расход цемента» (расход равен 378 кг). На обратной стороне этой шкалы получают соответствующую точку M_4 – доля песка в смеси заполнителей равна 35 %. Поправка к полученному значению доли песка в смеси заполнителей (точка M_5) равна +4,5 %. Таким образом, окончательная доля песка в смеси заполнителей равна 35 + 4,5 = 39,5 %.

По номограмме на рис. 7.4. Соединяя прямой точки M_1 и M_2 на шкале «Расход воды» получают точку M_3 – расход равен 203 кг.

Расчеты завершают по номограмме на рис. 7,5. Точки M_1 и M_2 соединяют прямой, получая на соответствующих шкалах точки M_3 (расход щебня равен 1 100 кг) и M_4 (расход песка равен 700 кг).

Плотность бетонной смеси равна сумме расходов компонентов: 378 + 700 + 1 100 + 203 = 2 381 кг/м^3.

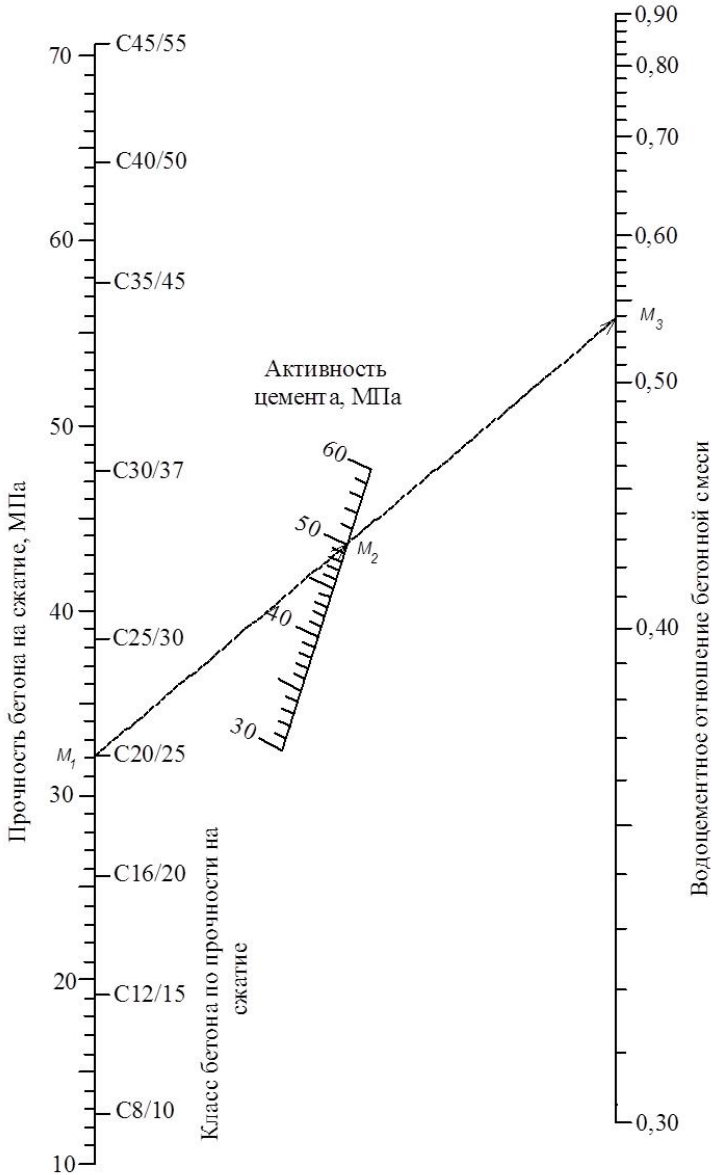


Рис. 7.1. Номограмма для расчета водоцементного отношения

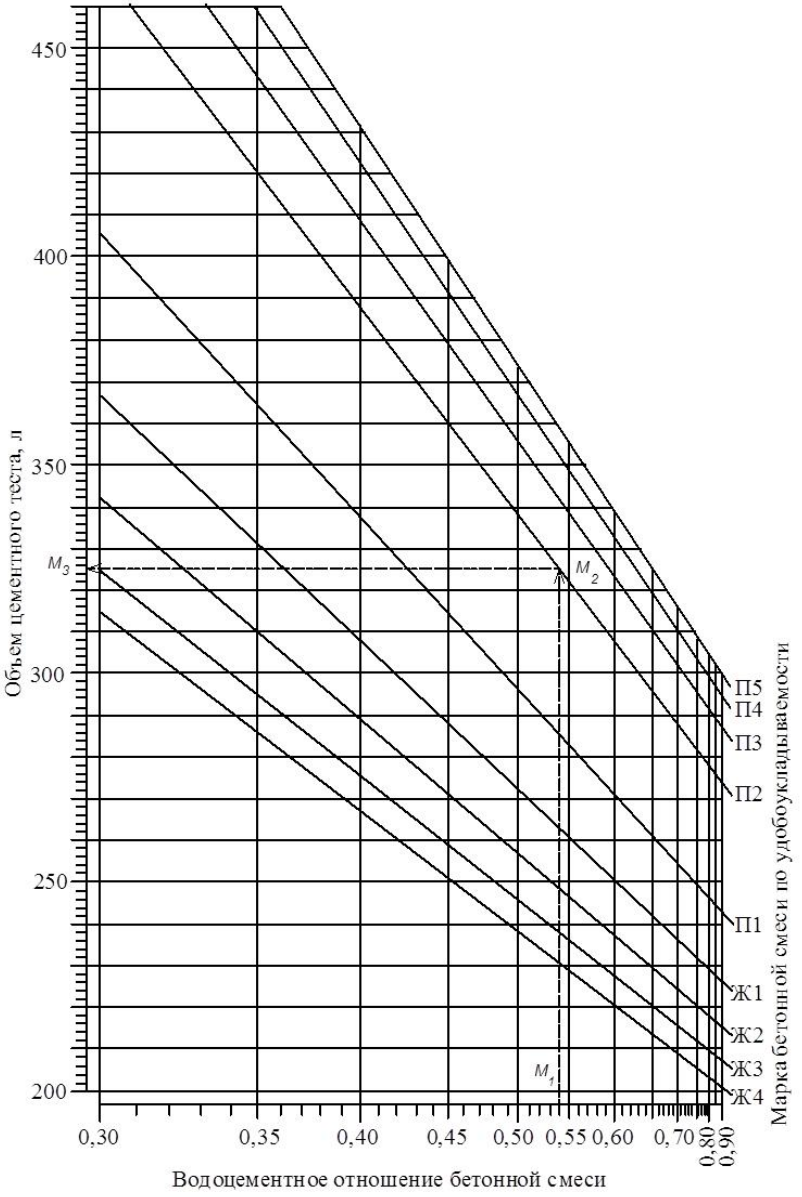


Рис. 7.2. Номограмма для расчета объема цементного теста

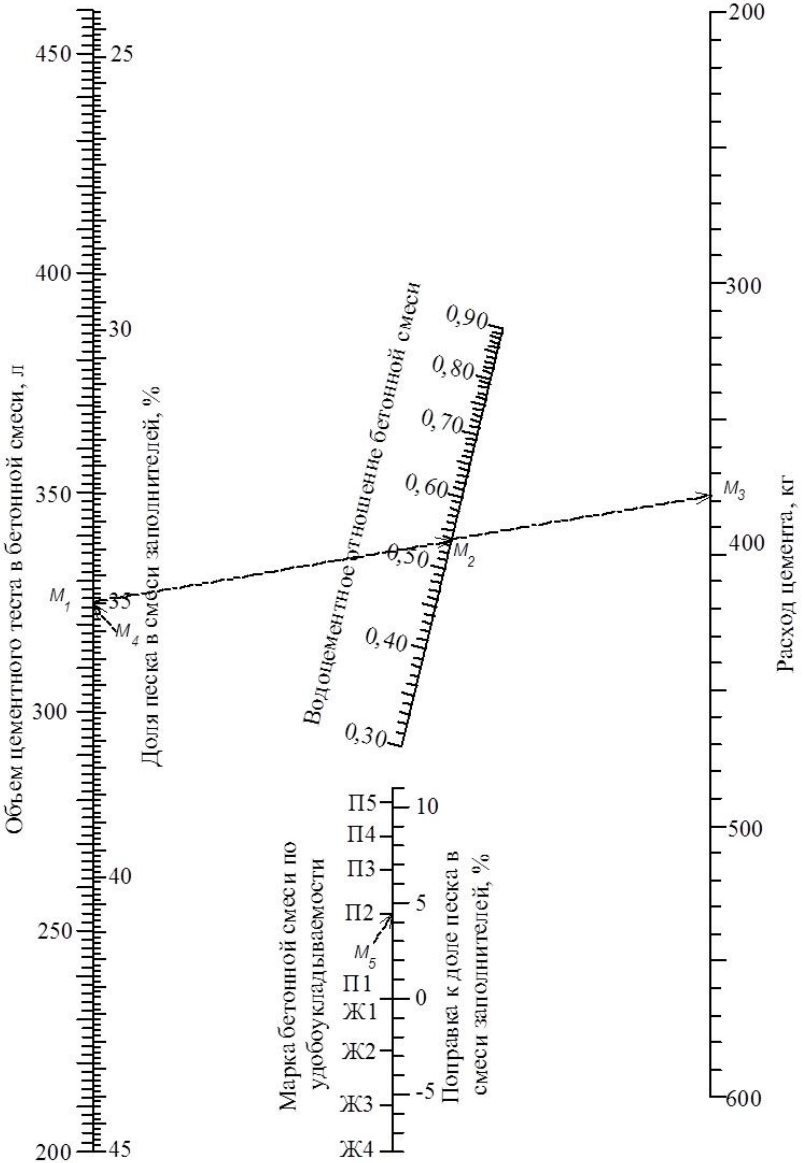


Рис. 7.3. Номограмма для расчета расхода цемента и доли песка в смеси заполнителей

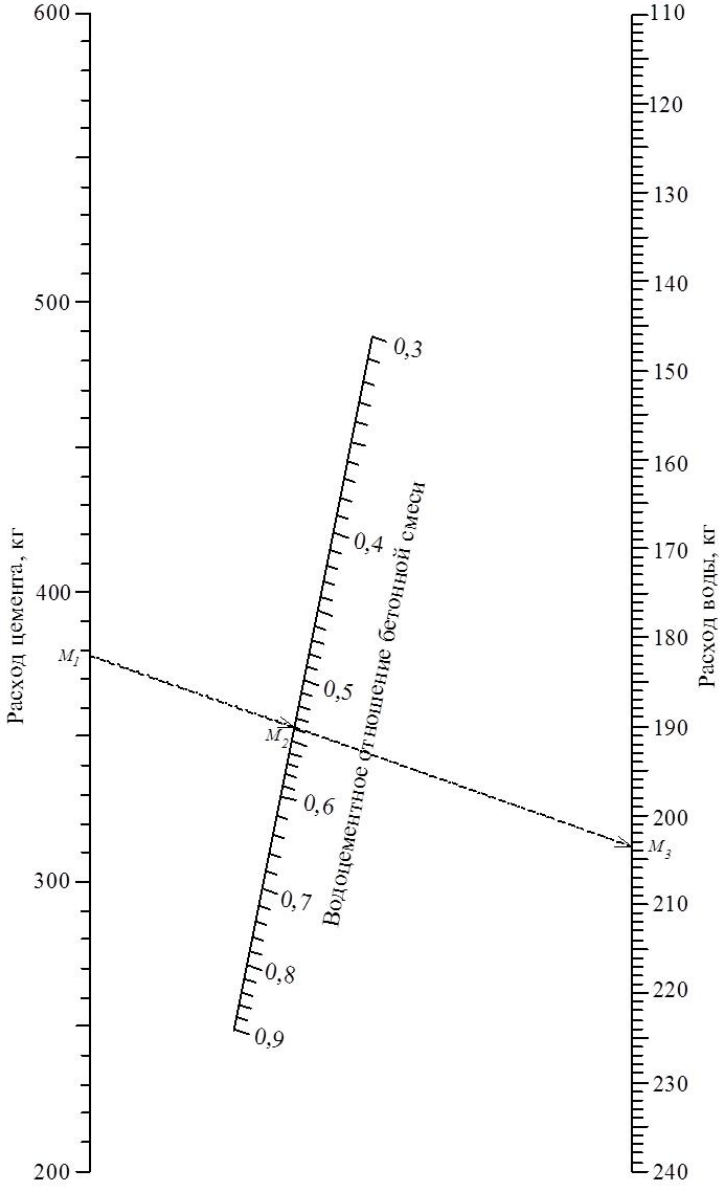


Рис. 7.4. Номограмма для расчета расхода воды

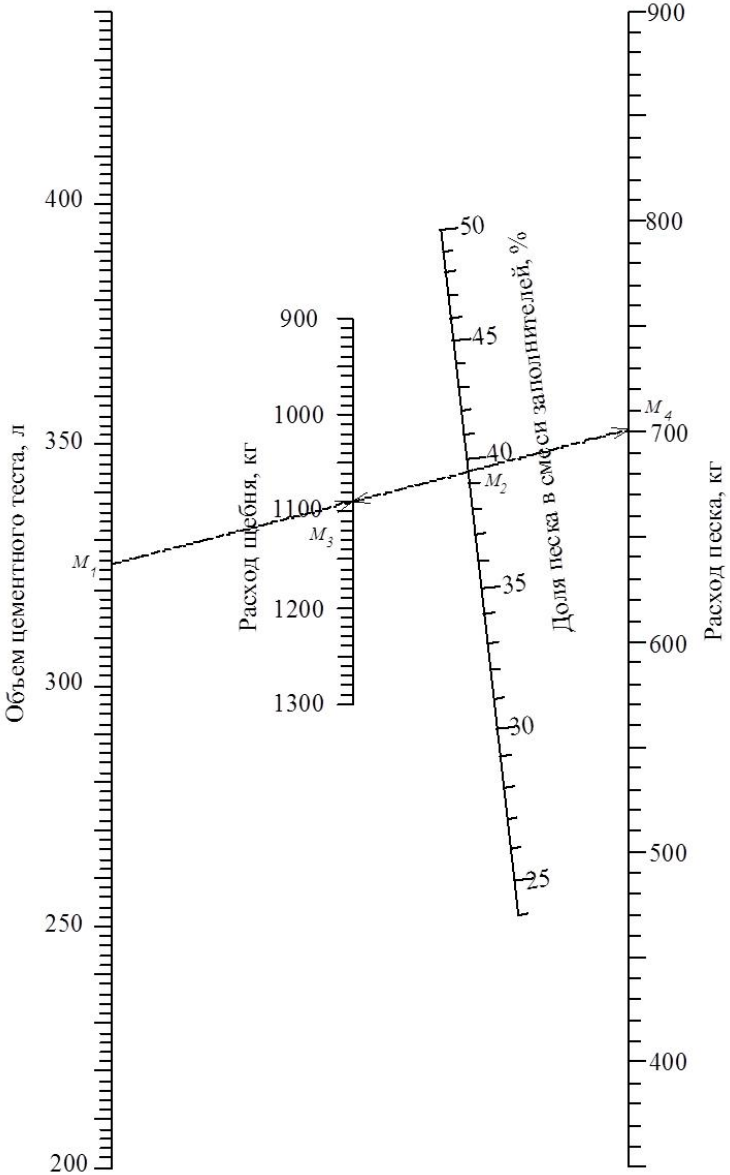


Рис. 7.5. Номограмма для расчета расходов песка и щебня

8. РАСЧЕТ СОСТАВА ЯЧЕИСТОБЕТОННОЙ СМЕСИ

Методика подбора состава ячеистого (газо- либо пено-) бетона автоклавного или безавтоклавного твердения достаточно проста. Однако подобранный состав требует последующей обязательной корректировки по полученным экспериментальным величинам текучести смеси, плотности и прочности бетона.

Порядок выполнения расчетов

Расчеты выполняются в следующей последовательности:

1. Рассчитывают расход сухих материалов (вяжущее и кремнеземистый компонент) на замес:

$$М_с = \frac{\rho_с}{К_с} \cdot V, \text{ кг}, \tag{8.1}$$

где $\rho_с$ – средняя плотность ячеистого бетона в высушенном состоянии, кг/м^3;

$К_с$ – коэффициент, учитывающий связанную воду в бетоне (может быть принят равным 1,1);

V – объем, на который рассчитывается замес с учетом объема горбушки, принимаемого 7–10 % при заливке в индивидуальные формы и 3–5 % для массивов, м^3.

2. Определяют расход вяжущего:

$$Вя = \frac{М_с}{1 + C}, \text{ кг}, \tag{8.2}$$

где C – соотношение кремнеземистого компонента и вяжущего в смеси (для извести с содержанием 100 % CaO может быть принято по табл. 8.1).

Таблица 8.1

Исходные величины соотношения кремнеземистого компонента и вяжущего в смеси (C)

Вяжущее	Автоклавный бетон	Неавтоклавный бетон
Цементное или цементно-известковое	1,00; 1,25; 1,50; 1,75	0,75; 1,00; 1,25
Известковое	3,0; 3,5; 4,5; 5,0; 5,5	–
Известково-шлаковое	0,6; 0,8; 1,0	0,6; 0,8; 1,0
Шлакощелочное	0,15; 0,20; 0,25	0,10; 0,15; 0,20
Высокоосновное зольное	0,35; 1,00; 1,50	–

3. При наличии цемента в смешанном вяжущем его расход равен:

$$Ц = Вя \cdot n, \text{ кг}, \tag{8.3}$$

где n – доля цемента в смешанном вяжущем, д. ед. (может быть принята равной в цементном вяжущем 0,93–0,94, известково-цементном 0,24–0,30, цементно-известковом 0,44–0,48: меньшие значения для плотности бетона 300, большие – 800 кг/м^3).

4. Расход извести:

$$И = Вя \cdot (1 - n) \cdot \frac{100}{A_и}, \text{ кг}, \tag{8.4}$$

где $A_и$ – активность извести (содержание CaO в %).

5. Расход кремнеземистого компонента:

$$КК = М_с - (Ц + И), \text{ кг}, \tag{8.5}$$

6. Расход воды равен:

$$В = М_с \cdot \left(\frac{В}{Т}\right), \text{ кг}, \tag{8.6}$$

где $(В/Т)$ – водотвердое отношение (ориентировочное значение может быть принято по табл. 8.2).

Таблица 8.2

Ориентировочное водотвердое отношение (В/Т)

Вяжущее	Технология	В/Т
Цемент и молотый песок	Обычная	0,6
	Вибрационная или с использованием пластифицирующей добавки	0,5
Зола	Обычная	0,4
	Вибрационная или с использованием пластифицирующей добавки	0,3

7. Расход алюминиевой пудры на 1 м^3 ячеистого бетона ($По^1$) назначают по табл. 8.3.

Таблица 8.3

Ориентировочный расход алюминиевой пудры на 1 м^3 ячеистого бетона

Средняя плотность ячеистого бетона, кг/м^3	300	350	500	600	700	800
Расход пудры, г	750	690	535	470	360	300

8. Расход алюминиевой пудры на замес:

$$По = По^1 \cdot V, \text{ г.} \qquad (8.7)$$

Пример

Требуется подобрать состав ячеистого бетона автоклавного твердения на цементно-известковом вяжущем. Плотность бетона 500 кг/м^3. Активность извести 85 %. Порообразователь – алюминиевая пудра. Технология вибрационная. Изделия изготавливают заливкой смеси в индивидуальные формы. Объем изделия 0,7 м^3.

Рассмотрим последовательность расчетов по пунктам.

По п. 1 расход сухих материалов на замес (объем горбушки принят равным 9 %):

$$\text{М}_\text{с} = \frac{\rho_\text{с}}{\text{К}_\text{с}} \cdot V = \frac{500}{1{,}1} \cdot \left(0{,}7 + 0{,}7 \cdot \frac{9}{100}\right) = 416 \text{ кг}.$$

По п. 2 расход вяжущего по табл. 8.1, приняв C равной 1,50:

$$\text{Вя} = \frac{\text{М}_\text{с}}{1 + C} = \frac{416}{1 + 1{,}50} = 166 \text{ кг}.$$

По п. 3 расход цемента, приняв величину n можно принять равной 0,47:

$$\text{Ц} = \text{Вя} \cdot n = 166 \cdot 0{,}47 = 78 \text{ кг}.$$

По п. 4 расход извести:

$$\text{И} = \text{Вя} \cdot (1 - n) \cdot \frac{100}{A_\text{и}} = 166 \cdot (1 - 0.47) \cdot \frac{100}{85} = 104 \text{ кг}.$$

По п. 5 расход кремнеземистого компонента:

$$\text{КК} = \text{М}_\text{с} - (\text{Ц} + \text{И}) = 416 - (78 + 104) = 234 \text{ кг}.$$

По п. 6 расход воды, приняв по табл. 8.2 водотвердое отношение равным 0,5:

$$\text{В} = \text{М}_\text{с} \cdot \left(\frac{\text{В}}{\text{Т}}\right) = 416 \cdot 0{,}5 = 208 \text{ кг}.$$

По п. 7 расход алюминиевой пудры на 1 м^3 ячеистого бетона по табл. 8.3 может быть принят равным 470 г.

По п. 8 расход алюминиевой пудры на замес:

$$\text{По} = \text{По}^1 \cdot V = 470 \cdot (0{,}7 + 0{,}7 \cdot 0{,}09) = 359 \text{ г}.$$

Полученные расходы компонентов смеси, приведенные к 1 м^3 (цемента 103, извести активностью 85 % 136, кремнеземистого компонента 307 кг) близки к рекомендуемым по ОНТП 09-85 (цемента 120, извести активностью 70 % 135, кремнеземистого компонента 320 кг).

При необходимости для получения уточненных результатов проводят дополнительные эксперименты, устанавливая фактическое водотвердое отношение, обеспечивающее текучесть смеси (твердых компонентов и воды) согласно данным, приведенным в табл. 8.4.

Таблица 8.4

Текучесть растворной смеси, см

Заданная средняя плотность ячеистого бетона, кг/м^3	Диаметр расплыва смеси по Суттарду, см, на вяжущем		
	цементном, цементно-известковом, шлако-щелочном	известковом, известково-шлаковом	высокоосновном зольном
300	38	30	–
400	34	25	25
500	30	23	23
600	26	21	21
700	22	19	20
800	18	17	18

Примечание. При вибрационном формовании изделий диаметр расплыва смеси можно снизить в 2 раза.

9. АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ

Результаты сопоставительных расчетов использованными выше методами приведены в табл. 9.1.

Таблица 9.1

Расходы компонентов бетонной смеси, рассчитанные по различным методам

Метод	Расход компонентов, кг/м^3					
	Цемент	Песок	Щебень	Вода	В/Ц	Плотность
1	413	636	1053	233	0,564	2334
2	365	743	1158	199	0,545	2465
2у	345	728	1135	188	0,545	2397
3	368	626	1180	201	0,548	2375
4	369	660	1173	198	0,537	2400
5	318	589	1256	203	0,638	2366
6	332	635	1222	196	0,589	2385
7	378	700	1100	203	0,540	2381

1 – Классический профессора И. Н. Ахвердова.

2 – Модифицированный профессора И. Н. Ахвердова.

2у – Модифицированный профессора И. Н. Ахвердова уточненный.

3 – Упрощенный.

4 – НИИЖБ.

5 – Абсолютных объемов.

6 – Профессора В. Н. Сизова.

7 – Расчетно-графический.

Полученные результаты хотя и близки, но наблюдается различие как по расходам цемента и воды, таки по соотношению мелкого и крупного заполнителя. Естественно, перед инженером-технологом встает вопрос – а каким методом необходимо пользоваться, чтобы обеспечить максимальную точность расчетов и оптимальные технико-экономические характеристики бетона?

Обычно этот вопрос решается личными пристрастиями инженера, советами коллег, хвалебными рекомендациями и пр.

Ответ же прост – необходимо сопоставить фактические результаты с расчетными по различным методам и формулам. Для реализации этой задачи технолог должен отказаться от личных пристрастий и рекомендаций коллег, ученых, рекламных буклетов и пр., а произвести элементарные статистические расчеты. Необходимо собрать фактические результаты испытаний (желательно несколько сотен), например, прочности бетона ($f_{бфi}$), накопленные на предприятии, а также почерпнутые из литературных источников, отчетов, диссертационных работ и т. д., а также результаты, соответственно полученные по различным методам проектирования состава бетона ($f_{брi}$). А далее рассчитать для двух полученных массивов, например, коэффициент вариации прочности бетона (расхода цемента, воды, морозостойкости и пр.):

$$V = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^{n}\left(f_{брi} - f_{бфi}\right)^2}}{\overline{f}_{бф}} \cdot 100, \%,$$

где $\overline{f}_{бф}$ – среднее значение фактической прочности бетона, МПа.

И за основу следует взять тот метод, который дает минимальные отклонения расчетных величин от фактических.

В качестве примера ниже приведен статистический анализ опубликованных различными авторами формул для расчета водоцементного отношения (их точность в первую очередь определяет и точность расчетов прочности бетона, его долговечности расходов цемента, воды и пр.). Результаты анализа 20 формул для массива из примерно 500 сопоставимых данных, приведенные на рис. 9.1 и 9.2.

Гистограмма на рис. 9.1 отражает эффективность использования той либо иной формулы. На этом же рисунке приведена граница, соответствующая нормативному коэффициенту вариации прочности бетона (13,5 %). Нетрудно заметить, что, к сожалению, не все формулы отвечают требованию получения бетона с наибольшими характеристиками при наименьшем расходе вяжущего.

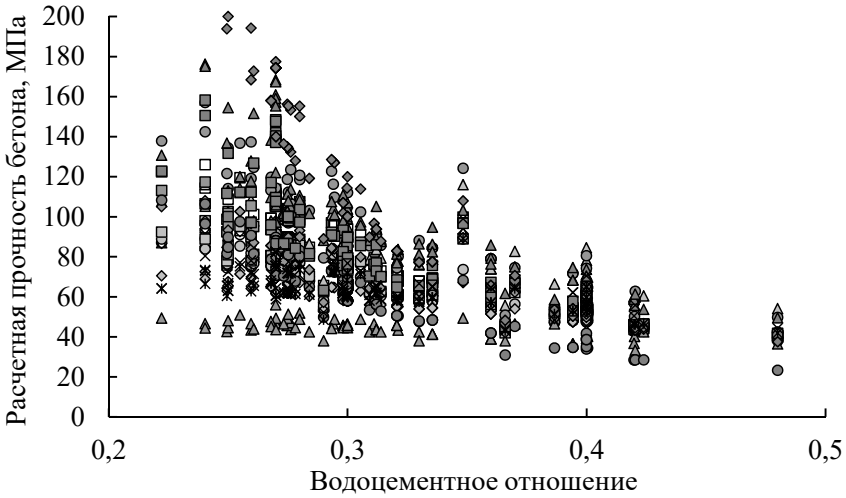


Рис. 9.1. Зависимость прочности бетона
от водоцементного отношения

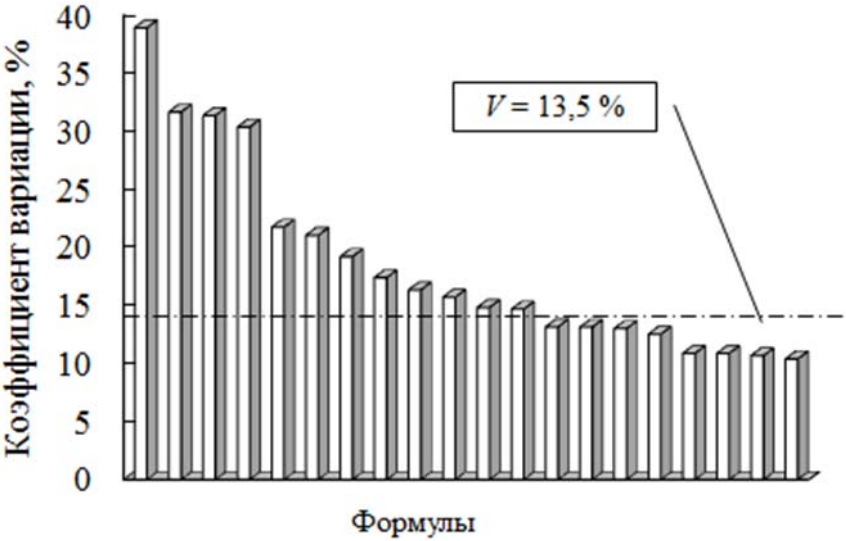


Рис. 9.2. Точность расчета прочности бетона
по различным формулам

Представленные на рисунках результаты вполне убедительно подтверждают ранее сделанное заключение профессора Б. Г. Скрамтаева: «…*Многочисленные попытки уточнить зависимость прочности бетона от водоцементного отношения и ряда других факторов не увенчались успехом. Усложнение формул и введение различных поправок не дает желаемого повышения точности технологических расчетов, поскольку вряд ли удастся учесть в этих формулах все факторы, влияющие на прочность бетона*…».

Но авторы данного учебно-методического пособия надеются, что наши специалисты-бетонщики, подготавливаемые, в частности, в БНТУ, и вооруженные современными знаниями, все же смогут добиться успеха, в чем сомневался когда-то основатель науки о бетоне в СССР профессор Б. Г. Скрамтаев.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ахвердов, И. Н. Основы физики бетона / И. Н. Ахвердов. – М. : Стройиздат, 1981. – 464 с.
2. Ахвердов, И. Н. Теоретические основы бетоноведения / И. Н. Ахвердов. – Мн. : Вышэйшая школа, 1991. – 187 с.
3. Баженов, Ю. М. Технология бетона / Ю. М. Баженов. – М. : АСВ, 2007. – 524 с.
4. Баженов, Ю. М. Способы определения состава бетона различных видов / Ю. М. Баженов. – М. : Стройиздат, 1975. – 272 с.
5. Бойко, В. Е. Расчет и подбор составов легких бетонов / В. Е. Бойко, В. А. Еременко. – Киев : Будивельник, 1974. – 158 с.
6. Бужевич, Г. А. Легкие бетоны на пористых заполнителях / Г. А. Бужевич. – М. : Стройиздат, 1970. – 272 с.
7. Десов, А. Е. Вибрированный бетон / А. Е. Десов . – М. : Госстройиздат, 1956. – 230 с.
8. Дворкин, Л. И. Проектирование составов бетона с заданными свойствами / Л. И. Дворкин, О. Л. Дворкин. – Ровно : РГТУ, 1999. – 202 с.
9. Несветаев, Г. В. Бетоны : учебное пособие / Г. В. Несветаев. – Ростов н/Д. : Феникс, 2011. – 381 с.
10. Сизов, В. П. Проектирование составов тяжелого бетона / В. П. Сизов. – М. : Стройиздат, 1979. – 144 с.
11. Сорокер, В. И. Жесткие бетонные смеси в производстве сборного железобетона / В. И. Сорокер, В. Г. Довжик. – М. : Стройиздат, 1964. – 307 с.
12. Сторк, Ю. Теория состава бетонной смеси / Ю. Сторк. – Л. : Стройиздат, 1971. – 238 с.
13. Производство сборных железобетонных изделий : справочник / Г. И. Бердичевский, А. П. Васильев, Л. А. Малинина [и др.] ; под ред. К. В. Михайлова, К. М. Королева. – М. : Стройиздат, 1989. – 447 с.
14. Руководство по подбору состав тяжелого бетона / НИИ бетона и железобетона Госстроя СССР. – М. : Стройиздат, 1979. – 103 с.

Учебное издание

БАБИЦКИЙ Вячеслав Вацлавович
КОВШАР Сергей Николаевич
ЖУРАЕВ Олмас

БЕТОНОВЕДЕНИЕ

Учебно-методическое пособие
для обучающихся по специальности
7-07-0732-01 «Строительство зданий и сооружений»
профилизации «Производство строительных изделий
и конструкций»

Редактор *А. С. Кочмарик*
Компьютерная верстка *Н. А. Школьниковой*

Подписано в печать 13.02.2026. Формат 60×84 $^{1}/_{16}$. Бумага офсетная. Ризография.
Усл. печ. л. 8,37. Уч.-изд. л. 4,67. Тираж 100. Заказ 459.

Издатель и полиграфическое исполнение: Белорусский национальный технический университет.
Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя, распространителя
печатных изданий № 1/173 от 12.02.2014. Пр. Независимости, 65. 220013, г. Минск.