

# ПРОЕКТИРОВАНИЕ СОСТАВА ТЯЖЁЛОГО БЕТОНА

В статье приводится перечень исходных данных на проектирование состава тяжёлого бетона, современные воззрения о методике расчёта и корректировки состава с учётом изменяющихся характеристик исходных материалов и особенностей эксплуатации бетонных и железобетонных конструкций.



**Трофимов Б. Я.,**  
д.т. н., профессор, советник РААСН,  
заведующий кафедрой «Строительные  
материалы» Южно-Уральского  
государственного университета.

Основные требования к составу бетона сформулированы в Европейских нормах EN 206–1: характеристики затвердевшего бетона должны соответствовать всем эксплуатационным требованиям, предъявляемым к конструкциям, а на стадии приготовления и укладки бетонной смеси должны удовлетворять технологическим требованиям. Прочность при сжатии образцов бетона одобренного состава должна превышать значения нормируемой прочности (класса) на 12 МПа.

Требуемое качество бетона в конструкции может быть достигнуто только при тщательном соблюдении требований технологии бетонных работ — транспортировки, укладки, уплотнения и ухода за свежесложенным бетоном. Качество выполнения бетонных работ создаёт некоторые неопределённости в обеспечении надёжности работы конструкции, это обстоятельство учитывается введением в расчётные характеристики бетона коэффициента запаса по материалу.

Подбор составов на основе количественных критериев оценки долговечности конструкции предполагает знание механизма

постепенного истощения долговечности бетона на протяжении заданного срока эксплуатации сооружения. Критерии должны быть выражены в виде зависимостей с использованием количественных характеристик или коэффициентов. На практике обеспечение долговечности зависит от сочетания выбранных архитектурно-планировочных решений, применяемых материалов и качества производства работ.

По [1] проектирование состава обычного (тяжёлого) бетона включает: определение номинального состава, расчет и корректировку рабочего состава, расчет и передачу в производство рабочих дозировок.

Для проектирования состава бетона необходимы сведения, приведённые на рис. 1

Выбор вида цемента производится в соответствии с требованиями нормативной или проектной документации на изготавливаемое изделие с учётом действующих ограничений и экономичности. Ограничения по виду цемента приведены в [2,3,4], где указано, что для производства сборных железобетонных изделий применение пуццолановых портландцементов не допускается, а портландцементы и шлакопорт-

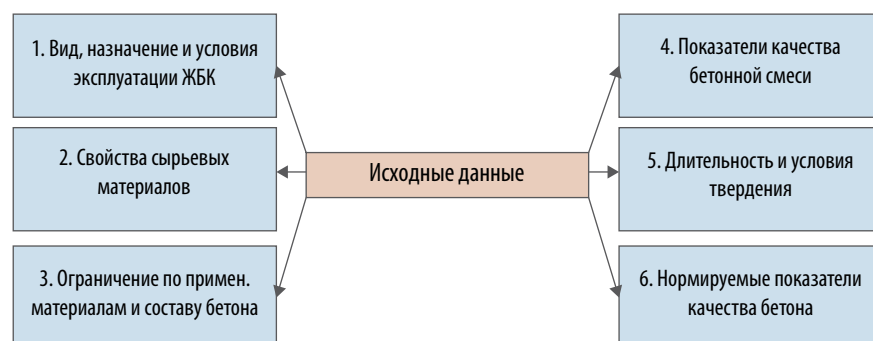


Рис. 1. Исходные данные для проектирования состава бетона.

Таблица 1.

Класс (марка) бетона	Рекомендуемые и допускаемые марки цемента для тяжёлого бетона при твердении					
	В естественных условиях		При тепловой обработке до отпусковой прочности, %			
	Рекомендуемые	Допускаемые	70 и менее		Более 70	
			рекомендуемые	допускаемые	рекомендуемые	допускаемые
B7,5 (100)	300	-	300	-	-	-
B10 (150)	300	400	300	400	400	300
B12,5 (150)	300	400	300	400	400	300, 500
B15 (200)	400	300, 500	400	300, 500	400	300, 500
B20 (250)	400	300, 500	400	300, 500	400	300, 500
B22,5 (300)	400	500	400	500	500	400
B25 (350)	400	500	400	500	500	400
B30 (400)	500	400, 550	500	400, 550	500	400, 550
B35 (450)	500	550	500	550	500	550
B40 (500)	500	550	500	550	550	-
B45 (600)	550	-	550	-	-	-

ландцементы должны быть 1 или 2 группы по эффективности при пропаривании по [5]. По [6, 7] цементы на основе портландцементного клинкера не должны содержать хлор-иона более 0,1%, а содержание оксида серы SO<sub>3</sub> должно быть не менее 1,0 и не более 4,0% массы цемента. По Европейским нормам [8] для бетона изделий или конструкций, эксплуатируемых в среде с химической агрессией, должен применяться сульфатостойкий цемент. По [2] для бетона дорожных и аэродромных покрытий, напорных и безнапорных труб, железобетонных шпал, мостовых конструкций, стоек опор ЛЭП, стоек контактной сети железнодорожного транспорта и освещения должен поставляться портландцемент, изготовленный на основе клинкера нормируемого состава с содержанием C<sub>3</sub>A не более 7%, а содержание щелочей в перерасчете на Na<sub>2</sub>O не более 0,8% массы.

Для железобетонных конструкций с маркой бетона по морозостойкости F-200... F300 рекомендуются ПЦ Д0, ПЦ Д5, ПЦ Д20, а при марке F400 и выше — ПЦ Д0, ПЦ Д5 или сульфатостойкий портландцемент. Для пропариваемых изделий из бетонов с нормируемыми требованиями по морозостойкости может использоваться шлакопортландцемент М400.

При выборе вида цемента из всех допускаемых разновидностей предпочтение отдаётся наиболее дешёвому — как правило, с максимально допустимым содержанием активной минеральной добавки, а в условиях тепловлажностной обработки — шлакопортландцементу.

Марки цемента для бетонов различных видов и классов (марок) по прочности при сжатии выбираются из табл. 1 [9].

Удобоукладываемость бетонной смеси назначается в зависимости от принятого способа уплотнения при формировании железобетонных изделий так, чтобы коэффициент уплотнения бетонной смеси для тяжёлого бетона был не менее 0,98, а для жёстких бетонных смесей и смесей для мелкозернистого и песчаного бетона — не менее 0,96.

Рекомендации по удобоукладываемости бетонных смесей в зависимости от способа формирования сборных железобетонных изделий принимаются в соответствии с требованиями [10], для монолитных железобетонных конструкций чаще всего используют бетонные смеси с марками по удобоукладываемости П2... П4 или самоуплотняющиеся смеси.

Широко применяемым способом регулирования свойств бетона и бетонной смеси является введение различных добавок при приготовлении бетонной смеси. Обязательное применение добавок регламентируется в следующих случаях:

- Для приготовления высокоподвижных и литых бетонных смесей с показателем подвижности (осадкой конуса) не менее 10 см, а также при классе бетона по прочности при сжатии большем или равном классу цемента, необходимо использовать пластифицирующие добавки по [11] для водоредуцирования, повышения прочности или снижения расхода цемента.

- Бетонные смеси для бетонов с маркой по морозостойкости F 200 и более должны содержать воздухововлекающие или воздухововлекающе-пластифицирующие добавки.

- Для агрессивных условий эксплуатации должны вводиться добавки, повышающие стойкость бетона и его защитные свойства по отношению к арматуре.

- Для бетона с повышенными требованиями по водонепроницаемости (марка W 6 и более) вводятся уплотняющие добавки.

Наибольшая крупность заполнителей (НК) назначается в зависимости от вида бетонной конструкции и способов подачи бетонной смеси к месту укладки. НК не должна превышать 3/4 минимального расстояния между стержнями арматуры для всех видов железобетонных изделий, для плит покрытий и перекрытий НК не должна превышать половину толщины плиты. При подаче бетонной смеси по хоботам и бетононасосами НК должна быть не более 1/3 внутреннего диаметра хобота или трубо-

провода, а при укладке бетонной смеси в скользящую опалубку не должна превышать 1/6 наименьшего размера поперечного сечения бетонируемой конструкции.

Заполнители должны соответствовать требованиям стандартов, их характеристики должны учитывать технологию производства работ, назначение сооружения, условия эксплуатации. В случае подозрений на чувствительность заполнителя к щелочной реакции (содержание Na<sub>2</sub>O и K<sub>2</sub>O в цементе или других составляющих) и если бетон конструкций подвержен при эксплуатации воздействию влаги, необходимо предпринимать меры (вводить активные минеральные добавки), предупреждающие протекание щелочной коррозии.

Для расчёта номинального состава тяжёлого бетона чаще всего используется метод абсолютных объёмов, базирующийся на следующих принципах:

- Основное влияние на качество бетона оказывает цементно-водное отношение (Ц/В), которое характеризует плотность и прочность цементного камня. Для тяжёлого бетона на плотных заполнителях при благоприятных условиях твердения средняя плотность и прочность бетона зависит от степени уплотнения бетонной смеси, количества воды затворения и соотношения компонентов. Этот принцип позволяет определить величину Ц/В исходя, например, из основного закона прочности бетона Боломея-Скрамтаева:

$$R_6 = AR_u (Ц/В - 0,5), \quad (1)$$

где R<sub>6</sub> — проектируемая прочность бетона в марочном возрасте (обычно 28 суток) нормального твердения при температуре 20±2 °С и относительной влажности воздуха не менее 95%, МПа,

A — коэффициент, зависящий от качества исходных материалов,

R<sub>u</sub> — активность или марочная прочность цемента, МПа.

- Количество воды затворения влияет на удобоукладываемость бетонной смеси и прочность бетона. Количество и качество цементного теста должно быть таким, чтобы обеспечить нерасслаиваемость бетонной смеси, нормируемую степень уплотнения при формировании изделий и конструкций, а также регламентируемые свойства бетона. Количество воды затворения на 1 м<sup>3</sup> бетона обычно назначается по таблицам или графикам исходя из требуемой удобоукладываемости бетонной смеси, вида и наибольшей крупности заполнителей, а также водопотребности цемента. Зная Ц/В и количество воды затворения, можно определить расход цемента на 1 м<sup>3</sup> бетона.

- В бетонной смеси оптимального состава компоненты находятся как бы в «абсолютно плотном состоянии», так как пустоты крупного заполнителя заполняются мелким заполнителем, а пустоты мелкого заполнителя заполняются цементным тестом, пористость

частиц заполнителей мала, и ею можно пренебречь. Исходя из этого принципа, можно получить два уравнения для определения расхода крупного и мелкого заполнителя: 1) сумма абсолютных объемов компонентов равна объему бетонной смеси (обычно расчет ведётся на 1 м<sup>3</sup> или 1000 л бетонной смеси) и 2) сумма абсолютных объемов растворных компонентов бетонной смеси равна объёму пустот крупного заполнителя с учётом раздвижки его зёрен:

$$C/\rho_c + П/\rho_n + Щ/\rho_{щ} + В/\rho_v = 1000, \quad (2)$$

$$aPЩ/\rho_{щ}^{нас} = C/\rho_c + П/\rho_n + В/\rho_v, \quad (3)$$

где  $C, П, Щ, В$  — расходы в кг соответственно цемента, песка, щебня, воды,  $a$  — коэффициент раздвижки зёрен,  $\rho_c, \rho_n, \rho_{щ}, \rho_v$  — плотности цемента, песка, щебня, воды, кг/л,  $P$  — пустотность щебня,  $\rho_{щ}^{нас}$  — насыпная плотность щебня, кг/л.

По [1] проектирование состава бетона осуществляется для обеспечения среднего уровня прочности, который принимается с учётом фактической однородности бетона по прочности и планируемых мероприятий по её повышению. С 1 января 2010 года введён ГОСТ Р 53231–2008, а с 1 сентября 2012 года взамен ему введён ГОСТ 18105–2010 по правилам контроля и оценке прочности бетона, в которых отсутствует понятие и способы определения среднего уровня прочности бетона, поэтому состав тяжелого бетона, вероятно, следует подбирать для обеспечения требуемой прочности ( $R_t$ ) бетона в МПа, которую рассчитывают:

$$R_t = K_t B_{норм} \quad (4)$$

где  $B_{норм}$  — нормируемое значение прочности бетона, МПа,  $K_t$  — коэффициент требуемой прочности, определяется в зависимости от коэффициента вариации прочности бетона.

Табл. 2. Коэффициент требуемой прочности  $K_t$  при контроле прочности по схемам А и В

Средний коэффициент вариации прочности $V$ , %	Коэффициент требуемой прочности $K_t$ для			
	Всех видов бетона кроме плотного силикатного, ячеистого, массивного	Плотного силикатного бетона	Ячеистого бетона	Бетона массивных гидротехнических конструкций
6 и менее	1,07	1,06	1,08	1,09
7	1,08	1,07	1,09	1,10
8	1,09	1,08	1,10	1,11
9	1,11	1,09	1,12	1,13
10	1,14	1,12	1,13	1,14
11	1,18	1,14	1,14	1,16
12	1,23	1,18	1,17	1,18
13	1,28	1,22	1,22	1,20
14	1,33	1,27	1,26	1,22
15	1,38	1,33	1,32	1,23
16	1,43	1,39	1,37	1,25
17		1,46	1,43	1,28
18			1,50	1,32
19	Область недопустимых		1,57	1,36
20		тимых	значен	1,39
Более 20				ий

Табл. 3. Коэффициент  $t_0$

Число единичных значений прочности бетона $n$	Коэффициент $t_0$
15	1,76
20	1,73
25	1,71
30	1,70
Более 30 до 60 включительно	1,68
Более 60	1,64

Величина коэффициента  $K_t$  зависит от схемы контроля прочности бетона, в соответствии с [12] при контроле прочности бетона могут применяться четыре схемы:

А — используется не менее 30 единичных значений, полученных при контроле прочности бетона предыдущих партий готовой бетонной смеси (БСГ) или сборных конструкций в анализируемом периоде для определения характеристик однородности бетона по прочности.

Б — используется не менее 15 единичных значений в контролируемой партии БСГ или сборных конструкций и преды-

дущих партий в анализируемом периоде для определения характеристик однородности бетона по прочности.

Контроль прочности (БСГ) производятся по схемам А, Б, Г, для сборных конструкций применяют схемы А, Б, В, Г, для монолитных — схемы В, Г.

При контроле по схемам А и В коэффициент  $K_t$  определяют по табл. 2 в зависимости от среднего коэффициента вариации прочности бетона за анализируемый период  $V$  или текущего коэффициента вариации прочности бетона контролируемой партии  $V_m$ .

При контроле по схеме Б коэффициент  $K_t$  рассчитывают по формуле:

$$K_t = \frac{1}{1 - t_0 \frac{V_A}{100}} \quad (5)$$

где  $t_0$  — коэффициент, принимаемый по табл. 3 в зависимости от общего числа единичных значений прочности бетона  $n$  в проконтролированных партиях БСГ

Табл. 4. Активность цемента в МПа при пропаривании

	Вид цемента	R <sub>c</sub> после ТВ0 2+3+6+2 при 80 °С для цемента марок			
		300	400	500	550, 600
1	ПЦ	Более 23	Более 27	Более 32	более 38
	ШПЦ	Более 21	Более 25	Более 30	—
2	ПЦ	20...23	24...27	28...32	33...39
	ШПЦ	18...21	22...25	26...30	—
3	ПЦ	Менее 20	Менее 24	Менее 28	Менее 33
	ШПЦ	Менее 18	Менее 22	Менее 26	—

дущих партий в анализируемом периоде для определения характеристик однородности бетона по прочности.

В — для определения характеристик однородности бетона по прочности используют результаты неразрушающего контроля прочности бетона одной текущей контролируемой партии конструкций.

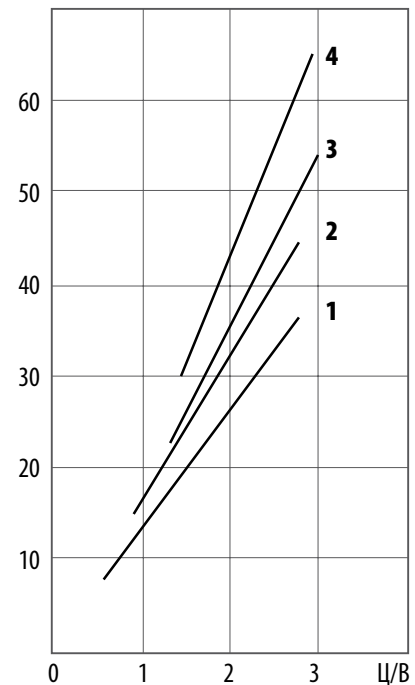


Рис. 2. Зависимость прочности бетона в возрасте 28 суток от величины Ц/В и марки цемента. 1–4 марки цемента соответственно 300, 400, 500, 600.

Табл. 5. Относительная прочность бетона в разном возрасте

В/Ц	Относительная прочность Rп/R28 при п (сут.)					
	1	3	7	28	90	360
0,4	0,24	0,48	0,70	1	1,15	1,38
0,5	0,17	0,43	0,66	1	1,19	1,47
0,6	0,11	0,37	0,64	1	1,21	1,55
0,7	0,08	0,33	0,63	1	1,35	1,67

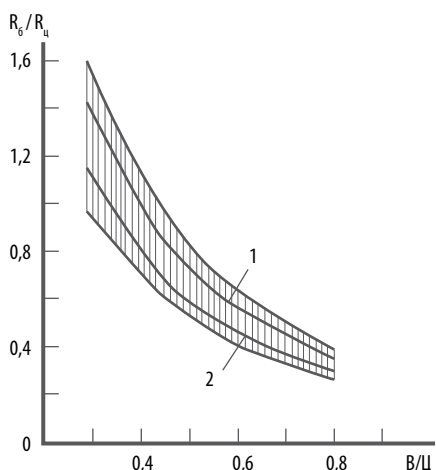


Рис.3. Зависимость относительной прочности бетона от В/Ц. 1 — бетон на щебне, 2 — бетон на гравии.

или конструкций, по которым рассчитан скользящий коэффициент вариации прочности  $V_c$  % за анализируемый период.

При контроле прочности бетона по схеме Г коэффициент  $K_f$  принимают: для всех видов бетона, кроме плотного силикатного и ячеистого, 1,28, для плотного силикатного — 1,33, для ячеистого — 1,43.

По [9] цементно-водное отношение (Ц/В) в номинальном составе бетона, твердеющего в условиях тепловой обработки, обеспечивающее получение заданного значения требуемой прочности бетона, определяется:

$$(Ц/В)_1 = \frac{R_6 + 0,37 \cdot R_ц + 3,22}{0,43 \cdot R_ц + 5,6} \quad (6)$$

где  $R_6$  — отпускная требуемая прочность бетона после тепловлажностной обработки, МПа, определяется по значению требуемой прочности и нормируемого стандартом или ТУ на сборное железобетонное изделие

процента отпускной прочности (в пределах 55...100%); процент отпускной прочности зависит от сезона, поэтому расчёт производится для зимних и летних условий.

$R_ц$  — активность цемента при пропаривании, МПа, принимается по данным цементного завода или по табл. 4.

Величину  $(Ц/В)_2$ , обеспечивающую требуемую прочность пропаренного бетона в проектном (марочном) возрасте, определяют:

$$(Ц/В)_2 = \frac{R_{28б} - 0,06 \cdot R_{28ц} + 10}{0,24 \cdot R_{28ц} + 10} \quad (7)$$

где  $R_{28б}$  — требуемая прочность бетона в 28 суток после тепловой обработки, МПа.

$R_{28ц}$  — активность цемента после тепловой обработки в возрасте 28 суток, МПа. Определяется по результатам испытания образцов, пропаренных по методике ГОСТ 310.4–81 [12] и испытанных в возрасте 28 суток, или принимается равной гарантированной марочной прочности цемента.

Табл. 7. Рекомендуемые минимальные значения Ц/В для обеспечения требований по водонепроницаемости и морозостойкости бетона

Марка бетона по водонепроницаемости	Марка бетона по морозостойкости	Ц/В не менее
W2	—	1,43
W4	F100	1,67
W6	F200	1,82
—	F300	2,00
W8	F400	2,22
W12 и более	F500 и более	2,50

Табл. 8. Рекомендуемые параметры состава бетона в зависимости от класса сред эксплуатации железобетонных конструкций

Класс сред эксплуатации конструкций	Индекс	Ц/В, не менее	Класс прочности, не менее	Расход цемента, не менее, кг/м <sup>3</sup>
Не агрессивная	X0	-	B10	-
	XC1	1,5	B20	260
	XC2	1,67	B25	280
Карбонизация	XC3	1,82	B30	280
	XC4	2,0	B30	300
	XS1	2,0	B30	300
Морская вода	XS2	2,22	B35	320
	XS3	2,22	B35	340
	XD1	1,82	B30	300
Прочие хлоридные воздействия	XD2	2,0	B30	320
	XD3	2,22	B35	320
	XF1	1,82	B30	300
Замораживание оттаивание	XF2	1,82	B25	300
	XF3	2,0	B30	320
	XF4	2,22	B30	340
Химическая коррозия	XA1	1,82	B30	300
	XA2	2,0	B30	320
	XA3	2,22	B35	360

Примечание: сведения даны применительно к цементу типа ЦЕМ 1

Табл. 6. Средние значения прочности бетона в % от марочной на низкоалюминатном (Б) и среднеалюминатном (В) портландцементях

Возраст бетона, сут.	Средняя температура бетона в конструкции, °С											
	-3		0		5		10		20		40	
	Б	В	Б	В	Б	В	Б	В	Б	В	Б	В
1\2	-	-	2	2	4	4	6	6	10	4	25	30
1	2	4	5	6	9	12	12	12	22	28	53	55
3	8	10	18	22	25	32	35	40	50	60	85	90
5	14	17	28	35	38	46	50	55	65	70	98	98
7	18	20	37	43	48	53	56	60	75	80	100	100
14	20	25	51	59	67	72	72	80	87	92		
28	25	30	70	75	84	85	93	93	100	100		

Из значений Ц/В, определенных по (6) и (7), выбирают большее и принимают его для подбора начального состава бетона.

Для монолитного бетона величина Ц/В может быть определена по формуле (7) или из рис.2

На рис. 3 приведена зависимость марочной прочности бетона ( $R_6$ ) относительно марочной прочности цемента ( $R_ц$ ) от В/Ц, используемая при проектировании состава

Табл. 9. Определение расхода воды

Удобукладываемость бетонной смеси		Расход воды на 1 м³ бетонной смеси, л, при максимальной крупности заполнителя, мм					
подвижность, см	жесткость, с	щебня			гравия		
		10	20	40	10	20	40
5...9	-	215	205	190	200	185	170
1...4	-	200	185	175	190	175	160
-	5...10	180	170	155	170	155	140
-	11...20	165	155	140	155	140	125

Примечания к табл. 9:

1. Расход воды приведен для Ц/В = 1,25...2,5, при Ц/В < 1,25 и Ц/В > 2,5 расход воды соответственно уменьшают или увеличивают.
2. Расход воды приведен для цементов с нормальной густотой 25...30%, при увеличении или уменьшении нормальной густоты на 1% за указанные пределы расход воды увеличивают или уменьшают на 2%.

Табл. 10. Минимально допустимые расходы цемента

Вид конструкции	Условия эксплуатации	Вид и расход цементов, кг на 1 м³ бетона			
		пц-д0, пц-д5, сспц-д0, цем1	пц-д20, сспц-д20, цемII	шпц, сспшпц, пуццпц, цемIII, цемIV, цемV	
Неармированные	Без атмосферных воздействий	Не нормируют			
	При атмосферных воздействиях	150	170	170	
Армированные с ненапрягаемой арматурой	Без атмосферных воздействий	150	170	180	
	При атмосферных воздействиях	200	220	240	
Армированные преднапряженной арматурой	Без атмосферных воздействий	220	240	270	
	При атмосферных воздействиях	240	270	300	

Примечание к табл. 10. Сведения даны применительно к цементу типа ЦЕМ 1.

бетона, и возможные отклонения прочности от средних значений [13].

По величине В/Ц можно примерно определить [13] относительную прочность бетона нормального твердения в разном возрасте по табл.5, из которой видно, что с возраста-

нием В/Ц относительная прочность бетона снижается в раннем возрасте (до 28 суток), а в позднем возрасте возрастает.

На величину прочности бетона, твердеющего в условиях, исключающих испарения влаги, большое влияние оказывает темпера-

тура [14], в том числе и в результате его саморазогрева вследствие экзотермических реакций гидратации минералов цемента, табл.6:

При использовании воздухововлекающей добавки, обеспечивающей воздухововлечение 2...4%, принятая величина Ц/В увеличивается на 0,01...0,02, а при воздухововлечении 4...6% — на 0,02...0,04 для компенсации понижения прочности бетона вследствие повышенного содержания в нем воздушных пор. По ГОСТ 26633-91 [3] для бетона дорожных и аэродромных плит объём вовлечённого воздуха должен быть 5...6%, а Ц/В ≥ 2.

При нормировании бетона по водонепроницаемости или морозостойкости минимально допустимая величина Ц/В приведена в табл. 7.

Если расчетное значение Ц/В менее минимально допустимого, то для дальнейших расчетов принимается Ц/В из таблицы 7.

По [8] ограничения по Ц/В принимаются также в зависимости от агрессивности среды эксплуатации железобетонных конструкций.

Рекомендации по выбору требований к бетону в зависимости от условий эксплуатации железобетонных конструкций приведены в табл. 8 [8].

Расход воды (В) для начального состава бетона принимается в зависимости от заданной удобукладываемости бетонной смеси, вида и наибольшей крупности заполнителя по табл.9.

Расчетный расход цемента (Ц<sub>р</sub>), кг на 1 м³ бетонной смеси, в начальном составе бетона

$$C_p = \frac{C}{B} \cdot V, \tag{8}$$

Полученный расчетом расход цемента Ц<sub>р</sub> сравнивают с минимально допустимым по [3] расходом цемента (табл.10) и с элементными нормами расхода, приведенными в [15]. При этом должно выполняться условие

$$C_{min} \leq C_p \leq C_3 = K \cdot C_6, \tag{9}$$

где C<sub>6</sub> — базовые нормы расхода цемента, кг;

K — корректирующий коэффициент.

Минимальный расход цемента для бетонных конструкций, эксплуатируемых в агрессивных средах, определяется с учетом требований [8, 16].

Базовые нормы расхода цемента распространяются на приготовление тяжёлых, мелкозернистых и лёгких бетонов для сборных и монолитных железобетонных изделий и конструкций, применяемых для всех видов строительства. Базовые нормы расхода цемента для тяжёлых бетонов, используемых при производстве монолитных и сборных железобетонных конструкций по поточно-агрегатной, конвейерной или стендовой технологии, приведены в табл. 11, при производстве сборных же-

Табл. 11. Базовые нормы расхода цемента М400 для тяжелого бетона

Класс бетона по прочности при сжатии	Базовые нормы расхода цемента М400 кг/м³ для тяжелого бетона, при твердении					
	В естественных условиях*	В условиях тепловой обработки до отпускной прочности, %				
		55-60	70	80	90	100
B7,5	180/180	180	200	210	225	240
B10	200/200	200	215	235	245	260
B12,5	225/225	225	235	260	270	285
B15	255/260	255	265	280	295	315
B20	305/320	310	315	340	360	380
B22,5	335/350	340	350	370	395	420
B25	365/380	370	380	400	425	450
B30	415/440	430	440	450	480	520
B35	480/	500	510	520	540	570
B40	550/	570	580	590	600	

\*Перед чертой для сборных, после черты — для монолитных ЖБК.

Табл. 12. Базовые нормы расхода цемента М400 для кассетных изделий

Толщина изделий, см	Класс бетона	Базовые нормы расхода цемента кг/м³ при отпускной прочности, %		
		70	80	90
10 и менее	B10	280	315	335
	B12,5	310	360	380
	B15	350	395	420
	B20	415	480	500
	B22,5	450	520	540
Более 10	B10	270	290	325
	B12,5	295	325	355
	B15	325	360	395
	B20	385	440	475
	B22,5	420	475	520



Табл. 13. Базовые нормы расхода цемента М400 для изделий из мелкозернистого бетона

Класс бетона	Базовые нормы расхода цемента М400 при твердении, кг/м <sup>3</sup>			
	В естественных условиях	В условиях тепловой обработки при отпускной прочности, %		
		70	80	90
B7,5	280	300	330	355
B10	315	325	355	390
B12,5	350	360	390	420
B15	400	410	450	490
B20	500	500	530	590
B22,5	535	535	580	
B25	550	550	600	

Табл. 14. ТЭН (кг/м<sup>3</sup>) для бетона с нормируемой морозостойкостью и водонепроницаемостью

Марка бет. см.	F75 и менее	Марка по морозостойкости				Марка по водонепроницаемости			
		F100 и F150	F200	F300	F400 и более	W2	W4	W6	W8 и более
П2	260	300	370	400	455	300	330	400	455
П1	240	280	340	380	430	280	310	380	430
Ж1	220	260	325	360	405	260	290	360	405
Ж2	210	245	300	335	385	245	270	335	385

Табл. 15. Увеличение водопотребности бетонной смеси за счёт введения минеральной добавки

Вид добавки	Расход добавки, кг/м <sup>3</sup>	В л/м <sup>3</sup> при расходе цемента в кг/м <sup>3</sup>		
		Менее 200	200–300	Более 300
Зола и гранулированные топливные шлаки	Менее 100	0	0–5	5–15
	100–200	0–10	5–20	10–30
	200–300	5–20	15–40	-
Гранулированные доменные и электротермофосфорные шлаки	Менее 100	0	0–5	5–10
	100–200	0–5	5–10	10–20
	200–300	5–10	10–20	20–30

лезобетонных изделий по кассетной технологии — в табл.12. Базовые нормы расхода цемента для изделий из мелкозернистых бетонов приведены в табл.13.

Нормы регламентируют содержание цемента в 1 м<sup>3</sup> бетона изделий и конструкций в плотном теле, обеспечивающее ему заданные свойства, предусмотренные проектной документацией. Нормы определяют чистый расход цемента в бетоне и не включают производственные потери цемента при его транспортировке, хранении и применении. Окончательные нормы устанавливаются умножением базовой нормы на корректирующий коэффициент, учитывающий проектные характеристики бетона, свойства материалов и технологические особенности производства.

Корректирующий коэффициент является произведением отдельных коэффициентов:

$$K = K_1 \cdot K_2 \cdot K_3 \cdot K_4 \dots K_i, \quad (10)$$

где  $K_i$  — коэффициенты, учитывающие колебания показателей качества материалов и технологических режимов, определяют по СНиП 82-02-95.

Базовые нормы расхода цемента определены из условия, что твердение бето-

на монолитных конструкций происходит в естественных условиях при температуре 15...25 °С с предотвращением влагопотерь.

Для бетонов, к которым предъявляются требования по морозостойкости и водонепроницаемости, типовые элементные нормы (ТЭН) приведены в табл. 14 с условием обязательного применения воздухововлекающих, газообразующих или комплексных добавок.

В качестве ТЭН следует принимать расход, который окажется наибольшим при сопоставлении с ТЭН, полученными умножением базовой нормы на все необходимые коэффициенты, и ТЭН, указанными в табл. 14.

Если расчетный расход цемента не превышает хотя бы один из максимально допустимых расходов цемента по [14], то можно переходить к следующему этапу расчета — определению расхода заполнителей. Если же расчетный расход выше ТЭН, то необходимо предусмотреть одно или несколько мероприятий по снижению расхода цемента:

1. Повысить марку цемента в пределах допустимого по табл.1.

2. Использовать добавки пластификаторов или суперпластификаторов. Добавки жидких гиперпластификаторов на основе

эфиров поликарбоксилатов при концентрации около 50% вводят в количестве от 0,5 до 2,0% от массы цемента, что обеспечивает водоредуцирование на 20...45%. Дозировки суперпластификаторов (типа СП-1) составляют 0,3...0,8% в расчете на сухое вещество от массы цемента и позволяют уменьшить количество воды затворения на 20...30% от первоначального без изменения удобоукладываемости бетонной смеси. Сильнопластифицирующие добавки (типа ЛСТМ-2, МЛСТ) вводят в количестве 0,15...0,25%, что снижает количество воды затворения для получения равноподвижных бетонных смесей на 15...20%. Добавки среднепластифицирующие (типа ЛСТ) также вводятся в количестве 0,15...0,25% от массы цемента и снижают водопотребность бетонной смеси на 10...15%.

3. Заменить часть цемента золой — унос тепловых электростанций, удовлетворяющей требованиям [17]. По [8] при использовании портландцемента типа ЦЕМ 1 золой может быть заменено до 33% цемента, а минимальный расход цемента для бетонов, эксплуатирующихся в соответствующих средах (табл. 8,10) может быть снижен на величину, получаемую умножением минимально допустимого содержания цемента (200 кг/м<sup>3</sup>) на 0,2 для ЦЕМ1 класса 32,5 и на величину 0,4 для ЦЕМ1 класса 42,5 и выше. При этом количество вяжущего (цемент + зола) должно быть не менее указанных в табл.8, 10.

По [9] расход цемента с минеральной добавкой рассчитывается по формуле:

$$C_1 = \frac{P_0 / \rho_n + C_0 / \rho_c - D_1 / \rho_d - \Delta B}{1 / \rho_c + P_0 / C_0 \rho_n}, \quad (11)$$

где  $C_0, P_0$  — расходы цемента и песка в составе бетона без добавок, кг,  $C_1, D_1$  — расходы цемента и добавки в составе бетона с добавкой, кг,

$\rho_c, \rho_n, \rho_d$  — плотности цемента, добавки, песка, кг/л,

$\Delta B$  — увеличение водопотребности бетонной смеси л/м<sup>3</sup> за счёт введения добавки, определяется по табл.15.

При совместном введении минеральной и водоредуцирующей добавок  $\Delta B = 0$ . Зная  $C_0$  и  $C_1$ , можно определить уменьшение расхода цемента в кг на 1 м<sup>3</sup> бетона за счёт введения минеральной добавки.

4. Ввести отвечающую требованиям соответствующих нормативов (например ТУ 5743-048-03495332) добавку микрокремнезема (МК) — отход производства ферросилиция. Дозировка этой добавки допускается не более 10% от массы портландцемента и не более 6% от массы шлакопортландцемента. На каждый процент добавки микрокремнезема совместно с суперпластификатором может быть снижен расход цемента до 2% от исходного.

Табл. 16.

Расход цемента, кг на 1 м <sup>3</sup> бетона	Величина $r$ при наибольшей крупности щебня, мм		
	10	20	40
200	0,45	0,42	0,39
300	0,42	0,39	0,36
400	0,39	0,36	0,33
500	0,36	0,33	0,30
600	0,33	0,30	0,27

Примечания к таблице 16:

1. Таблица составлена для песка с  $M_k = 2$  и для щебня. При увеличении или уменьшении  $M_k$  на  $\pm 0,5$  доля песка увеличивается или уменьшается на 0,03.
2. При использовании гравия доля песка уменьшается на 0,05.
3. Для бетонных смесей жесткостью более 20 с доля песка уменьшается на 0,04, а при подвижных бетонных смесях осадкой конуса не менее 10 см доля песка увеличивается на 0,04.

По [8] вводимое количество МК учитывается как заменитель цемента для снижения его расхода при условии, что его количество не превышает 11% от массы цемента. При применении цемента типа ЦЕМ1 в сочетании с микрокремнезёмом расход цемента определяется:

$$C_1 = C_0 - K \cdot МК, \quad (12)$$

где  $C_1$  и  $C_0$  — расходы цемента в кг с добавкой и без добавки микрокремнезёма,  $K$  —  $K$ -фактор, который принимается: при  $V/C \leq 0,45$   $K=2$ , при  $V/C > 0,45$  также  $K=2$ , за исключением сред эксплуатации бетона ХС и XF, для которых  $K=1$ .

Общий расход вяжущего, определяемый по формуле  $C_1 + K \cdot МК$ , должен быть не менее минимальной величины по табл. 8, 10. Если минимальный расход цемента в бетоне для соответствующих сред эксплуатации составляет 300 кг и менее, то эту величину при введении МК допускается уменьшать не более чем на 30 кг, независимо от значений, полученных путём указанных выше вычислений.

При выборе способа снижения расхода цемента необходимо руководствоваться не только техническими, но и экономическими соображениями, учитывая стоимость используемых минеральных и химических добавок. Помимо экономии цемента минеральные добавки позволяют:

- повысить однородность, нерасслаиваемость, удобоукладываемость и сохраняемость бетонных смесей,
- увеличить жаростойкость, сульфатостойкость, морозостойкость, водостойкость и стойкость к щелочной коррозии бетона, уменьшить экзотермию бетона,
- снизить себестоимость бетона,
- утилизировать промышленные отходы.

После выбора способа снижения расхода цемента необходимо откорректировать расход воды и цемента (при использовании добавок пластификаторов), или  $V/C$ ,  $V$ ,  $C$  (при повышении марки цемента), или только  $C$  — при использовании минеральных добавок.

Расход раствора добавки ( $A$ ) рабочей концентрации, л на 1 м<sup>3</sup> бетона,

$$A = \frac{C \cdot C}{K \cdot П}, \quad (13)$$

где  $C$  — расход цемента, кг на 1 м<sup>3</sup> бетона;  $C$  — дозировка добавки, % от массы цемента;

$K$  — концентрация рабочего раствора добавки, %;

$П$  — плотность рабочего раствора добавки, кг/л.

Количество воды ( $V_D$ ), которое вводится с раствором добавки рабочей концентрации,

$$V_D = A \cdot П(1 - 0,01 \cdot K), \quad (14)$$

Абсолютный объём заполнителей, л,

$$V_3 = 1000 - \frac{B}{\rho_B} - \frac{C}{\rho_C} - BB, \quad (15)$$

где  $\rho_B$  — плотность воды, кг/л;

$\rho_C$  — плотность цемента, кг/л;

$BB$  — объём вовлеченного воздуха, л.

Долю песка в смеси заполнителей по абсолютному объёму ( $r$ ) выбирают в зависимости от расхода цемента и наибольшей крупности заполнителей по табл.16 с учетом удобоукладываемости бетонной смеси и крупности песка.

Расход песка ( $П$ ) в кг на 1 м<sup>3</sup> бетона

$$П = V_3 \cdot r \cdot \rho_П \quad (16)$$

Расчет крупного заполнителя ( $Щ$ ) в кг на 1 м<sup>3</sup> бетона

$$Щ = V_3(1-r) \rho_{Щ}, \quad (17)$$

При наибольшей крупности более 10 мм определяют расход отдельных фракций крупного заполнителя. Содержание отдельных фракций в крупном заполнителе в составе бетона должно соответствовать требованиям [3].

Расчетная средняя плотность уплотненной бетонной смеси

$$\rho_{БС} = \frac{C + B + П + Щ + D}{1} \quad (\text{кг/м}^3), \quad (18)$$

где  $D$  — расход сухой добавки, кг.

Коэффициент выхода бетонной смеси

$$\beta = \frac{1000}{\left[ \left( C / \rho_C^a \right) + \left( П / \rho_П^a \right) + \left( Щ / \rho_Щ^a \right) \right]}, \quad (19)$$

где  $\rho_n$  — насыпные плотности соответственно цемента, песка и крупного заполнителя, кг/л.

После расчёта номинального состава бетона рекомендуется [1] рассчитать ещё дополнительные составы с отклонением варьируемых параметров ( $C/B$ , доля песка в смеси заполнителей, расход добавки) на 15–30% от расчётных значений в боль-

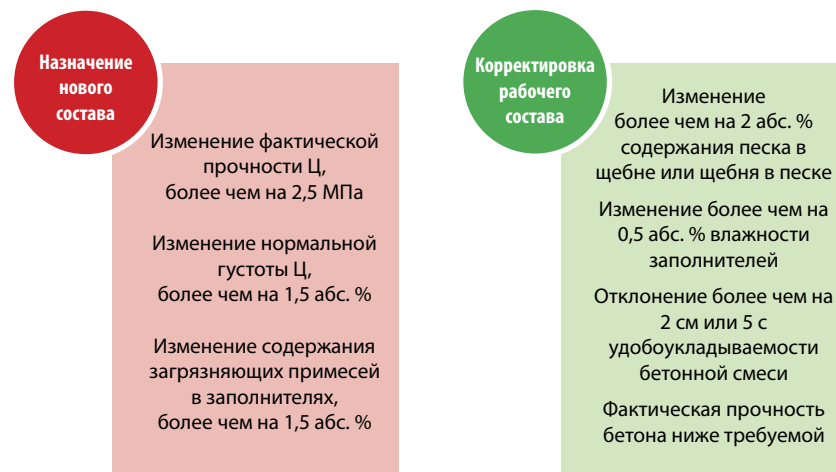


Рис. 4. Условия назначения нового состава или корректировки рабочего состава бетона.

шую и меньшую стороны. Затем приготавливают опытные замесы по начальному и дополнительному составам, с использованием материалов с положительной температурой, характеристики которых были приняты при расчёте составов. Объём каждого замеса должен не менее чем на 10% превышать объём проб, используемых для контроля свойств бетонной смеси и бетона.

Материалы следует дозировать по массе с погрешностью не более 1%, вода и растворы добавок дозируются по массе или объёму. Бетонную смесь, не удовлетворяющую требованиям задания по удобоукладываемости, допускается корректировать при вторичном перемешивании с добавлением необходимых компонентов, при корректировке по другим параметрам замес повторяется с изменёнными расходами материалов.

После получения бетонной смеси с заданными свойствами определяют её плотность в уплотнённом состоянии по [18] и для каждого состава рассчитывают фактический расход материалов на 1 м<sup>3</sup> бетона:

$$C = \frac{\rho_{cm}}{\Sigma g} g_u, P = \frac{\rho_{cm}}{\Sigma g} g_n, \Sigma C = \frac{\rho_{cm}}{\Sigma g} g_{\Sigma}, B = \frac{\rho_{cm}}{\Sigma g} g_v, \quad (20)$$

где  $C, P, \Sigma C, B$  — расходы в кг цемента, мелко- и крупного заполнителей, воды на 1 м<sup>3</sup> бетона,

$g_u, g_n, g_{\Sigma}, g_v$  — масса в кг цемента, мелко- и крупного заполнителей, воды в замесе,  $\rho_{cm}$  — средняя плотность уплотнённой бетонной смеси, кг/м<sup>3</sup>,

$\Sigma g$  — суммарная масса в кг всех материалов в замесе.

Из общего числа составов бетона выбирают составы с минимальной водопотребностью или расходом вяжущего, из них изготавливают образцы для определения прочности бетона по [19]. Режим твердения образцов бетона должен соответствовать принятому режиму бетона в конструкциях.

По результатам испытаний бетонной смеси и бетона рассчитанных составов устанавливают необходимые зависимости свойств бетонной смеси от параметров состава или расхода материалов, а также строят график зависимости прочности бетона от основного параметра, которые используют в дальнейшем для назначения и корректировки рабочих составов.

По графику зависимости прочности бетона от основного параметра определяют значение этого параметра ( $C/B$ ), соответствующего требуемой прочности бетона, пересчитывают состав исходя из найденного значения  $C/B$  и проверяют его соответствие всем другим нормируемым по-

казателям качества (плотности, водонепроницаемости, морозостойкости и др.). При положительных результатах испытаний подобранный состав бетона принимают за рабочий.

Если же состав бетона отвечает требованиям по прочности и не обеспечивает другие показатели качества, то производят новый подбор состава с применением технологических приёмов (водоредуцирование, применение химических и минеральных добавок и др.), обеспечивающих получение всех показателей качества бетона без увеличения расхода цемента.

По [1] при изменении качества материалов, свойств бетонной смеси и бетона необходимо изменить рабочий состав бетона (рис. 4).

Расход заполнителей и воды в рабочем составе с учётом фактической влажности заполнителей и содержания песка в крупном заполнителе или крупного заполнителя в песке определяют:

$$Z_i = Z_i^0 (1 + W_i/100), \quad (21)$$

$$B = B^0 - \Sigma Z_i W_i / 100, \quad (22)$$

$$\bar{P} = \frac{P(1 - P_{\Sigma}) - \Sigma P_{\Sigma}}{1 - P_{\Sigma} - \Sigma P_n}, \quad (23)$$

$$\bar{\Sigma C} = \frac{\Sigma C - (1 - P_n) - P_{\Sigma}}{1 - P_{\Sigma} - \Sigma P_n}, \quad (24)$$

где  $Z_i$  — расход заполнителей, кг,  $B$  — расход воды, кг,  $W_i$  — влажность по массе  $i$ -й фракции заполнителя, %,

$Z_i^0$  — расход по номинальному составу сухого заполнителя  $i$ -й фракции, кг,

$B^0$  — расход воды по номинальному составу, кг,

$\bar{P}, \bar{\Sigma C}$  — расходы мелко- и крупного заполнителей с учётом содержания песка в крупном заполнителе ( $P_{\Sigma}$ ) и крупного заполнителя в песке ( $\Sigma P_n$ ) в долях от массы,

$P, \Sigma C$  — расход в кг песка и крупного заполнителя по номинальному составу.

Рабочие дозировки материалов для приготовления бетонной смеси рассчитывают по формуле:

$$D_i = \beta V_{cm} P_i, \quad (25)$$

где  $D_i$  — доза  $i$ -го материала (цемента, мелко- и крупного заполнителей, воды, добавок) на замес, кг,

$\beta$  — коэффициент выхода бетонной смеси,

$V_{cm}$  — объём смесителя по загрузке, м<sup>3</sup>,

$P_i$  — расход  $i$ -го материала в кг на 1 м<sup>3</sup> бетона.

### Литература

- ГОСТ 27006–86 Бетоны. Правила подбора состава.
- ГОСТ 10178–85 Портландцемент и шлакопортландцемент. Технические условия.
- ГОСТ 26633–2011 Бетон тяжелый и мелкозернистый. Технические условия.
- ГОСТ 22266–94 Цементы сульфатостойкие. Технические условия.
- ГОСТ 22236–85 Цементы. Правила приёмок.
- ГОСТ 30515–97 Цементы. Общие технические условия.
- ГОСТ 31108–2003 Цементы общестроительные. Технические условия.
- EN 206–1 Бетоны.
- Рекомендации по подбору составов тяжелых и мелкозернистых бетонов (к ГОСТ 27006–86).-М.:ЦИТП,1990.-72с.
- СНиП 3.09.01–85 Производство сборных железобетонных конструкций и изделий.
- ГОСТ 24211–91 Добавки для бетонов. Общие технические требования.
- ГОСТ 18105–2010 Бетоны. Правила контроля и оценки прочности.
- Баженов Ю. М. Технология бетона. Учебник. — М.: Изд-во АСВ, 2003.—500 с.
- Дворкин Л. И., Дворкин О. Л. Основы бетоноведения. — ООО «Строй-Бетон», Санкт-Петербург, 2006.—689 с.
- СНиП 82-02-95 Федеральные ( типовые) элементные нормы расхода цемента при изготовлении бетонных и железобетонных изделий и конструкций.
- СНиП 2.03.11–85 Защита строительных конструкций от коррозии.
- ГОСТ 25818–91 Золы уноса тепловых электростанций для бетонов. Технические условия.
- ГОСТ 10181–2000 Смеси бетонные. Методы испытания.
- ГОСТ 10180–90 Бетоны. Методы определения прочности по контрольным образцам.