

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования

«МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
СТРОИТЕЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра строительных материалов

**МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ
К ВЫПОЛНЕНИЮ РАСЧЕТНО-ГРАФИЧЕСКОЙ
РАБОТЫ ПО ТЕМЕ «БЕТОН»**

для студентов всех направлений и уровней подготовки

Москва 2015

УДК 691.32
ББК 38.3
С30

Составители:

доцент, канд. техн. наук Семенов В.С.
профессор, канд. техн. наук Ефимов Б.А.
профессор, канд. техн. наук Сканави Н.А.

Под редакцией:

профессора, доктора тех. наук Орешкина Д.В.

Рецензент:

профессор, доктор техн. наук Бурьянов А.Ф.
Кафедра технологии вяжущих веществ и бетонов МГСУ

Настоящие методические указания предназначены для выполнения расчетно-графической работы (РГР) по теме «Бетон». Изложены общие сведения об основном конструкционном материале – бетоне. Даны теоретические основы и приведен порядок определения лабораторного и рабочего составов бетона, дозировок компонентов на замес бетоносмесителя, температуры подогрева заполнителей при бетонировании в зимний период. Приведена методика корректировки состава бетона при изменении марки вяжущего, сроков достижения требуемой прочности. Даны необходимые справочные материалы. Рассмотрен пример выполнения РГР. Для подготовки к защите РГР приведены контрольные вопросы.

Для студентов всех направлений и уровней подготовки, изучающих дисциплины «Строительные материалы», «Материаловедение».

ВВЕДЕНИЕ

Бетон – это искусственный каменный строительный материал, получаемый в результате затвердевания рационально подобранной, тщательно перемешанной и уплотненной смеси, состоящей из вяжущего вещества, заполнителей, воды и добавок. До момента укладки эта смесь называется **бетонной смесью**, после укладки и уплотнения – **свежеуложенным бетоном**, после затвердевания – **бетоном**. Бетон является универсальным долговечным материалом при условии, что компоненты и его состав подобраны с учетом условий эксплуатации конструкции. Несоблюдение этого правила может привести к преждевременному разрушению бетона. Например, бетоны на портландцементе оказываются нестойкими в морской и пресной проточной воде, сильно засоленных грунтах, на ряде промышленных предприятий. Находящиеся в окружающей среде соли, кислоты и щелочи взаимодействуют с продуктами гидратации цемента и постепенно разрушают цементный камень. Поэтому выбор материалов для изготовления бетона и подбор его состава нужно производить обязательно с учетом эксплуатационных условий.

В настоящих методических указаниях рассматривается методика подбора состава тяжелого бетона на портландцементе (и его разновидностях) на плотных заполнителях – наиболее распространенного в современном строительстве, твердеющего в нормальных условиях.

Бетон имеет неоднородное, конгломератное строение. На плоскости разреза бетона хорошо видны невооруженным глазом зерна крупного и мелкого заполнителей на фоне цементной матрицы, скрепляющей эти зерна. Изменяя крупность, форму зерен и соотношение крупного и мелкого заполнителей, расход цемента и воды, можно получать бетоны, значительно отличающиеся по свойствам – прочности, морозостойкости, водонепроницаемости, трещиностойкости, усадке. Оптимальным для конкретных условий эксплуатации является состав бетона, удовлетворяющий техническим требованиям строительства и обладающий вместе с тем наименьшей стоимостью. Наиболее дорогостоящим компонентом бетона является цемент. Поэтому стремятся подобрать такой состав бетонной смеси, который обеспечивает получение бетона с минимальным расходом цемента. Кроме того, бетон должен обладать необходимой однородностью свойств и их стабильностью во времени. Отсюда следует, что определение состава бетона является важной технико-экономической задачей.

Задание на определение состава бетона должно содержать требуемые показатели качества бетонной смеси и бетона для конкретной конструкции и условия ее эксплуатации, данные о режиме изготовления и твердения бетона, ограничения по составу бетона и качеству материалов, а также характеристики материалов, используемых для приготовления бетона [7].

Состав бетона рассчитывают исходя из среднего уровня прочности при её фактической однородности (требуемой прочности) [7]. **Требуемая прочность бетона** – минимально допустимое среднее значение прочности бетона в партии изделий, соответствующее нормируемой прочности бетона при её фактической однородности [8]. Для определения требуемой прочности бетона необходимо знать нормируемую прочность бетона (класс бетона, установленный проектом) и фактический коэффициент вариации прочности бетона. В случае, если данные о фактической однородности прочности бетона отсутствуют, средний уровень прочности принимают равным требуемой прочности бетона данного класса при нормативном коэффициенте вариации (для тяжелого бетона – 13,5%) [7].

Подбор состава бетона включает: определение номинального состава, расчет и корректировку рабочего состава, расчет и передачу в производство рабочих дозировок [7].

Подбор **номинального состава** бетона производят при организации производства новых видов конструкций, изменении нормируемых показателей качества бетона или бетонной смеси, технологии производства, характеристик применяемых материалов.

Подбор номинального состава бетона включает:

- выбор и определение характеристик исходных материалов;
- расчет **начального состава**;
- расчет **дополнительных составов** бетона с параметрами составов, отличающихся от принятых в начальном составе в большую и меньшую сторону на 15...30 % (варьируется цементно-водное отношение, соотношение крупного и мелкого заполнителей, расход добавок);
- изготовление пробных замесов начального и дополнительных составов, испытание бетонной смеси, изготовление образцов и их испытание по всем показателям качества;
- обработка полученных результатов с установлением зависимостей, отражающих влияние параметров состава на нормируемые показатели качества бетонной смеси и бетона;

- назначение номинального состава бетона, обеспечивающего получение бетонной смеси и бетона требуемого качества при минимальном расходе вяжущего.

Рабочие составы бетона назначают при переходе на новый номинальный состав и далее при поступлении новых партий материалов тех же видов и марок, которые принимались при подборе номинального состава, с учетом их фактического качества. Корректировку рабочего состава производят, если по данным входного контроля качества заполнителей и операционного контроля производства установлено изменение качества материалов или качества получаемой бетонной смеси, а также в случае, если фактическая прочность бетона оказывается ниже требуемой.

Рабочую дозировку назначают по рабочему составу бетонной смеси с учетом объема приготавливаемого замеса.

Далее в производственных условиях определяют фактическую однородность прочности бетона и устанавливают требуемую прочность бетона при фактическом коэффициенте вариации согласно ГОСТ 18105–2010 [8]. При несоответствии их принятым значениям производят корректировку номинального и рабочего составов.

1. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАСЧЕТНО-ГРАФИЧЕСКОЙ РАБОТЫ

Для расчета начального состава бетона необходимо знать:

- Вид, назначение и условия эксплуатации конструкции;
- Класс бетона (нормируемую прочность), данные об однородности прочности (коэффициент вариации), срок, к которому она должна быть достигнута;
- Удобоукладываемость бетонной смеси, выраженную осадкой стандартного конуса в сантиметрах или показателем жесткости в секундах;
- Условия уплотнения и твердения бетона;
- Зерновой состав заполнителей;
- Истинную и насыпную плотность цемента и заполнителей в сухом состоянии, насыпную плотность заполнителей в естественно-влажном состоянии, а также влажность заполнителей.

1. Определение состава бетона начинают с выбора и оценки характеристик материалов, используемых для изготовления бетона.

Рациональную марку цемента принимают в зависимости от проектного класса бетона по табл. 1. [9]

Таблица 1

Рациональные марки цемента для бетонов различных классов

Проектный класс бетона по прочности на сжатие	Марка цемента	
	Рекомендуемая	Допускаемая
B7,5	300	—
B10	300	400
B12,5	300	400
B15	400	300; 500
B20	400	300; 500
B22,5	400	500
B25	400	500
B30	500	400; 550
B35	500	550
B40	500	550
B45	550	—

В случае, если фактически применяемый цемент квалифицирован классом прочности, а в нормативной, проектной или иной документации или в составе бетонных смесей предусмотрено применение цемента, качество которого задано марками, для перехода от марки к классу можно пользоваться усредненным их соотношением, приведенным в табл. 2 [10].

Таблица 2

Усредненное соотношение между марками цемента по ГОСТ 10178–85 и классами прочности по ГОСТ 31108–2003

Марка цемента по ГОСТ 10178–85	Среднее соотношение $\frac{R_{31108}}{R_{10178}}, \%$	Класс прочности цемента по ГОСТ 31108–2003
300	76,9	22,5
400	87,3	32,5; 42,5
500	92,6	42,5
550	95,3	42,5; 52,5
600	98,2	52,5

Вид цемента назначают с учетом условий работы конструкций. В частности, при нормальных условиях эксплуатации, когда коррозионные воздействия исключены, рекомендуется использовать портландцемент, портландцемент с минеральными добавками, шлакопортландцемент. При наличии коррозионных воздействий следует

применять специальные цементы: сульфатостойкий портландцемент, пуццолановый портландцемент и др.

Истинную и насыпную плотность цемента можно принимать в пределах, указанных в табл. 3.

Таблица 3

Истинная и насыпная плотности цементов

Вид цемента	Истинная плотность, кг/дм ³	Насыпная плотность, кг/дм ³
Портландцемент	3,0...3,3	1,0...1,4
Шлакопортландцемент	2,8...3,1	1,1...1,4
Пуццолановый портландцемент	2,7...2,9	0,95...1,3

2. Основными техническими требованиями к мелкому заполнителю (песку) являются: зерновой состав, содержание пылевидных и глинистых частиц [11, 13].

Основными техническими требованиями к крупному заполнителю являются: зерновой состав, содержание зерен пластинчатой (лещадной) и игловатой формы, содержание пылевидных и глинистых частиц, марка по дробимости, марка по морозостойкости [11, 15].

Для оценки качества заполнителей необходимо определить соответствие их зернового состава требованиям стандартов, а также вычислить крупность песка и наибольшую крупность гравия или щебня. С этой целью для мелкого и крупного заполнителя по данным о частных остатках на ситах находят полные остатки A_i , %, равные сумме частных остатков на данном сите и на всех ситах с более крупными ячейками. По найденным полным остаткам строят графики зернового состава мелкого и крупного заполнителей, которые сопоставляют с требованиями стандартов (рис. 1 и 2).

Для построения графика зернового состава крупного заполнителя необходимо предварительно определить его наибольшую и наименьшую крупность. Наибольшая крупность D характеризуется размером отверстий сита, полный остаток на котором еще не превышает 10%, а наименьшая крупность d – размером отверстий первого из сит, полный остаток на котором составляет не менее 95% массы просеиваемой пробы.

Зерновой состав смеси фракций от 5 до 20 мм сопоставляют со стандартными требованиями, приведенными в табл. 4.

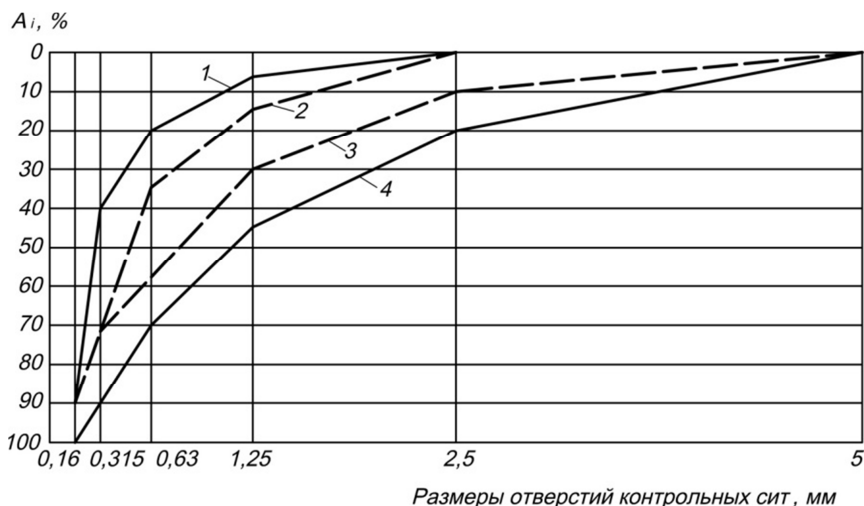


Рис. 1. График зернового состава песка:

1 – допускаемая нижняя граница крупности песка ($M_k=1,5$); 2 – рекомендуемая нижняя граница крупности ($M_k=2,0$) для бетонов класса В15 и выше; 3 – рекомендуемая нижняя граница ($M_k=2,5$) для бетонов класса В25 и выше; 4 – допускаемая верхняя граница крупности ($M_k=3,25$).



Рис. 2. График зернового состава отдельных фракций и смесей фракций крупного заполнителя

Таблица 4

Зерновой состав смеси фракций крупного заполнителя 5...20 мм

Диаметр отверстий контрольных сит, мм	Полные остатки на ситах, % по массе
5	95...100
10	60...75
20	До 10
25	До 0,5

По результатам сравнения делают выводы о соответствии (несоответствии) зернового состава заполнителей стандартным требованиям и указывают, для каких классов бетона может быть рекомендован песок.

Для оценки крупности песка вычисляют безразмерный показатель – модуль крупности M_K :

$$M_K = \frac{(A_{2,5} + A_{1,25} + A_{0,63} + A_{0,315} + A_{0,16})}{100} \quad (1)$$

где: A_i – полные остатки на соответствующих ситах, %.

По табл. 5 в зависимости от модуля крупности и полного остатка на сите 0,63 устанавливают группу песка по крупности.

От крупности песка зависит его водопотребность в бетонной смеси B_n . Значения B_n находят по рис. 3.

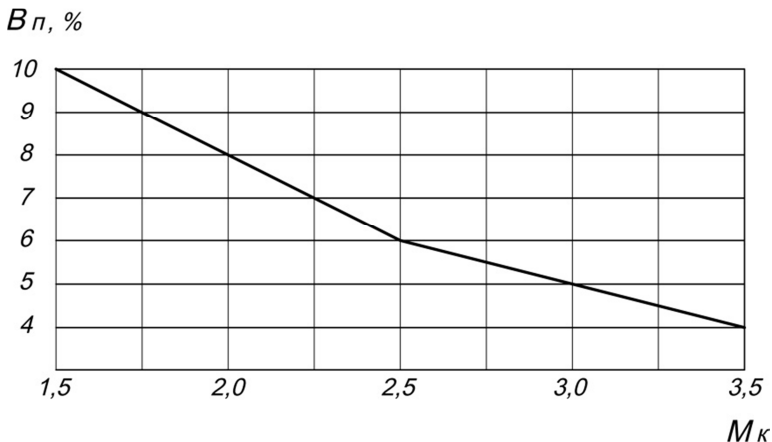


Рис. 3. Водопотребность песка в зависимости от модуля крупности

Таблица 5

Классификация песков по зерновому составу, пригодных для использования в тяжелом бетоне

Группа песка	Модуль крупности	Полный остаток на сите № 0,63, % по массе
Повышенной крупности	Св. 3,0 до 3,5	Св.65 до 75
Крупный	Св. 2,5 до 3,0	Св.45 до 65
Средний	Св. 2,0 до 2,5	Св.30 до 45
Мелкий	Св. 1,5 до 2,0	Св.10 до 30

Наибольшая крупность крупного заполнителя должна соответствовать размерам сечения и густоте армирования конструкции. Согласно рекомендациям [9], необходимо проверить выполнение двух условий:

- Наибольшая крупность заполнителя D должна быть не более $3/4$ наименьшего расстояния в свету между стержнями арматуры a :

$$D \leq \frac{3}{4} \cdot a;$$

- Наибольшая крупность заполнителя D должна быть не более $1/3$ минимального размера поперечного сечения конструкции b_{\min} :

$$D \leq \frac{1}{3} \cdot b_{\min}.$$

По результатам данной проверки формулируют вывод о соответствии (несоответствии) наибольшей крупности крупного заполнителя размерам сечения и характеру армирования конструкции.

3. Состав бетона рассчитывают исходя из требуемой прочности. Требуемую прочность бетона (МПа) определяют по формуле [8]:

$$R_T = K_T \cdot B_{\text{норм}} \quad (2)$$

где: $B_{\text{норм}}$ – заданное значение класса бетона по прочности;

K_T – коэффициент требуемой прочности, определяемый по табл. 6 [8] в зависимости от фактического коэффициента вариации прочности бетона. При отсутствии данных о фактической однородности прочности бетона (например, при организации нового производства), коэффициент требуемой прочности определяют по табл. 6 исходя из нормативного коэффициента вариации (для тяжелого бетона – 13,5%) – $K_T = 1,3$.

Таблица 6

Коэффициент требуемой прочности K_T для всех видов бетонов
(кроме плотных силикатных и ячеистых)

Средний коэффициент вариации прочности \bar{V} , %	6 и менее	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Коэффициент требуемой прочности K_T	1,07	1,08	1,09	1,11	1,14	1,18	1,23	1,28	1,33	1,38	1,43

Из формулы основного закона прочности бетона (формулы И. Болоея – Б.Г. Скрамтаева) определяют цементно-водное отношение, необходимое для получения бетона требуемой прочности. Формула основного закона прочности имеет вид:

$$R_{28} = A \cdot R_{ц} \cdot \left(\frac{Ц}{B} \pm 0,5 \right) \quad (3)$$

где: R_{28} – прочность бетона в возрасте 28 суток нормального твердения;

$R_{ц}$ – активность цемента или смешанного вяжущего. В случае, если неизвестна активность вяжущего, в формулу подставляется его марка;

A – коэффициент, учитывающий качество заполнителей (табл. 7).

На начальном этапе определения состава бетона цементно-водное отношение является неизвестной величиной, поэтому возникает вопрос выбора знака в формуле (3) – «+» или «-». Можно воспользоваться следующей зависимостью [5]:

$$\text{При } R_{28} \leq 1,2 R_{ц} - R_{28} = A \cdot R_{ц} \cdot \left(\frac{Ц}{B} - 0,5 \right) \quad (4)$$

$$\text{При } R_{28} > 1,2 R_{ц} - R_{28} = A_1 \cdot R_{ц} \cdot \left(\frac{Ц}{B} + 0,5 \right) \quad (5)$$

Высококачественными заполнителями считают щебень из плотных и прочных горных пород, песок оптимальной крупности; заполнители чистые, фракционированные, с оптимальным зерновым составом. К рядовым относят заполнители (в том числе гравий), отве-

чающие требованиям стандарта. Заполнителями пониженного качества являются низко-прочные щебень и гравий, мелкие пески.

Таблица 7

Значения коэффициентов качества заполнителей

Качество заполнителей	A	A ₁
Высокое	0,65	0,43
Рядовое	0,60	0,40
Пониженное	0,55	0,37

Для бетонов низкой и средней прочности из формулы (4) находят цементно-водное отношение:

$$\frac{Ц}{B} = \frac{R_T}{A \cdot R_{ц}} + 0,5 \quad (6)$$

где: R_T – требуемая прочность бетона.

Далее рассчитывают водоцементное отношение:

$$\frac{B}{Ц} = \frac{1}{Ц/B} \quad (7)$$

При определении состава бетона для конструкций, работающих в нормальных условиях эксплуатации, принимают рассчитанное водоцементное отношение, которое обеспечивает заданную прочность бетона. Однако в ряде случаев к конструкциям могут предъявляться дополнительные требования – по морозостойкости, водонепроницаемости, стойкости в агрессивных средах. Введение таких требований необходимо для обеспечения заданной долговечности бетона путем повышения его плотности. Плотность бетона в первом приближении находится в обратной зависимости от водоцементного отношения. Поэтому при расчете состава бетона, работающего в неблагоприятных условиях, следует учесть ограничения В/Ц по условиям прочности и долговечности.

4. Определяют расход воды (водопотребность бетонной смеси $B_{табл}$) в зависимости от требуемой удобоукладываемости бетонной смеси, вида и наибольшей крупности заполнителя по табл. 8.

Окончательный расход воды B , кг, рассчитывают, вводя поправку на водопотребность песка:

$$B = B_{табл} + (B_{п} - 7) \cdot 5 \quad (8)$$

где: $B_{табл}$ – расход воды, определяемый по табл. 8;

$B_{п}$ – водопотребность песка (см. рис. 3).

Таблица 8

Расход воды на 1 м³ бетона

Марка по удобоукладываемости	Осадка конуса, см	Показатель жесткости, с	Расход воды на 1 м ³ бетона, кг, при наибольшей крупности, мм,							
			гравия				щебня			
			10	20	40	70	10	20	40	70
Ж4	–	31...60	150	135	125	120	160	150	135	130
Ж3	–	21...30	160	145	130	125	170	160	145	140
Ж2	–	15...20	165	150	135	130	175	165	150	145
	–	10...15	175	160	145	140	185	175	160	155
Ж1		5...10	180	165	150	145	190	180	165	160
П1	2...4	–	190	175	160	155	200	190	175	170
П2	5...7	–	200	185	170	165	210	200	185	180
	8...10	–	205	190	175	170	215	205	190	185
П3	10...12	–	215	205	190	180	225	215	200	190
	12...16	–	220	210	197	185	230	220	207	195
П4	16...20	–	227	218	203	192	237	228	213	202

Примечания:

1. Табличные данные относятся к бетонной смеси, приготовляемой на песке средней крупности с водопотребностью $B_n=7\%$.
2. В случае применения пуццоланового портландцемента расход воды увеличивают на 15...20 кг.
3. При расходе цемента свыше 400 кг расход воды увеличивают на 1 кг на каждые 10 кг цемента сверх 400 кг.

Формула (8) учитывает изменение расхода воды при использовании песков с водопотребностью, отличающейся от 7% (поправка на расход воды в бетонной смеси составляет 5 кг на каждый процент изменения водопотребности песка).

Определив расход воды и взяв из формулы (6) значение Ц/В, вычисляют расход цемента по формуле:

$$Ц = B \cdot \frac{Ц}{B}. \quad (9)$$

Если расход цемента на 1 м³ бетона окажется меньше допускаемого (табл. 9), то следует увеличить его до требуемой нормы, сохранив прежнее Ц/В. Расход воды при этом пересчитывают, исходя из увеличенного расхода цемента.

Таблица 9

Минимальный расход цемента для изготовления железобетонных конструкций с ненапрягаемой арматурой, эксплуатируемых в неагрессивных средах [11]

Условия эксплуатации конструкции	Примеры сред эксплуатации	Вид и расход цемента, кг/м ³		
		ПЦ-Д0, ПЦ-Д5, ЦЕМ I, ЦЕМ I СС	ПЦ-Д20, ЦЕМ II, ЦЕМ II СС	ШПЦ, ЦЕМ III, ЦЕМ III СС, ЦЕМ IV, ЦЕМ V
Среда без признаков агрессии (ХО)	Внутри сухих помещений	150	170	180
Коррозия вследствие карбонизации (ХС)	Внутри влажных помещений, бетон, подвергающийся частому увлажнению или постоянно находящийся в воде, большинство фундаментов	200	220	240

5. Расход заполнителей определяют, принимая во внимание следующие условия:

а) объем плотно уложенного бетона, принимаемый в расчете равным 1м³ (1000 дм³), складывается из объема зерен мелкого и крупного заполнителей и объема цементного теста, заполняющего пустоты между зернами заполнителей. Это выражается уравнением абсолютных объемов:

$$\frac{Ц}{\rho_{ц}} + \frac{В}{\rho_{в}} + \frac{П}{\rho_{п}} + \frac{К}{\rho_{к}} = 1000 \quad (10)$$

б) для обеспечения требуемой удобоукладываемости бетонной смеси пустоты между зернами крупного заполнителя должны быть заполнены цементно-песчаным раствором с их некоторой раздвижкой:

$$\frac{Ц}{\rho_{ц}} + \frac{В}{\rho_{в}} + \frac{П}{\rho_{п}} = \alpha_{к} \cdot \frac{К}{\rho_{нк}} \cdot k_{р.з.} \quad (11)$$

где: Ц, В, П, К, – расходы цемента, воды, песка и крупного заполнителя, кг;

$\rho_{ц}, \rho_{в}, \rho_{п}, \rho_{к}$ – истинные плотности этих материалов, кг/дм³;

$\rho_{НК}$ – насыпная плотность крупного заполнителя, кг/дм³;

α_K – пустотность крупного заполнителя в рыхлонасыпном состоянии в долях единицы объема, вычисляемая по формуле:

$$\alpha_K = 1 - \frac{\rho_{НК}}{\rho_K} \quad (12)$$

$k_{p.з.}$ – безразмерный коэффициент раздвижки зерен крупного заполнителя цементно-песчаным раствором.

Решая совместно уравнения (10) и (11), получим формулы для определения расхода крупного заполнителя К, кг:

$$K = \frac{1000}{\frac{\alpha_K \cdot k_{p.з.}}{\rho_{НК}} + \frac{1}{\rho_K}} \quad (13)$$

и песка П, кг:

$$П = \left[1000 - \left(\frac{Ц}{\rho_{ц}} + \frac{В}{\rho_{в}} + \frac{К}{\rho_{к}} \right) \right] \cdot \rho_{п} \quad (14)$$

Значение коэффициента раздвижки зерен в формуле (13) находят с учетом заданного показателя удобоукладываемости бетонной смеси. Если смесь жесткая, $k_{p.з.}$ принимают в пределах 1,05...1,15. Чем больше показатель жесткости Ж, тем меньшим должно быть значение $k_{p.з.}$. В среднем значение коэффициента раздвижки зерен для жестких смесей составляет 1,1.

Для подвижных бетонных смесей, характеризующихся осадкой конуса ОК, значения $k_{p.з.}$, определяют в зависимости от объема цементного теста и водопотребности песка. Вначале рассчитывают объем цементного теста $V_{цт}$ по формуле:

$$V_{цт} = \frac{Ц}{\rho_{ц}} + \frac{В}{\rho_{в}} \quad (15)$$

Далее по графику (рис. 4) находят начальное значение коэффициента раздвижки $k'_{p.з.}$ и корректируют его с учетом водопотребности песка:

$$k_{p.з.} = k'_{p.з.} + (7 - B_{\Pi}) \cdot 0,03 \quad (16)$$

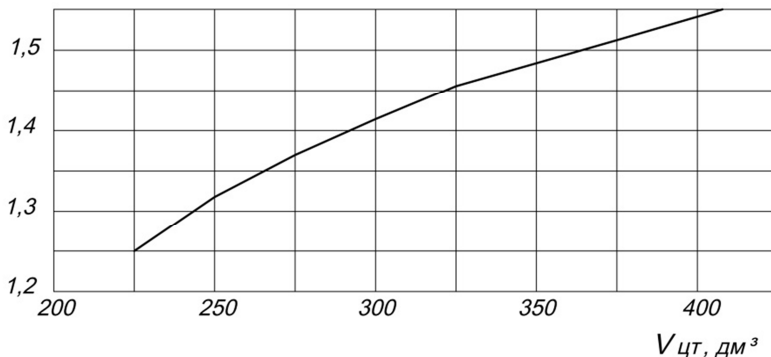


Рис. 4. Значения $k'_{p.з.}$ для подвижных бетонных смесей, приготовляемых с применением песка средней крупности ($B_{\Pi}=7\%$)

На этом заканчивается расчет начального состава бетона. Расходы цемента, воды, крупного и мелкого заполнителей записывают отдельно. При сложении их получают теоретическую среднюю плотность смеси, выраженную в кг/м^3 .

6. Состав бетона можно выразить в относительных единицах по массе или объему. В этом случае за единицу принимают массу или объем цемента, выражая количество других компонентов по отношению к цементу.

Состав бетона по массе:

$$\frac{Ц}{Ц} : \frac{B}{Ц} : \frac{П}{Ц} : \frac{K}{Ц} = 1 : \frac{B}{Ц} : \frac{П}{Ц} : \frac{K}{Ц} \quad (17)$$

где: Ц, В, П, К – расходы цемента, воды, песка и крупного заполнителя в килограммах на 1м^3 бетона.

Состав бетона по объему:

$$\frac{V_{Ц}}{V_{Ц}} : \frac{V_{B}}{V_{Ц}} : \frac{V_{П}}{V_{Ц}} : \frac{V_{K}}{V_{Ц}} = 1 : \frac{V_{B}}{V_{Ц}} : \frac{V_{П}}{V_{Ц}} : \frac{V_{K}}{V_{Ц}} \quad (18)$$

где: $V_{Ц}$, $V_{П}$, V_{K} – объемы цемента, песка и крупного заполнителя в рыхлонасыпном состоянии (дм^3) на 1м^3 бетона, V_{B} – объем воды (дм^3) на 1м^3 бетона.

$$V_{Ц} = \frac{Ц}{\rho_{\text{нц}}} ; V_{B} = \frac{B}{\rho_{B}} ; V_{П} = \frac{П}{\rho_{\text{нп}}} ; V_{K} = \frac{K}{\rho_{\text{нк}}} \quad (19)$$

где: ρ_B – плотность воды, принимаемая равной 1 кг/дм³;

$\rho_{нц}$, $\rho_{нп}$, $\rho_{нк}$ – насыпные плотности цемента, песка и крупного заполнителя.

7. Расчет состава бетона производят, исходя из условия, что заполнители сухие. Полученный состав называют лабораторным. В действительности песок и крупный заполнитель всегда содержат некоторое количество воды, что необходимо учитывать при назначении рабочего состава бетона. В этом случае определяют влажность заполнителей, рассчитывают массу воды, содержащейся в заполнителях, и на эту величину уменьшают массу добавляемой в бетонную смесь воды, повышая на эту же величину расход заполнителей. Количественно рабочий состав бетона отличается от лабораторного, но фактически количество воды и сухих компонентов в бетоне остается прежним – как и в лабораторном составе.

8. При назначении дозировки материалов на замес бетоносмесителя следует учитывать, что объем готовой бетонной смеси будет меньше суммарного объема исходных сыпучих компонентов в рыхлонасыпном состоянии вследствие уменьшения объема смеси при перемешивании. Это происходит потому, что зерна разного размера при перемешивании равномерно распределяются в объеме бетонной смеси – зерна цемента располагаются в пустотах между зернами песка, зерна песка – между зернами щебня. Если назначить дозировку компонентов лишь исходя из объема бетоносмесителя, суммарный объем этих компонентов в рыхлонасыпном состоянии превысит объем бетоносмесителя. Поэтому в расчет необходимо ввести поправку – коэффициент выхода бетона:

$$\beta = \frac{1000}{V'_ц + V'_п + V'_к} \quad (20)$$

где: $V'_ц$, $V'_п$, $V'_к$ – объемы цемента, песка и крупного заполнителя в рыхлонасыпном состоянии (дм³) на 1м³ бетона по рабочему составу.

Коэффициент выхода всегда меньше единицы и находится в пределах 0,6...0,75 в зависимости от пустотности заполнителей и состава бетона. То есть коэффициент выхода показывает, какую часть объема бетоносмесителя занимает перемешанная бетонная смесь.

9. Зная коэффициент выхода бетона, можно рассчитать дозировку материалов в рабочем состоянии на замес бетоносмесителя объемом V :

$$\begin{aligned} C'_V &= \frac{\beta \cdot V}{1000} C'; \quad B'_V = \frac{\beta \cdot V}{1000} B'; \\ P'_V &= \frac{\beta \cdot V}{1000} P'; \quad K'_V = \frac{\beta \cdot V}{1000} K' \end{aligned} \quad (21)$$

где: C'_V, B'_V, P'_V, K'_V – расходы цемента, воды, песка и крупного заполнителя по рабочему составу на замес бетоносмесителя вместимостью V , кг;

C', B', P', K' – расходы цемента, воды, песка и крупного заполнителя на 1 м³ бетона по рабочему составу, кг.

Объем бетона в замесе определяется по формуле:

$$V_3 = \beta \cdot V \quad (22)$$

10. При производстве работ в зимнее время и в межсезонье, когда среднесуточная температура воздуха опускается ниже +5°C, для обеспечения нормального набора прочности в начальные сроки твердения бетона требуется применять методы зимнего бетонирования. Они направлены на обеспечение условий для набора бетоном как минимум критической прочности (30...50% проектной в зависимости от класса бетона), а для большинства несущих конструкций – 50...70% проектной прочности в возможно короткие сроки. Замораживание бетона в начальные сроки твердения приводит к нарушению его структуры, снижению прочности и эксплуатационных свойств. Считается, что замораживание бетона, набравшего критическую прочность, существенно не сказывается на его свойствах.

Бетонная смесь при укладке в опалубку должна иметь температуру, определяемую расчетом для конкретного метода зимнего бетонирования, и не ниже +5°C. Хранящиеся на открытых складах заполнители имеют отрицательную температуру. Цемент, находящийся в силосных банках, также остывает. Поэтому возникает необходимость подогрева заполнителей и воды с тем, чтобы получить требуемую температуру бетонной смеси. Заполнители подогревают до температуры не выше 60°C. Воду нагревают до температуры 60...90°C. Подогрев цемента запрещается. Температура бетонной смеси при таких условиях оказывается в пределах до +45°C.

Температуру подогрева заполнителей можно непосредственно определить из уравнения теплового баланса, которое составляют из условия, что теплота от остывания воды передается цементу и заполнителям:

$$\begin{aligned} c_B \cdot B \cdot (t_{B.П.} - t_{B.C.}) = \\ = C_{Ц} \cdot Ц \cdot (t_{B.C.} - t_{H.Ц.}) + c_3 \cdot (П + К) \cdot (t_{B.C.} - t_3) \end{aligned} \quad (23)$$

где: c_B , $c_{Ц}$, c_3 – удельные теплоемкости воды, цемента и заполнителей соответственно; для практических целей можно принять,

что $c_{Ц} = c_3 = 0,84 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot ^\circ\text{C}}$, $c_B = 4,2 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot ^\circ\text{C}}$;

$Ц$, B , $П$, $К$ – расходы материалов на 1 м³ бетона, кг;

$t_{B.П.}$ – температура, до которой подогревают воду, °С;

$t_{B.C.}$ – заданная температура бетонной смеси, °С;

$t_{H.Ц.}$ – начальная температура цемента, °С;

t_3 – определяемое значение температуры подогрева заполнителей, °С.

Для упрощения вычислений можно вместо $Ц$, B , $П$ и $К$ подставить в уравнение теплового баланса соответствующие им части из выражения состава бетона в относительных единицах по массе (см. п. 6). Как видно из формулы (23), конечная температура подогрева заполнителей с достаточной для практических целей точностью может быть определена и без знания их начальной температуры и состояния, которые необходимо учитывать при более точных методах расчета.

11а. В случае, если на строительство поступает цемент другой марки, отличной от определенной в п. 1, необходимо для обеспечения заданной прочности внести в состав бетона изменения. В первую очередь они касаются расхода цемента, хотя расходы песка и крупного заполнителя также следует корректировать. Здесь могут встретиться два варианта.

Вариант первый: марка цемента превышает наибольшую из указанных в табл. 1 для данного класса бетона. Это вызывает необходимость понизить активность высокомарочного цемента путем тщательного смешивания его с тонкомолотой добавкой-наполнителем (доменный гранулированный шлак, зола ТЭС, известняк, каменная

мука и др.). В противном случае, когда для бетона низких классов используют высокомарочный неразбавленный добавкой цемент, расход его, определенный из условия прочности бетона, может оказаться ниже минимально допускаемого, указанного в табл. 9, и придется добавлять дорогостоящий цемент до рекомендуемого минимума с целью обеспечения плотности бетона, что нерационально.

При введении добавки-наполнителя получается смешанное вяжущее, активность которого убывает пропорционально количеству добавки. Содержание добавки в смешанном вяжущем a , доли единицы, можно определить по формуле:

$$a = \frac{R_{II} - R_{CM}}{R_{II}} \quad (24)$$

где: R_{II} – активность (марка) разбавляемого цемента;

R_{CM} – активность смешанного вяжущего, соответствующая рекомендуемой в табл. 1 марке цемента.

Вариант второй: марка цемента ниже рекомендуемой. В этом случае никаких минеральных добавок в цемент вводить не нужно, а расчет следует вести обычным порядком, используя новую марку цемента.

116. Часто прочность бетона, исходя из условий строительного производства, должна быть достигнута не в тот срок, который указан в задании, а в другой. При этом требуется определить изменение расхода цемента. В этом случае заданную прочность бетона в срок n дней следует привести к той прочности, которой будет обладать бетон в возрасте 28 дней при помощи логарифмической зависимости:

$$\frac{R_{28}}{R_n} = \frac{\lg 28}{\lg n}, \text{ или } R_{28} = R_n \cdot \frac{\lg 28}{\lg n} \quad (25)$$

где: R_{28} – прочность на сжатие, которой достигнет бетон в возрасте 28 суток;

R_n – заданная прочность бетона в срок n дней.

Данная логарифмическая зависимость справедлива для бетона на портландцементе, твердеющего в нормальных условиях при сроках твердения $n=3 \dots 90$ суток.

Необходимость такого приведения обусловлена тем, что расчетная формула (3), связывающая прочность бетона с параметрами его

состава, выведена для бетона, твердеющего 28 дней в нормальных условиях, и только в этом случае применимы указанные в формуле коэффициенты.

12. Многие важные свойства бетона – морозостойкость, водонепроницаемость, коррозионная стойкость – тесно связаны с особенностями структуры, в частности, с пористостью бетона. В плотно уложенном бетоне поры образуются, в основном, вследствие испарения свободной воды. Размеры возникающих пор неодинаковы. Отрицательно влияют на перечисленные выше свойства бетона макропоры, размер которых более 10^{-5} см. Более мелкие поры, заполненные адсорбционно связанной с цементным гелем водой, не оказывают негативного влияния на морозостойкость и водонепроницаемость бетона. Поэтому для оценки этих свойств бетона важно знать его макропористость, которую можно вычислить следующим образом. Цемент связывает химически w воды (считая в долях (процентах) от массы цемента) и примерно столько же адсорбционно в микропорах геля. Следовательно, общее количество воды, связанной цементом, будет $2w$. Объем макропор (капиллярных) P_K , %, образованных несвязанной водой, определяют по формуле:

$$P_K = \frac{B - 2 \cdot w \cdot Ц}{1000} \cdot 100\% \quad (26)$$

где: $Ц$, B – расходы цемента и воды затворения на 1 м^3 бетона, кг;
 w – относительное количество воды, связанной цементом, доли единицы.

Общую пористость бетона P_B , %, рассчитывают по формуле:

$$P_B = \frac{B - w \cdot Ц}{1000} \cdot 100\% \quad (27)$$

В действительности же общая пористость бетона будет больше вычисленной по формуле (27), поскольку не учтен объем вовлеченного воздуха, равный 2...6%. Морозостойкость бетона значительно возрастает, если объем капиллярных пор меньше 7%. Макропористость можно уменьшить снижением $B/Ц$, что достигается комплексом средств: тщательным подбором зернового состава заполнителей, применением пластификаторов, интенсивным уплотнением бетонной смеси и т.д.

13. Стоимость материалов для изготовления 1 м^3 бетона определяем с использованием цен, приведенных в табл. 10.

Таблица 10

Усредненные оптовые цены на материалы
для Московской области на 2014 г.

Материал	Единица измерения	Оптовая цена, руб.
Портландцемент бездобавочный		
ПЦ 400–Д0 (ЦЕМ I 32,5 Н)	т	3 600
ПЦ 500–Д0 (ЦЕМ I 42,5 Н)	т	3 750
ПЦ 550–Д0 (ЦЕМ I 52,5 Н)	т	4 200
Портландцемент быстротвердеющий		
ПЦ 400–Д0–Б (ЦЕМ I 32,5Б)	т	3 800
ПЦ 500–Д0–Б (ЦЕМ I 42,5Б)	т	3 950
Портландцемент с минеральными добавками до 20%		
ПЦ 400–Д20 (ЦЕМ II 32,5Н)	т	3 450
ПЦ 500–Д20 (ЦЕМ II 42,5Н)	т	3 650
Портландцемент сульфатостойкий		
ЦЕМ I 32,5 Н СС	т	3 700
ЦЕМ I 42,5 Н СС	т	3 900
Шлакопортландцемент		
ШПЦ 300 (ЦЕМ III 22,5 Н)	т	2 450
ШПЦ 400 (ЦЕМ III 32,5 Н)	т	2 800
ШПЦ 500 (ЦЕМ III 42,5 Н)	т	3 100
Пуццолановый цемент		
ЦЕМ IV 32,5 Н	т	3 200
Щебень гранитный:		
фракция 10-20	м ³	1 600
фракция 20-40	м ³	1 550
фракция 40-70	м ³	1 400
смесь фракций 5-20 мм	м ³	1 800
смесь фракций 5-40 мм	м ³	1 600
смесь фракций 5-70 мм	м ³	1 100
Гравий для строительных работ:		
фракция 5-10	м ³	1 700
фракция 10-20	м ³	1 300
фракция 20-40	м ³	1 250
фракция 40-70	м ³	1 100
смесь фракций 5-20 мм	м ³	1 350
смесь фракций 5-40 мм	м ³	1 250
смесь фракций 5-70 мм	м ³	850
Песок для строительных работ	м ³	500
Вода	м ³	25

2. ПРИМЕР ВЫПОЛНЕНИЯ РАСЧЕТНО-ГРАФИЧЕСКОЙ РАБОТЫ

З а д а н и е

Рассчитать состав бетона класса по прочности В20 при нормативном коэффициенте вариации прочности 13,5%, предназначенного для бетонирования железобетонного перекрытия промышленного здания. Условия эксплуатации нормальные. Подвижность бетонной смеси по осадке конуса составляет 5...7 см. Смесь укладывается с вибрацией. Минимальный размер сечения конструкции 200 мм, наименьшее расстояние в свету между стержнями рабочей арматуры 60 мм.

Зерновой состав заполнителей приведен в табл. 11.

Таблица 11

Вид заполнителя	Частные остатки, %, на ситах с размером отверстий, мм									
	70	40	20	10	5	2,5	1,25	0,63	0,315	0,16
Песок	–	–	–	–	–	10	30	25	15	20
Щебень	–	5	35	40	20	–	–	–	–	–

Параметры состояния заполнителей приведены в табл. 12.

Таблица 12

Вид заполнителя	Плотность, кг/дм ³	Насыпная плотность, кг/дм ³		Влажность по массе, %
		В сухом состоянии	Во влажном состоянии	
Песок	2,65	1,55	1,40	4,5
Щебень	2,70	1,53	1,56	2,0

Определить и рассчитать

1. Вид и марку цемента.
2. Соответствие зернового состава песка и крупного заполнителя требованиям стандарта. Модуль крупности и водопотребность песка. Соответствие наибольшей крупности заполнителя размерам сечения и характеру армирования конструкции.
3. Цементно-водное отношение по формуле прочности бетона. Вычислить В/Ц.
4. По таблице водопотребности бетонной смеси определить расход воды на 1 м³ бетона. Рассчитать расход цемента. Полученное значение сопоставить с минимально допустимым.

5. Расход материалов на 1 м^3 бетона, исходя из необходимости получить плотную смесь; установить среднюю плотность бетонной смеси.
6. Состав бетона в относительных единицах по массе и по объему.
7. Изменение дозировки материалов с учетом влажности заполнителей. Рабочий состав бетона в относительных единицах.
8. Коэффициент выхода бетона рабочего состава и объем бетона, получаемого в одном замесе бетоносмесителя вместимостью 1200 дм^3 .
9. Дозировку материалов по рабочему составу на замес бетоносмесителя.
10. Температуру подогрева материалов для получения бетонной смеси с температурой 25°C (состав бетона принимать по п. 5). Начальную температуру материалов см. в табл. 13.

Таблица 13

Материалы	Начальная температура, $^\circ\text{C}$
Цемент	-5°C
Песок	-15°C
Крупный заполнитель	-15°C
Вода	85°C

11. Изменение расхода цемента по сравнению с составом по п. 5, при условии, что расход воды в бетоне остается тем же, если:
 - а) на строительство поступил портландцемент марки 600;
 - б) требуемая прочность бетона должна быть достигнута в возрасте 14 сут, а не 28 сут, как было указано в условии задания.
 Пункты 11 а и 11 б решаются раздельно.
12. Пористость бетона в возрасте 360 сут нормального твердения, учитывая, что к этому сроку масса химически связанной воды составит 18 % массы цемента.
13. Суммарную стоимость материалов, расходуемых на изготовление 1 м^3 бетона, и долю стоимости, приходящуюся на цемент (состав бетона принимать по п. 5).

Р е ш е н и е

1. Определяем вид и марку цемента. Поскольку условия эксплуатации нормальные, можно применить портландцемент, шлакопортландцемент, портландцемент с минеральными добавками, быстротвердеющий портландцемент. Останавливаем выбор на порт-

ландцементе с минеральными добавками, характеристики которого назначаем по табл. 3: истинная плотность $3,1 \text{ кг/дм}^3$, насыпная плотность $1,3 \text{ кг/дм}^3$. Портландцемент с минеральными добавками, обладающая теми же техническими свойствами, что и бездобавочный цемент, но имеет по сравнению с последним меньшую стоимость (табл. 10).

Для бетона класса по прочности В20 табл. 1 рекомендует цемент марки 400. Выбираем марку цемента 400. Таким образом, для данного бетона будет применяться портландцемент ПЦ 400–Д20.

Назначая вид и марку цемента, следует по табл. 10 проверить наличие и стоимость выбранного цемента. Если по табл. 1 требуется принять цемент марки 300, возможны следующие варианты:

- Выбрать шлакопортландцемент марки 300.
- Принять марку цемента выше рекомендуемой (400). В этом случае расход цемента в бетоне, определённый из условия прочности (см. пп. 3–4 примера), может оказаться ниже минимально допустимого (табл. 9). Тогда следует принять расход цемента по табл. 9, а расход воды скорректировать, не меняя значение водоцементного отношения (см. п. 4 примера).
- «Разбавить» цемент более высокой марки (400, 500) добавками-наполнителями для получения смешанного вяжущего с активностью 300 кгс/см^2 (см. п. 11а примера).

2. Оцениваем необходимые характеристики заполнителей.

Определяем соответствие зернового состава песка требованиям стандарта – рассчитываем полные остатки на ситах (табл. 14), строим график зернового состава (рис. 5).

Таблица 14

Результаты просеивания песка

Показатели, размерность	Размеры отверстий сит, мм					
	5	2,5	1,25	0,63	0,315	0,16
Остатки частные a_i , %	–	10	30	25	15	20
Остатки полные A_i , %	–	10	40	65	80	100

По формуле (1) определяем модуль крупности песка:

$$M_K = \frac{(A_{2,5} + A_{1,25} + A_{0,63} + A_{0,315} + A_{0,16})}{100} = \frac{10 + 40 + 65 + 80 + 100}{100} = 2,95.$$

По значению модуля крупности и полному остатку на сите 0,63 данный песок относится к крупным (табл. 5). По графику (рис. 3) определяем водопотребность песка: $B_{II} = 5\%$.

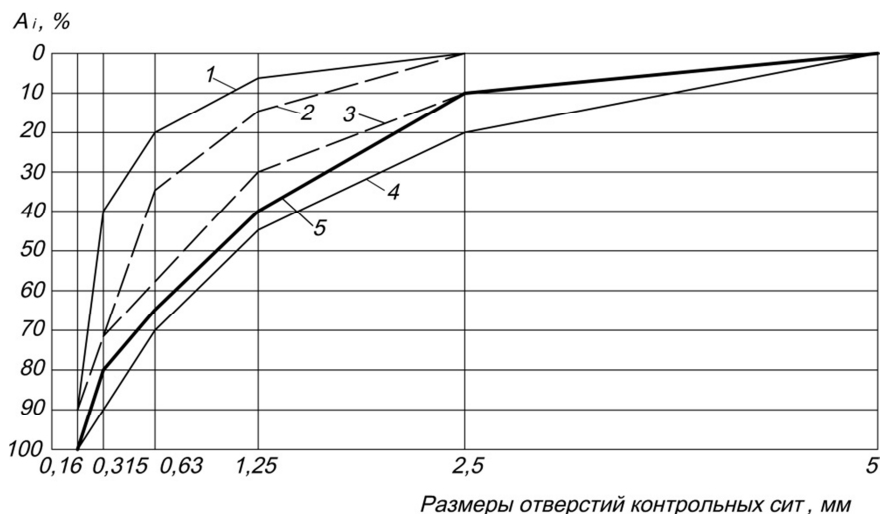


Рис. 5. График зернового состава песка

- 1 – допустимая нижняя граница крупности песка ($M_k=1,5$); 2 – рекомендуемая нижняя граница крупности ($M_k=2,0$) для бетонов класса В15 и выше; 3 – рекомендуемая нижняя граница ($M_k=2,5$) для бетонов класса В25 и выше; 4 – допустимая верхняя граница крупности ($M_k=3,25$); 5 – кривая просеивания песка

Вывод: по зерновому составу данный песок удовлетворяет требованиям ГОСТ и может быть использован для бетонов класса В20 и выше.

Определяем соответствие зернового состава крупного заполнителя (щебня) требованиям стандарта – рассчитываем полные остатки на ситах (табл. 15), строим график зернового состава (рис. 6).

Таблица 15

Результаты просеивания крупного заполнителя

Показатели, размерность	Размеры отверстий сит, мм				
	70	40	20	10	5
Остатки частные a_i , %	–	5	35	40	20
Остатки полные A_i , %	–	5	40	80	100

Наибольшая крупность $D=40$ мм.

Наименьшая крупность $d=5$ мм.

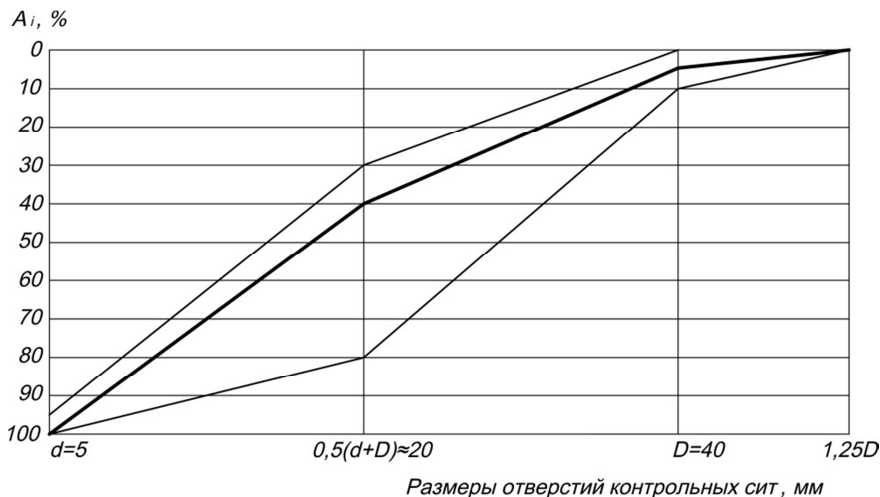


Рис. 6. График зернового состава крупного заполнителя

Вывод: по зерновому составу данный щебень удовлетворяет требованиям ГОСТ.

Проверяем соответствие наибольшей крупности заполнителя размерам сечения и характеру армирования конструкции:

$$D \leq \frac{1}{3} \cdot b_{\min}; \quad \frac{1}{3} \cdot b_{\min} = \frac{1}{3} \cdot 200 = 67 \text{ мм}; \quad D \leq 67 \text{ мм}.$$

$$D \leq \frac{3}{4} \cdot a; \quad \frac{3}{4} \cdot a = \frac{3}{4} \cdot 60 = 45 \text{ мм}; \quad D \leq 45 \text{ мм}.$$

где: $b_{\min} = 200 \text{ мм}$ — минимальный размер сечения конструкции;

$a = 60 \text{ мм}$ — минимальное расстояние в свету между стержнями рабочей арматуры.

Вывод: наибольшая крупность данного щебня ($D=40 \text{ мм}$) соответствует размерам сечения и характеру армирования конструкции.

В случае, если при выполнении РГР песок или крупный заполнитель по зерновому составу не удовлетворяют требованиям ГОСТ, либо наибольшая крупность крупного заполнителя не соответствует размерам сечения и характеру армирования конструкции, отмечаем это и принимаем в расчет коэффициент качества заполнителей $A=0,55$ (заполнители пониженного качества).

3. По формуле (2) определяем требуемую прочность бетона:

$$R_T = K_T \cdot B_{\text{норм}} = 1,3 \cdot 20 = 26 \text{ МПа} = 260 \text{ кгс/см}^2,$$

где: $B_{\text{норм}}$ – заданное значение класса бетона по прочности, В20;

$K_T = 1,3$ – коэффициент требуемой прочности, определяемый по табл. 6 с учетом заданного коэффициента вариации (13,5%).

Поскольку $R_{28} = 260 \text{ кгс/см}^2 \leq 1,2 R_{ц} = 1,2 \cdot 400 = 500 \text{ кгс/см}^2$, цементно-водное отношение определяем по формуле (6):

$$\frac{Ц}{B} = \frac{R_T}{A \cdot R_{ц}} + 0,5 = \frac{260}{0,65 \cdot 400} + 0,5 = 1,5,$$

где: $R_T = 260 \text{ кгс/см}^2$ – требуемая прочность бетона;

$R_{ц} = 400 \text{ кгс/см}^2$ – марка цемента.

Коэффициент A принят равным 0,65, поскольку заполнители по зерновому составу удовлетворяют требованиям ГОСТ, песок имеет оптимальную крупность для бетона заданного класса и в качестве крупного заполнителя используется щебень.

По известному значению Ц/В по формуле (7) находим водоцементное отношение, необходимое по условию прочности:

$$\frac{B}{Ц} = \frac{1}{Ц/В} = \frac{1}{1,5} = 0,67.$$

В нашем случае ограничений В/Ц по условию долговечности бетона нет, поэтому используем найденные значения В/Ц и Ц/В для дальнейшего расчета.

4. По табл. 8 определяем расход воды на 1 м^3 бетонной смеси, руководствуясь значениями подвижности бетонной смеси, наибольшей крупности и вида крупного заполнителя. При подвижности бетонной смеси 5...7 см и наибольшей крупности щебня 40 мм расход воды составит $B_{\text{табл}} = 185 \text{ кг}$. Учитывая, что при модуле крупности 2,95 водопотребность песка равна 5%, по формуле (8) определяем окончательный расход воды:

$$B = B_{\text{табл}} + (B_{II} - 7) \cdot 5 = 185 + (5 - 7) \cdot 5 = 175 \text{ кг}.$$

На основании принятых значений Ц/В и В по формуле (9) определяем расход цемента:

$$Ц = B \cdot \frac{Ц}{B} = 175 \cdot 1,5 = 262 \text{ кг}.$$

Полученный расход цемента сопоставляем с минимально допускаемым. В нашем случае условия эксплуатации нормальные. Полагаем, что конструкция эксплуатируется в помещении с умеренной влажностью, тогда минимальный расход портландцемента с минеральными добавками составит 220 кг (табл. 9). Поскольку найденный расход цемента не ниже минимального, рекомендуемого нормами, оставляем его для дальнейшего расчета.

В случае, если расход цемента по расчету окажется меньше допускаемого, следует принять его по табл. 9, а расход воды увеличить, сохранив прежнее Ц/В. Например, расход воды составляет 160 кг, Ц/В=1,2, тогда Ц=192 кг, что меньше минимально допустимого расхода цемента. В таком случае принимаем Ц=220 кг (по табл. 9), Ц/В оставляем прежним, а расход воды корректируем:

$$B = \frac{Ц}{\frac{Ц}{В}} = \frac{220}{1,2} = 183 \text{ кг}.$$

5. Расход заполнителей определяем по формулам (13) и (14). Предварительно вычислим пустотность щебня по формуле (12):

$$\alpha_K = 1 - \frac{\rho_{НК}}{\rho_K} = 1 - \frac{1,53}{2,7} = 0,43.$$

В случае, если пустотность крупного заполнителя окажется более 45%, необходимо вернуться к п. 3 расчета, принять коэффициент качества заполнителей $A=0,55$ и выполнить расчет заново.

Далее необходимо определить значение коэффициента раздвижки зерен крупного заполнителя. Поскольку бетонная смесь подвижная ($ОК=5...7$ см), вначале вычисляем объем цементного теста по формуле (15):

$$V_{цт} = \frac{Ц}{\rho_{ц}} + \frac{B}{\rho_B} = \frac{262}{3,1} + \frac{175}{1} = 260 \text{ дм}^3.$$

Затем по графику (рис. 4) находим $k'_{p.з.} = 1,33$ и по формуле (16) корректируем его, внося поправку на водопотребность песка:

$$k_{p.з.} = k'_{p.з.} + (7 - B_{п}) \cdot 0,03 = 1,33 + (7 - 5) \cdot 0,03 = 1,39.$$

При таких значениях α_K и $k_{p.з.}$ расход крупного заполнителя составит по формуле (13):

$$K = \frac{1000}{\frac{\alpha_K \cdot k_{p.з.}}{\rho_{НК}} + \frac{1}{\rho_K}} = \frac{1000}{\frac{0,43 \cdot 1,39}{1,53} + \frac{1}{2,7}} = 1314 \text{ кг}.$$

Расход песка определяем по формуле (14):

$$\begin{aligned} \Pi &= \left[1000 - \left(\frac{Ц}{\rho_{ц}} + \frac{В}{\rho_{в}} + \frac{К}{\rho_{к}} \right) \right] \cdot \rho_{\Pi} = \\ &= \left[1000 - \left(\frac{262}{3,1} + \frac{175}{1} + \frac{1314}{2,7} \right) \right] \cdot 2,65 = 673 \text{ кг}. \end{aligned}$$

Таким образом, расход материалов для приготовления 1 м^3 бетона составляет, кг:

Цемент	262
Вода	175
Песок	673
<u>Щебень</u>	<u>1314</u>
Итого:	2424

Следовательно, средняя плотность бетонной смеси составляет 2424 кг/м^3 .

6. Состав бетона в относительных единицах по массе:

$$\frac{Ц}{Ц} : \frac{В}{Ц} : \frac{\Pi}{Ц} : \frac{К}{Ц} = \frac{262}{262} : \frac{175}{262} : \frac{673}{262} : \frac{1314}{262} = 1 : 0,67 : 2,57 : 5,01$$

Для выражения состава бетона по объему предварительно определим объемы материалов в рыхлонасыпном состоянии по формулам (19):

$$V_{ц} = \frac{Ц}{\rho_{нц}} = \frac{262}{1,3} = 202 \text{ дм}^3;$$

$$V_{\Pi} = \frac{\Pi}{\rho_{нп}} = \frac{673}{1,55} = 434 \text{ дм}^3;$$

$$V_{к} = \frac{К}{\rho_{нк}} = \frac{1314}{1,53} = 859 \text{ дм}^3.$$

Состав бетона в относительных единицах по объему:

$$\frac{V_{ц}}{V_{ц}} : \frac{V_{в}}{V_{ц}} : \frac{V_{\Pi}}{V_{ц}} : \frac{V_{к}}{V_{ц}} = \frac{202}{202} : \frac{175}{202} : \frac{434}{202} : \frac{859}{202} = 1 : 0,87 : 2,15 : 4,25.$$

7. Рабочий состав бетона.

Масса воды, содержащейся в щебне при влажности 2%, равна $1314 \cdot 0,02 = 26 \text{ кг}$, а в песке при влажности 4,5% – $673 \cdot 0,045 = 30 \text{ кг}$.

Таблица 16

Расчет рабочего состава бетона

Материал	Расход материалов на 1 м ³ бетона			
	Лабораторный состав		Рабочий состав	
	кг	дм ³	кг	дм ³
Цемент	262	202	262	202
Песок	673	434	673+30=703	502
Крупный заполнитель	1314	859	1314+26=1340	859
Вода:				
в песке	—	—	30	30
в крупном заполнителе	—	—	26	26
добавленная	175	175	175–30–26=119	119
Всего воды	175	175	175	175

Расход материалов на 1 м³ бетона рабочего состава, кг:

Цемент	262
Вода	119
Песок	703
Щебень	1340
Итого:	2424

При этом истинное значение B/C остается неизменным ($B/C=0,67$), а кажущееся $B/C = 119/262 = 0,45$.

Рабочий состав бетона в относительных единицах по массе:

$$\frac{C'}{C'} : \frac{B'}{C'} : \frac{P'}{C'} : \frac{K'}{C'} = \frac{262}{262} : \frac{119}{262} : \frac{703}{262} : \frac{1340}{262} = 1 : 0,45 : 2,68 : 5,11.$$

Рабочий состав бетона по объему в относительных единицах:

$$\frac{V'_C}{V'_C} : \frac{V'_B}{V'_C} : \frac{V'_P}{V'_C} : \frac{V'_K}{V'_C} = \frac{202}{202} : \frac{119}{202} : \frac{502}{202} : \frac{859}{202} = 1 : 0,59 : 2,48 : 4,25.$$

8. Коэффициент выхода бетонной смеси рабочего состава определяем по формуле (20):

$$\beta = \frac{1000}{V'_C + V'_P + V'_K} = \frac{1000}{202 + 502 + 859} = 0,64.$$

9. Дозировку материалов по рабочему составу на замес бетономесителя объемом $V=1200 \text{ дм}^3$ определяем по формулам (21):

$$W'_V = \frac{\beta \cdot V}{1000} W' = \frac{0,64 \cdot 1200}{1000} \cdot 262 = 201 \text{ кг};$$

$$B'_V = \frac{\beta \cdot V}{1000} B' = \frac{0,64 \cdot 1200}{1000} \cdot 119 = 91 \text{ кг};$$

$$П'_V = \frac{\beta \cdot V}{1000} П' = \frac{0,64 \cdot 1200}{1000} \cdot 703 = 540 \text{ кг};$$

$$K'_V = \frac{\beta \cdot V}{1000} K' = \frac{0,64 \cdot 1200}{1000} \cdot 1340 = 1029 \text{ кг}.$$

Объем бетона в одном замесе (по формуле (22)):

$$V_3 = \beta \cdot V = 0,64 \cdot 1200 = 768 \text{ м}^3.$$

10. При выполнении данного задания состав бетона в относительных единицах по массе принимаем по п. 6:

$$1 : 0,67 : 2,57 : 5,01$$

Составляем уравнение теплового баланса (формула (23)):

$$c_B \cdot B \cdot (t_{Б.П.} - t_{Б.С.}) = c_Ц \cdot Ц \cdot (t_{Б.С.} - t_{Н.Ц.}) + c_3 \cdot (П + К) \cdot (t_{Б.С.} - t_3)$$

$$4,2 \cdot 0,67 \cdot (85 - 25) = 0,84 \cdot 1 \cdot (25 - (-5)) + 0,84 \cdot (2,57 + 5,01) \cdot (25 - t_3)$$

где: c_B , $c_Ц$, c_3 – удельные теплоемкости воды, цемента и запол-

нителей соответственно: $c_Ц = c_3 = 0,84 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot ^\circ\text{С}}$, $c_B = 4,2 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot ^\circ\text{С}}$;

$t_{Б.П.} = 85^\circ\text{С}$ – температура, до которой подогревают воду;

$t_{Б.С.} = 25^\circ\text{С}$ – заданная температура бетонной смеси;

$t_{Н.Ц.} = -5^\circ\text{С}$ – начальная температура цемента;

t_3 – определяемое значение температуры подогрева заполнителей, $^\circ\text{С}$.

Вместо $Ц$, $В$, $П$ и $К$ подставляем в уравнение теплового баланса соответствующие им части из выражения состава бетона в относительных единицах по массе.

Решая данное уравнение, находим $t_3 = +2,4^\circ\text{С}$.

Таким образом, чтобы бетонная смесь имела температуру $+25^\circ\text{С}$, заполнители необходимо нагреть на $17,4^\circ\text{С}$.

11а. На строительство поступил цемент марки 600, который предстоит использовать в бетоне с требуемой прочностью 26 МПа

взамен ранее выбранного цемента марки 400. Поскольку в табл. 1 для бетона класса В20 цемент марки 600 не предусмотрен, необходимо ввести добавку–наполнитель, количество которой определяем по формуле (24):

$$a = \frac{R_{ц} - R_{см}}{R_{ц}} = \frac{600 - 400}{600} = 0,33, \text{ или } 33\%.$$

Активность смешанного вяжущего составит $R_{см} = 400 \text{ кгс/см}^2$, а цементно-водное отношение в бетоне на этом вяжущем останется таким же, как и в бетоне, изготавливаемом на цементе марки 400:

$$\frac{Ц_{см}}{B} = \frac{R_t}{A \cdot R_{см}} + 0,5 = \frac{260}{0,65 \cdot 400} + 0,5 = 1,5.$$

Полагая, что добавка не изменяет водопотребности бетонной смеси, определим расход смешанного вяжущего:

$$Ц_{см} = \frac{Ц_{см}}{B} \cdot B = 1,5 \cdot 175 = 262 \text{ кг}.$$

Следовательно, расход цемента марки 600 по сравнению с цементом марки 400 уменьшится:

$$Ц' = Ц_{см} \cdot (1 - a) = 262 \cdot (1 - 0,33) = 176 \text{ кг}.$$

Экономия цемента составит:

$$\Delta Ц = Ц - Ц' = 262 - 176 = 86 \text{ кг}.$$

Предположим, что марка цемента соответствует рекомендуемой или меньше ее. Рассмотрим вариант, когда на стройку вместо выбранного цемента марки 400 поступил цемент марки 300.

Несмотря на нежелательное соотношение $R_{ц}:R_t$, вычисляем значение $(Ц/B)'$ и новый расход цемента:

$$\left(\frac{Ц}{B} \right)' = \frac{R_t}{A \cdot R_{ц'}} + 0,5 = \frac{260}{0,65 \cdot 300} + 0,5 = 1,83.$$

Расход цемента составит:

$$Ц' = \left(\frac{Ц}{B} \right)' \cdot B = 1,83 \cdot 175 = 320 \text{ кг}.$$

Перерасход цемента составит:

$$\Delta Ц = Ц' - Ц = 320 - 262 = 58 \text{ кг}$$

116. Воспользуемся для перерасчета логарифмической зависимостью нарастания прочности бетона нормального твердения от времени (формула (25)):

$$R'_{28} = R_n \cdot \frac{\lg 28}{\lg n} = 260 \cdot \frac{\lg 28}{\lg 14} = 260 \cdot \frac{1,4471}{1,1461} = 328 \frac{\text{кгс}}{\text{см}^2}.$$

Полученное значение R'_{28} подставляем в формулу для определения Ц/В и затем при прежнем расходе воды находим новый расход цемента:

$$\left(\frac{Ц}{В}\right)' = \frac{R'_T}{A \cdot R_{ц}} + 0,5 = \frac{328}{0,65 \cdot 400} + 0,5 = 1,76.$$

$$Ц' = \left(\frac{Ц}{В}\right)' \cdot В = 1,76 \cdot 175 = 308 \text{ кг}.$$

Увеличение расхода цемента составит:

$$\Delta Ц = Ц' - Ц = 308 - 262 = 46 \text{ кг}$$

12. Капиллярную пористость бетона определяем по формуле (26):

$$П_K = \frac{В - 2 \cdot w \cdot Ц}{1000} \cdot 100\% = \frac{175 - 2 \cdot 0,18 \cdot 262}{1000} \cdot 100\% = 8,1\%.$$

Общая пористость бетона рассчитывается по формуле (27):

$$П_B = \frac{В - w \cdot Ц}{1000} \cdot 100\% = \frac{175 - 0,18 \cdot 262}{1000} \cdot 100\% = 12,8\%.$$

13. Стоимость материалов для изготовления 1 м^3 бетона (состав бетона по п. 5) определяем с использованием цен, приведенных в табл. 10.

Таблица 17

Стоимость материалов для изготовления 1 м^3 бетона

Материал	Ед.	Цена за ед., руб.	Расход на 1 м^3 бетона	Стоимость на 1 м^3 бетона, руб.
Портландцемент ПЦ 400–Д20	т	3 450	0,262	904
Песок для строительных работ	м^3	500	0,434	217
Щебень (смесь фракций 5-40 мм)	м^3	1 600	0,859	1 374
Вода	м^3	25	0,175	4
ИТОГО:				2 499

Доля стоимости, приходящаяся на цемент, составит $904:2499=0,36$, или 36%.

Контрольные вопросы

1. Что называют бетоном?
2. Дайте классификацию бетонов в соответствии с ГОСТ 25192-2012.
3. Что такое класс бетона по прочности? Как его определить?
4. Как определить прочность бетона по базовому методу?
5. Рассчитайте класс бетона по прочности, если при испытании двух серий по 15 образцов среднее значение прочности бетона составило 24 МПа, а коэффициент вариации 12%.
6. Определите требуемую прочность бетона при нормативном коэффициенте вариации ($K_T=1,3$), если проектный класс бетона В25.
7. Как выбрать вид и марку цемента для бетона?
8. Какие технические требования предъявляются к заполнителям для тяжелого бетона? Как оценить зерновой состав заполнителей для бетона?
9. Что называют бетонной смесью?
10. Каковы основные технические свойства бетонных смесей?
11. Как определить удобоукладываемость бетонной смеси по показателям подвижности и жесткости? Каким образом регулируется удобоукладываемость бетонной смеси?
12. В чем заключается основной закон прочности бетона? Приведите формулы, графики.
13. Тяжелый бетон имеет следующий состав: портландцемент ПЦ 400-Д0 – 260 кг, вода – 170 кг, песок – 680 кг, щебень – 1290 кг. Заполнители рядового качества. Определите прочность бетона в возрасте 28 сут нормального твердения.
14. Запишите уравнение абсолютных объемов. В чем заключается его физический смысл?
15. Запишите уравнение заполнения пустот крупного заполнителя цементно-песчаным раствором. В чем заключается его физический смысл?
16. Приведите последовательность расчета начального состава бетона. Чем лабораторный состав бетона отличается от рабочего состава?
17. Как определить общую пористость бетона?
18. Какие производственные факторы влияют на качество бетона?
19. Какие существуют способы ускорения твердения бетона?
20. При испытании бетонных образцов в возрасте 28 суток среднее значение прочности бетона оказалось 27 МПа. Определите ожидаемую прочность бетона в возрасте 60 суток нормального твердения.

Библиографический список

1. Строительные материалы. Материаловедение. Технология конструкционных материалов : учеб. для вузов / В.Г. Миккульский [и др.]; под ред. В.Г. Миккульского, Г.П. Сахарова. – [5-е изд., доп. и перераб.]. – М.: Изд-во АСВ, 2011. – 519 с.
2. Технология бетона : Учебник / Ю.М. Баженов. – 5-е изд. – М.: Изд-во АСВ, 2011. – 528 с.
3. Оценка качества строительных материалов : учебное пособие для вузов / К.Н. Попов, М.Б. Каддо, О.В. Кульков ; под общ. ред. К. Н. Попова. – Изд. 3-е, стер. – М.: Студент, 2012. – 287 с.
4. Технология строительных процессов. В 2 ч. Ч. 2: Учебник / В.И. Теличенко, О.М. Терентьев, А.А. Лапидус. – 2-е изд., испр. и доп. – М.: Высш. шк., 2005. – 392 с.
5. Л.И. Дворкин, В.И. Гоц, О.Л. Дворкин. Испытания бетонов и строительных растворов. Проектирование их составов. – М.: Инфра-Инженерия, 2014. – 432 с.
6. ГОСТ 25192–2012. Бетоны. Классификация и общие технические требования.
7. ГОСТ 27006–86. Бетоны. Правила подбора состава.
8. ГОСТ 18105–2010. Бетоны. Правила контроля и оценки прочности.
9. Рекомендации по подбору составов тяжелых и мелкозернистых бетонов (к ГОСТ 27006–86). – М.: ЦИТП, 1990.
10. ГОСТ Р 55224–2012. Цементы для транспортного строительства. Технические условия.
11. ГОСТ 26633–2012. Бетоны тяжелые и мелкозернистые. Технические требования.
12. ГОСТ 10178–85. Портландцемент и шлакопортландцемент. Технические условия.
13. ГОСТ 30515–2013. Цементы. Общие технические условия.
14. ГОСТ 31108–2003. Цементы общестроительные. Технические условия.
15. ГОСТ 22266–2013. Цементы сульфатостойкие. Технические условия.
16. ГОСТ 10180–2012. Бетоны. Методы определения прочности по контрольным образцам.
17. ГОСТ 8736–93. Песок для строительных работ. Технические условия.
18. ГОСТ 8735–88. Песок для строительных работ. Методы испытаний.
19. ГОСТ 8267–93. Щебень и гравий из плотных горных пород для строительных работ. Технические условия.
20. ГОСТ 8269.0–97. Щебень и гравий из плотных горных пород и отходов промышленного производства для строительных работ. Методы испытаний.
21. ГОСТ 7473–2010. Смеси бетонные. Технические условия.
22. ГОСТ 31384–2008. Защита бетонных и железобетонных конструкций от коррозии. Общие технические требования.

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	3
1. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАСЧЕТНО-ГРАФИЧЕСКОЙ РАБОТЫ	5
2. ПРИМЕР ВЫПОЛНЕНИЯ РАСЧЕТНО-ГРАФИЧЕСКОЙ РАБОТЫ	23
Контрольные вопросы	35
Библиографический список	36