

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ

**УЧРЕЖДЕНИЕ ОБРАЗОВАНИЯ
«БРЕСТСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

КАФЕДРА ТЕХНОЛОГИИ БЕТОНА И СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ

**ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ
ПРОЕКТИРОВАНИЕ ПРЕДПРИЯТИЯ
СБОРНОГО ЖЕЛЕЗОБЕТОНА**

ЧАСТЬ 2: ТЕХНОЛОГИЯ БЕТОНА

Конспект лекций для студентов специальности
70 01 01 «Производство строительных изделий и конструкций»

Под общей редакцией В.В. Тура и Г.В. Сырицы

Брест 2008

УДК 666.971.98

Сырица Г.В., Тур В.В., Довнар Н.И., Басов В.С. Технологическое проектирование предприятия сборного железобетона. Часть 2: Технология бетона / Под общ. ред. В.В. Тура и Г.В. Сырицы.– Брест: БрГТУ, 2008. – 52 с.

Настоящий конспект лекций является вспомогательным методическим материалом студентам специальности «Производство строительных изделий и конструкций» при выполнении комплексного курсового проекта по технологическому проектированию предприятий сборного железобетона и дипломного проекта.

В конспекте лекций в краткой форме излагается содержание основных разделов проекта, представлены основные технологические расчеты. Вместе с тем, в тексте авторы сознательно не приводили традиционных решений по компоновке основного производства, оставляя студенту достаточную свободу выбора в рамках действующих нормативных документов по проектированию предприятий, производящих сборный железобетон. Издается в двух частях. Часть 2.

Печатается по решению Совета Строительного факультета Брестского государственного технического университета.

Рецензенты: профессор кафедры «Строительные конструкции»
Брестского государственного технического университета,
к.т.н. А.А. Кондратчик,

главный инженер филиала «Завод ЖБК»
ОАО «Стройтрест № 8» Турук Ю.Е.

УДК 666.971.98

Учреждение образования
© «Брестский государственный технический университет», 2008

ОГЛАВЛЕНИЕ

Глава 1. Назначение технических параметров бетонных смесей.....	4
Глава 2. Выбор материалов для изготовления изделий	6
2.1 Вяжущие	6
2.2 Мелкий заполнитель.....	7
2.3 Крупный заполнитель	8
2.4 Искусственные пористые заполнители	10
2.5 Добавки	11
2.6 Вода.....	14
Глава 3. Проектирование состава бетона	15
3.1 Методика расчета состава тяжелого бетона	15
3.2 Расчет состава легкого бетона на пористом заполнителе	25
Глава 4. Особенности подбора состава бетонов с добавками	31
4.1 Проектирование состава бетона с добавкой-ускорителем твердения.....	31
4.2 Проектирование состава бетона с пластифицирующей добавкой	33
4.3 Проектирование состава бетона с воздухововлекающей добавкой	34
Глава 5. Особенности расчета состава бетона на основе напрягающего цемента	36
Список литературных источников	38

ГЛАВА 1. НАЗНАЧЕНИЕ ТЕХНИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ БЕТОННЫХ СМЕСЕЙ

Показатели удобоукладываемости бетонной смеси – жесткость (Ж, с) или подвижность (ОК, см), уплотняемой вибрированием, выбираются в зависимости от сложности конфигурации изделия, степени его армирования, способа изготовления при формировании изделия (табл. 1.1). Для кассетного производства изделий бетонная смесь должна иметь подвижность не менее 8 см. Бетонная смесь тяжелого и легкого бетона, уплотняемая центрифугированием, должна обладать подвижностью в пределах 3.5 см. Смеси, уплотняемые вакуумированием, должны иметь подвижность более 6 см. При уплотнении бетонной смеси прессованием ее удобоукладываемость должна характеризоваться жесткостью не ниже 5 с.

При подаче бетонной смеси бетононасосами к месту укладки ее удобоукладываемость должна соответствовать осадке конуса в пределах от 4 до 14 см при использовании плотных заполнителей и от 7 до 18 см - на пористых. Бетонная смесь, перекачиваемая пневмотранспортом, должна иметь ОК 4..6 см.

Таблица 1.1 – Рекомендуемая удобоукладываемость бетонной смеси для формирования изделий, уплотняемых вибрированием

Наименование изделия	Осадка конуса (см) или жесткость (с) бетонной смеси при способах формирования изделий			
	Агрегатно – поточная или конвейерная технология с уплотнением на виброплощадках или вибронасадками	Стендовая технология (кроме кассетной)		
		с уплотнением навесными вибраторами при высоте бетонирования в см	с уплотнением глубинными и поверхностными вибраторами	
1	2	до 80	> 80	5
1) Плоские изделия с повышенными требованиями к качеству поверхности (плиты и панели перекрытий, стеновые панели и перегородки и т.п.).	1..4 см	–	–	1..4 см
2) То же, при обычных требованиях к качеству поверхности (плиты покрытий зданий, дорожных покрытий, плиты крепления откосов земляных сооружений, элементы подпорных стенок, бункеров и др.)	5..10 с	–	–	1..4 см

Окончание таблицы 1.1

1	2	3	4	5
3) Панели и настилы пустотные	11..20 с	–	–	1..4 см
4) Ребристые и кессонные плиты, панели и другие аналогичные элементы (стенные панели промзданий, плиты перекрытий, лестничные площадки, марши).	1..4 см	1..4 см	5..9 см	1..4 см
5) Блоки фундаментные и стеновые и другие доборные изделия простой конфигурации.	5..10 с	5..10 с	1..4 см	5..10 с
6) Линейные изделия простого профиля (ригели, балки, колонны, стойки, перемычки, сваи), а также тавровые и двутавровые балки, опоры ЛЭП, фермы, мачты, двухветвенные колонны и т.п.	1..4 см	1..4 см	5..9 см	1..4 см
7) То же, со значительным об- щим или местным насыщением арматурой.	5..9 см	5..9 см	5..9 см	1..9 см
8) Криволинейные элементы по- крытий, резервуаров, тоннелей, шахтных стволов.	5..9 см	5..9 см	5..9 см	1..4 см
9) Трубы, мачты, кольца колод- цев и т.п.	5..9 см	5..9 см	5..9 см	–
10) Лотки	–	5..9 см	–	–

ГЛАВА 2. ВЫБОР МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ИЗДЕЛИЙ

Для изготовления бетонных и железобетонных изделий применяются сырьевые материалы: цемент, мелкий и крупный заполнитель, добавки, вода. Качество материалов, применяемых для изготовления бетона, должно обеспечивать выполнение технических требований к бетону, установленных соответствующими нормативными документами, и соответствовать требованиям действующих стандартов на материалы.

Характеристики наиболее широко используемых материалов приведены ниже.

2.1 Вяжущие

В качестве вяжущего применяются следующие виды цемента:

- портландцемент без добавок и с активными минеральными добавками по ГОСТ 10178–85: 400, 500, 550, 600;
- шлакопортландцемент по ГОСТ 10178–85: 300, 400, 500;
- портландцемент и шлакопортландцементы быстротвердеющие: 400, 500;
- безусадочный портландцемент по СТБ 942–93 400, 500;
- напрягающий цемент по СТБ 1334–02 500;
- пуццолановый портландцемент по ГОСТ 4013–82 300, 400;
- сульфатостойкий портландцемент 400.

Предел прочности цемента при изгибе и сжатии представлен в таблице 2.1.

Таблица 2.1 – Предел прочности цемента при изгибе и сжатии

Наименование цемента	Гарантированная марка	Предел прочности, МПа (кгс/см ²)			
		При изгибе, в возрасте, сут.		При сжатии, в возрасте, сут.	
		3	28	3	28
ПЦ – Д0 ПЦ – Д5 ПЦ – Д20 ШПЦ	300	—	4.4 (15)	—	29.4 (200)
	400	—	5.4 (55)	—	39.2 (400)
	500	—	5.9 (60)	—	49.2 (500)
	550	—	6.1 (62)	—	53.5 (590)
	600	—	6.4 (65)	—	58.5 (600)
ПЦ – Д20 – Б	400	3.9 (40)	5.4 (55)	24.5 (250)	39.2 (400)
	500	4.4 (45)	5.9 (60)	27.5 (280)	49.0 (500)
ШПЦ – Б	400	3.4 (35)	5.4 (55)	19.6 (200)	39.2 (400)

Цемент должен показывать равномерность изменения объема при испытании образцов кипячением в воде, а при содержании MgO в клинкере более 5 % – в автоклаве.

Начало схватывания цемента должно наступать не ранее 15 мин, а конец – не позднее 10 ч от начала затворения.

Тонкость помола цемента должна быть такой, чтобы при просеивании пробы цемента сквозь сито с сеткой № 008 по ГОСТ 6613–86 прошло не менее 85 % массы просеиваемой пробы.

Для бетона дорожных и аэродромных покрытий, железобетонных напорных и безнапорных труб, железобетонных шпал, мостовых конструкций, стоек опор высоковольтных линий электропередачи, контактной сети железнодорожного транспорта и освещения должен поставляться цемент, изготавливаемый на основе клинкера нормированного состава с содержанием C_3A в количестве не более 9 % по массе.

Для этих изделий по согласованию с потребителем должен поставляться один из следующих видов цемента:

ПЦ500–Д0, ПЦ400–Д0 – для всех видов конструкций;

ПЦ100–Д0–Н, ПЦ500–Д0–Н – для всех изделий;

ПЦ 500–Д5–Н – для труб, шпал, опор, мостовых конструкций, независимо от добавки (для напорных труб должен поставляться цемент I или II группы по эффективности пропаривания по ГОСТ 10178);

ПЦ400–Д20–Н, ПЦ500–Д20–Н – для бетона дорожных и аэродромных покрытий, при применении в качестве добавки гранулированного шлака не более 15 %.

Начало схватывания портландцемента для бетона дорожных и аэродромных покрытий должно наступать не ранее 2 ч, портландцемента для труб – не ранее 2 ч 15 мин от начала затворения цемента водой.

Удельная поверхность портландцемента с добавкой шлака для бетона дорожных и аэродромных покрытий должна быть не менее 2800 $см^2/г$

2.2 Мелкий заполнитель

В качестве мелкого заполнителя применяется песок для строительных работ по ГОСТ 8736–93 следующих групп:

мелкий – модуль крупности 1,5÷2,0;

средний – модуль крупности 2,0÷2,5;

крупный – модуль крупности 2,5÷3,0.

Песок должен соответствовать техническим требованиям:

1. Полный остаток песка на сите № 063 должен быть для:
крупного – 45..60 %;
среднего – 30..45 %;
мелкого – 10..30 %.

2. Содержание зерен крупностью свыше 10 мм не должно превышать значений (% по массе):

Для I класса: крупного, среднего и мелкого	– 0,5 %.
Для II класса: крупного и среднего	– 5,0 %;
мелкого	– 0,5 %.
3. Содержание зерен крупностью свыше 5 мм не должно превышать значений (% по массе):

Для I класса: крупного, среднего и мелкого	– 5,0 %.
Для II класса: крупного и среднего	– 15,0 %;
мелкого	– 10,0 %.
4. Содержание зерен крупностью менее 0.16 мм не должно превышать значений (% по массе):

Для I класса: крупного и среднего	– 5,0 %;
мелкого	– 10,0 %.
Для II класса: крупного и среднего	– 15,0 %;
мелкого	– 20,0 %.
5. Содержание в песке пылевидных и глинистых частиц не должно превышать (% по массе):

Для I класса: крупного и среднего	– 2,0 %;
мелкого	– 3,0 %.
Для II класса: крупного и среднего	– 3,0 %;
мелкого	– 5,0 %.

Песок, предназначенный для применения в качестве заполнителя должен обладать стойкостью к химическому воздействию щелочей цемента. Содержание естественных радионуклидов должно быть для изделий жилых и общественных зданий – до 370 Бк/кг, производственных – 370..740 Бк/кг.

2.3 Крупный заполнитель

В качестве крупного заполнителя применяется щебень и гравий из плотных горных пород для строительных работ по ГОСТ 8267–93.

Щебень должен применяться, как правило, в виде фракций, отдельно дозируемых при приготовлении бетонной смеси: 5(3)..10; 10..20; 20..40; 40..80 (70) мм и смеси фракций от 5 (3) до 20 мм.

Наибольшая крупность заполнителя должна быть установлена в стандартах, технических условиях и рабочих чертежах на изделие.

Полные остатки на контрольных ситах:

d	–	90..100 %;
$0.5 \cdot (d + D)$	–	30..80 %;
D	–	до 10 %;
$1.25 \cdot D$	–	0,5 %.

Щебень в зависимости от содержания зерен пластинчатой и игловатой формы разделяется на 4 группы и может быть применен в зависимости от требований, предъявляемых к изделиям:

- группа 1 – содержание зерен до 15 %;
- группа 2 – содержание зерен от 15 до 25 %;
- группа 3 – содержание зерен от 25 до 35 %;
- группа 4 – содержание зерен от 35 до 50 %.

Причем, для всех видов тяжелых бетонов допускается применять щебень 1, 2 и 3 групп. Применение щебня 4 группы допустимо при условии обеспечения заданной удобоукладываемости бетонной смеси и плотности без перерасхода цемента.

Щебень для тяжелых бетонов должен иметь марку по прочности:

- не ниже 800 – из изверженных пород;
- не ниже 600 – из метаморфических пород;
- не ниже 300 – из осадочных пород.

Марка щебня должна быть выше класса бетона не менее, чем:

- для бетона класса менее В 20 – в 1,5 раза;
- для бетона класса В 20 и выше – в 2,0 раза.

Для бетона мостовых конструкций, мостового полотна пролетных строений мостов, бетона водопропускных труб используют щебень марки:

- не ниже 1 000 – из изверженных пород;
- не ниже 800 – из метаморфических и осадочных пород.

В зависимости от условий эксплуатации изделий назначаются следующие марки щебня по истираемости: И–1; И–2; И–3; И–4.

Морозостойкость заполнителя должна обеспечивать получение бетона требуемой марки по морозостойкости. Щебень подразделяют на следующие марки: F15, F25, F50, F100, F150, F200, F300, F400.

Содержание пылевидных и глинистых частиц в щебне из изверженных и метаморфических пород не должен быть более 1 %; в щебне из осадочных пород марок от 600 до 1 200 – 2 %, марок 300, 400 – 3 %.

Щебень должен быть стойким к воздействию окружающей среды и стойким к химическому воздействию щелочей цемента.

Содержание естественных радионуклидов должно быть: для изделий жилых и общественных зданий – до 370 Бк/кг; для производственных зданий – от 370 до 740 Бк/кг.

2.4 Искусственные пористые заполнители

Искусственные пористые заполнители применяют при приготовлении легких бетонов в виде гравия (керамзитовый, шунгизитовый, аглопоритовый), щебня (шлакопемзовый, аглопоритовый, керамзитовый) и песка (керамзитовый, дробленый, обжиговый, шунгизитовый, аглопоритовый, шлакопемзовый) по СТБ 1217–2000.

Гравий и щебень применяют следующих основных фракций: 5..10, 10..20, 20..40 мм. Допускается применение щебня от 2,5 до 10 мм и смесь фракций от 5 до 20 мм.

Зерновой состав гравия и щебня каждой фракции должен соответствовать по полным остаткам на ситах:

- d – 85..100 %;
- D – до 10 %;
- $2D$ – не допускается.

В зависимости от насыпной плотности гравий, щебень и песок применяют следующих марок: 250, 300, 350, 400, 450, 500, 600, 700, 800, 900, 1000, 1100.

Марки по прочности гравия и щебня в зависимости от марок по насыпной плотности должны соответствовать значениям, приведенным в таблице 2.2.

Таблица 2.2 – Соответствие марок по насыпной плотности и прочности пористых заполнителей

Марки по насыпной плотности	Марка по прочности, не менее				
	керамзитового гравия и щебня	шунгизитового гравия	аглопоритового		шлакопемзового щебня
			гравия	щебня	
1	2	3	4	5	6
250	П25	–	–	–	–
300	П35	–	–	–	–
350	П50	–	–	–	–
400	П50	–	П 25	П 25	П 35
450	П75	–	П 35	П 35	П 50
500	П100	П 50	П 50	П 50	П 50
600	П125	П 75	П 100	П 75	П 75
700	П150	П 100	П 150	П 100	П 100
800	П200	П 150	П 250	П 150	–
900	–	П 200	П 300	–	–

Щебень и гравий должны быть морозостойкими и обеспечивать требуемую марку легкого бетона по морозостойкости.

В щебне, гравии и песке, применяемых в качестве заполнителей для армированных бетонов, содержание водорастворимых сернистых и сернокислых соединений в пересчете на SO_3 не должно превышать 1 % по массе.

Удельная активность естественных радионуклидов должна соответствовать приведенным выше значениям.

2.5 Добавки

Отдельные или комплексные добавки, применяемые для улучшения свойств бетонной смеси и бетона, снижения расхода цемента, трудовых и энергетических затрат, должны соответствовать требованиям соответствующих стандартов и технических условий.

Выбор вида добавки в зависимости от технологии производства с учетом их влияния на свойства бетонной смеси и бетона осуществляется, руководствуясь данными, приведенными в таблице 2.3.

Таблица 2.3 – Эффективность применения добавок

Вид добавки	Критерий эффективности
1	2
Пластифицирующая I группы	Увеличение подвижности бетонной смеси от П1 (ОК = 2.4 см) до П5 без снижения прочности бетона во все сроки испытания. Подвижность смеси основного состава в течение 45 мин не должна снизиться более чем в 2 раза.
Пластифицирующая II группы	Увеличение подвижности бетонной смеси от П1 до П4 без снижения прочности бетона в возрасте 28 сут.
Пластифицирующая III группы	Увеличение подвижности бетонной смеси от П1 до П3 без снижения прочности бетона в возрасте 28 сут.
Пластифицирующая IV группы	Увеличение подвижности бетонной смеси от П1 до П2 без снижения прочности бетона в возрасте 28 сут.
Стабилизирующая	Показатель раствооротделения бетонной смеси с ОК = 20.22 см должен быть не более 2,5 %.
Водоудерживающая	Показатель водоотделения бетонной смеси с ОК = 20.22 см должен быть не более 2,0 %.
Улучшающая перекачиваемость	Снижение давления в бетоноводе не менее, чем на 20 %.
Замедляющая потерю подвижности	Показатель увеличения времени потери подвижности бетонной смеси от исходного значения до 2 см должен быть не менее 2 при температуре окружающего воздуха $+20 \pm 5$ °С.

Продолжение таблицы 2.3

1	2
Ускоряющая потерю подвижности	Показатель увеличения времени потери подвижности бетонной смеси от исходного значения до 2 см должен быть не менее 0,25 при температуре окружающего воздуха $+20\pm 5$ °С. В возрасте 28 суток прочность бетона основного состава не менее 80 % прочности бетона контрольного состава.
Воздухововлекающая для легких бетонов	Объем вовлеченного воздуха в бетонной смеси должен быть в пределах 6..15 % с получением слитной структуры бетона. Потеря вовлеченного воздуха после 30 мин выдержки смеси не более 25 %. Отсутствие снижения прочности при одинаковой средней плотности бетона в возрасте 28 суток.
Пенообразующая для легких бетонов	Объем воздуха, введенного в бетонную смесь с заранее приготовленной пеной, должен быть в пределах 10..25 %. Потеря воздуха после 30 мин выдержки смеси не более 25 %. Отсутствие снижения прочности при одинаковой средней плотности бетона в возрасте 28 суток.
Газообразующая для легких бетонов	Пористость, созданная в бетонной смеси за счет газообразования, должна быть в пределах 15..25 %. Период активного газовыделения от 5 до 30 мин. Отсутствие снижения прочности при одинаковой средней плотности бетона в возрасте 28 суток.
Ускоряющая твердение	Повышение прочности бетона на 20 % и более в возрасте 1 суток нормального твердения. В возрасте 28 суток прочность бетона основного состава не менее 90 % прочности бетона контрольного состава.
Замедляющая твердение	Снижение прочности бетона на 30 % и более в возрасте до 7 суток.
Противоморозная	Прочность бетона основного состава, твердевшего при температуре -15 ± 5 °С в течение 28 суток должна составлять не менее 30 % от марочной прочности бетона контрольного состава, твердеющего при температур. $+20\pm 3$ °С.
Водоредуцирующая I группы	Снижение расхода воды на 20 % и более. Повышение марки бетона по водонепроницаемости на 3 ступени и более.
Водоредуцирующая II группы	Снижение расхода воды на 13..19 %. Повышение марки бетона по водонепроницаемости на 2–3 ступени.

Продолжение таблицы 2.3

1	2
Водоредуцирующая III группы	Снижение расхода воды на 6..12 %. Повышение марки бетона по водонепроницаемости на 1–2 ступени.
Водоредуцирующая IV группы	Снижение расхода воды на 5 % и менее. Повышение марки бетона по водонепроницаемости на 1 ступень.
Кольматирующая	Повышение марки бетона по водонепроницаемости на 2 ступени и более.
Газообразующая	Объем выделившегося газа в уплотненной бетонной смеси 1,5÷3,5 %. Повышение морозостойкости бетона в 2 раза и более. В возрасте 28 суток прочность бетона основного состава не менее 75 % прочности бетона контрольного состава.
Воздухововлекающая	Воздухосодержание в уплотненной бетонной смеси 3..5 % по объему. Повышение морозостойкости бетона в 2 раза и более. В возрасте 28 суток прочность бетона основного состава не менее 75 % прочности бетона контрольного состава.
Гидрофобизирующая I группы	Снижение водопоглощения бетона в 5 раз и более через 28 суток твердения.
Гидрофобизирующая II группы	Снижение водопоглощения бетона в 2,0÷4,9 раза через 28 суток твердения.
Гидрофобизирующая III группы	Снижение водопоглощения бетона в 1,4÷1,9 раза через 28 суток твердения.
Повышающая защитные свойства бетона по отношению к стальной арматуре	Обеспечение значения плотности тока пассивации стали не менее 10 мкА/см ² при потенциале пассивации стали 300 мВ для бетона основного состава с добавкой 3 % CaCl ₂ .

Оптимальное количество добавок устанавливают с учетом рекомендаций, изложенных в стандартах и технических условиях на конкретные виды добавок, и оптимизируют при подборе состава экспериментально.

Область применения добавок для различных типов конструкций и условий их эксплуатации не должна выходить за пределы, указанные в стандартах и технических условиях.

2.6 Вода

Вода, применяемая при приготовлении бетонных смесей, должна соответствовать требованиям СТБ 1114 по следующим параметрам:

- содержание в воде органических поверхностно – активных веществ, сахаров или фенолов не должно быть более 10 мг/л (каждого);
- вода не должна содержать пленки нефтепродуктов, жиров, масел;
- в воде, применяемой для затворения бетонных смесей и поливки бетона, не должно быть окрашивающих примесей, если к бетону предъявляют требования технической эстетики;
- вода для затворения бетонной смеси при изготовлении напряженных железобетонных конструкций не должна содержать растворимых солей, ионов SO_4^{-2} , Cl^{-1} , взвешенных частиц сверх максимально допустимого содержания:
 - растворимых солей – 2000 мг/л;
 - ионов SO_4^{-2} – 600 мг/л;
 - ионов Cl^{-1} – 350 мг/л;
 - взвешенных частиц – 200 мг/л;
- вода не должна содержать так же примесей в количествах, нарушающих сроки схватывания и твердения цементного теста и бетона, снижающих прочность и морозостойкость бетона;
- окисляемость воды не должна быть более 15 мг/л;
- водородный показатель воды (рН) не должен быть менее 4,0 и более 12,5;

Допускается применение технических и природных вод, загрязненных стоками, содержащих примеси в количествах, превышающих установленные, кроме примесей ионов Cl^{-1} , при условии обязательного соответствия качества бетона показателям, заданными проектом.

ГЛАВА 3. ПРОЕКТИРОВАНИЕ СОСТАВА БЕТОНА

3.1 Методика расчета состава тяжелого бетона

Методика расчета состава тяжелого бетона с учетом его структурных и технологических особенностей применима для бетонных смесей, уплотняемых вибрацией, вибрацией с пригрузом, тромбованием. Рассматриваемая методика позволяет точнее и полнее учитывать специфические особенности используемых для приготовления бетона заполнителей и цемента, а также принимать во внимание ряд технологических особенностей формирования изделий, оказывающих влияние на качество бетона.

Для выполнения расчетов при проектировании состава бетона необходимо иметь следующие сведения о компонентах бетона:

- активности (марке) цемента R_u ;
- водопотребности цемента (в/ц нормальной густоты) $K_{нз}$;
- насыпной плотности цемента ρ_u^H ;
- истинной плотности цемента ρ_u ;
- фракционном составе крупного и мелкого заполнителей, их происхождении и минералогическом составе;
- плотности зерен песка ρ_n^3 и крупного заполнителя ρ_k^3 ;
- насыпной плотности заполнителей ρ_n^H и ρ_k^H , и плотности в виброуплотненном состоянии ρ_n^e и ρ_k^e ;
- пустотности заполнителей в виброуплотненном состоянии P_n^e и P_k^e .

3.1.1 Общие положения.

Выбор активности (марки) цемента

При выборе марки цемента для обеспечения заданной прочности бетона в конструкции (его марки или класса) необходимо руководствоваться следующими положениями.

Для получения связной структуры цементного теста в бетоне активность цемента (R_u) должна быть в пределах $0,7 \div 2,0$ от требуемой прочности бетона (R_B). При значениях отношения активности цемента к прочности бетона меньше $0,7$ и больше $2,0$ цементное тесто теряет связность, что приводит к ухудшению физико-механических свойств цементного камня и бетона, снижению морозостойкости и стойкости в агрессивных средах, повышению проницаемости бетона.

Для вибрированного бетона указанное соотношение должно быть в пределах $1,2 \div 2,0$, вибрированного с пригрузом – $1,0 \div 1,2$. Отношение в интервале $R_u / R_B = 0,7 \div 1,0$ может быть рекомендовано лишь для бетонов, уплотняемых прессованием, тромбованием, виброштампованием и т. п.

В соответствии с «Типовыми нормами расхода цемента для приготовления бетонов сборных и монолитных бетонных, железобетонных

изделий и конструкций» (СНиП 5.01.23–83) марку цемента выбирают в зависимости от средней прочности бетона и условий его твердения. Там же приведены и максимальные и минимальные нормы расхода цемента в бетоне. Для неармированных конструкций минимальный расход цемента должен составлять не менее 200 кг на 1 м³ бетона, для армированных железобетонных конструкций – не менее 220 кг. Максимальный расход цемента в бетоне не должен превышать 600 кг на 1 м³ бетона.

Выбор заполнителей для бетона

Качество заполнителей для бетонов регламентировано соответствующими ТНПА. Прочность крупного заполнителя из плотных пород должна превышать прочность бетона не меньше чем в 2,0÷2,5 раза. Применение гравия для бетона класса С25/30 и выше не рекомендуется. Песок должен иметь модуль крупности 1,5÷3,0, при этом мелкие пески с $M_{кр}$ 1,5÷2,0 рекомендуется использовать в бетонах класса С12/15 и ниже.

При проектировании состава бетона необходимо учитывать, что наибольшая крупность зерен заполнителей не должна превышать 1/3 наименьшего размера конструкции и 3/4 наименьшего расстояния между стержнями арматуры. Для сборных бетонных и железобетонных изделий и конструкций предельная крупность зерен заполнителей должна приниматься не более 20 мм.

3.1.2 Последовательность расчета состава бетона

1. Определение минимальной пустотности смеси заполнителей. Исходя из имеющихся значений насыпной плотности песка и щебня (гравия) в виброуплотненном состоянии, их плотности зерен и пустотности в виброуплотненном состоянии находим:

а) максимальную насыпную плотность смеси (кг/см³) заполнителей в виброуплотненном состоянии:

$$\rho_{см}^g = \rho_k^g + \Pi_k^g \cdot \rho_n^g; \quad (3.1)$$

б) максимальную плотность смеси зерен заполнителей (кг/м³):

$$\rho_{см}^z = \frac{\rho_n^z + \frac{\rho_k^g \cdot \rho_k^z}{\Pi_k^g \cdot \rho_n^g}}{1 + \frac{\rho_k^g}{\Pi_k^g \cdot \rho_n^g}}; \quad (3.2)$$

в) минимальный объем пустот (м³) смеси заполнителей

$$V_{п.см} = 1 - \frac{\rho_{см}^g}{\rho_{см}^z}. \quad (3.3)$$

2. Построение графика изменения пустотности смеси заполнителей в зависимости от объемов песка и щебня (гравия) в смеси (рис. 3.1).

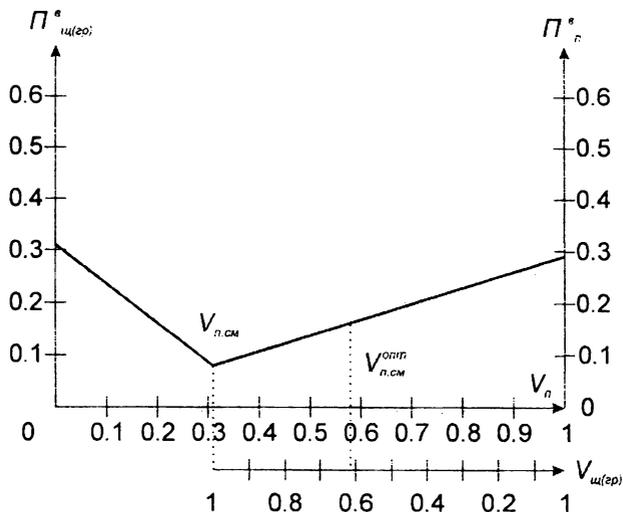


Рисунок 3.1 – Изменение пустотности смеси заполнителей ($V_{п.см}$) в зависимости от объемов крупного заполнителя и песка

По оси ординат откладывают пустотность щебня (гравия) и песка, а по оси абсцисс, один под другим, соответственно, объемы песка и крупного заполнителя, учитывая, что минимальная пустотность смеси заполнителей имеет место тогда, когда объем песка в смеси заполнителей будет равен объему пустот щебня (гравия), а объем крупного заполнителя в смеси равен $1,0 \text{ м}^3$.

Имея график изменения пустотности смеси заполнителей, приступают к проектированию оптимального состава бетона по заданным характеристикам удобоукладываемости бетонной смеси и прочности бетона.

3. Определение оптимальной пустотности смеси и объемов заполнителей в бетоне.

Оптимальная пустотность смеси заполнителей предусматривает раздвижку зерен крупного заполнителя песком и должна быть для вибрированного бетона определена с соблюдением условия

$$V_{п.см}^{opt} \geq 1.1 \cdot V_{к} \cdot \Pi_{к}^a. \quad (3.4)$$

Для виброштампованного и прессованного бетона $V_{щ(гр)}$ принимают равным $0,6 \text{ м}^3$ на 1 м^3 бетона. Наносится на график 3.1 оптимальная пустотность смеси заполнителей и находятся соответствующие ей значения объемов песка $V_{п}$ и крупного заполнителя в бетоне, $V_{щ(гр)}$.

4. Вычисляют массовые доли песка и крупного заполнителя в смеси

$$M_{п} = V_{п} \cdot \rho_{п}^a, \text{ кг}; \quad (3.5)$$

$$M_{щ(гр)} = V_{щ(гр)} \cdot \rho_{к}^a, \text{ кг}. \quad (3.6)$$

5. Вычисляют суммарную поверхность смеси заполнителей в м^2 путем учета процентного содержания каждой фракции заполнителей и величины их удельной поверхности, приведенной в табл. 3.1 и 3.2.

$$S_{\text{см}} = S_n + S_k = 0,001 \cdot \left(M_n \sum_{i=1}^n P_{n,i} S_{n,i} + M_{\text{щ(зр)}} \sum_{i=1}^n P_{\text{щ(зр)},i} S_{\text{щ(зр)},i} \right) \quad (3.7)$$

где $P_{n,i}$, $P_{\text{щ(зр)},i}$ — процентное содержание фракций песка и щебня (гравия);

$S_{n,i}$, $S_{\text{щ(зр)},i}$ — удельные поверхности фракций, $\text{см}^2/\text{г}$.

6. Определяют объем цементного теста (м^3) для приготовления 1 м^3 бетонной смеси:

$$V_m = \frac{V_{\text{н.см}}^{\text{опп}} + 0,000013 \cdot S_{\text{см}}}{V_6} \quad (3.8)$$

где $V_6 = 1 + 0,000013 \cdot S_{\text{см}} \text{ (м}^3\text{)}, \quad (3.9)$

что соответствует выходу бетона при увеличении его объема за счет раздвижки зерен заполнителей цементным тестом.

Таблица 3.1 – Физические свойства песков по данным [1]

Фракции песка	Средний размер зерен	Плотность зерен	Удельная поверхность	Общее водопоглощение	Водопоглощение по поверхности	Водопоглощение парами	Пористость	Плотность
мм	мм	кг/м ³	см ² /г	%	%	%	%	кг/м ³
Морской песок								
5,0÷2,500	3,330	—	—	—	—	—	—	—
2,5÷1,200	1,600	2 500	17,5	1,36	0,70	0,66	6,80	2 600
1,2÷0,600	0,900	2 500	31,5	1,86	1,25	0,61	5,45	2 640
0,6÷0,300	0,450	2 540	58,3	2,89	2,33	0,56	3,70	2 650
0,3÷0,150	0,230	2 550	108,0	4,50	4,32	0,18	0,00	2 650
0,15÷0,088	0,111	2 550	223,0	9,12	8,94	0,18	0,00	2 650
Речной песок								
5,0÷2,500	3,330	2 500	9,4	1,914	0,374	1,54	4,50	2 600
2,5÷1,200	1,600	2 500	20,2	2,070	0,810	1,26	3,70	2 600
1,2÷0,600	0,900	2 500	37,0	2,300	1,480	0,82	2,75	2 600
0,6÷0,300	0,450	2 540	72,0	3,460	2,860	0,58	2,20	2 600
0,3÷0,150	0,230	2 550	141,0	6,000	5,650	0,35	1,33	2 600
0,15÷0,088	0,111	2 560	293,0	12,01	11,70	0,31	1,20	2 600
Кварцевый песок								
5,0÷2,500	3,330	2 620	9,4	1,914	0,374	—	—	2 650
2,5÷1,200	1,600	2 620	18,5	1,788	0,760	0,028	0,7	2 650
1,2÷0,600	0,900	2 650	33,0	1,320	1,320	0	0	2 650
0,6÷0,300	0,450	2 650	66,0	2,650	2,650	0	0	2 650
0,3÷0,150	0,230	2 650	129,0	5,040	5,040	0	0	2 650
0,15÷0,088	0,111	2 650	261,0	10,40	10,40	0	0	2 650

Таблица 3.2 – Физические свойства крупных заполнителей

Вид и размеры зерен (мм) заполнителя	Пористость зерен кг/м ³	Удельная поверхность см ² /г	Общее водопоглощение %	Водопоглощение		Пористость %
				Поверхностью %	Парами %	
Гранитный щебень						
40..70	2 670	0,75	0,71	0,210	0,500	0,90
20..40	2 670	1,35	0,77	0,270	0,500	0,90
10..20	2 670	2,70	0,93	0,510	0,420	0,85
5..10	2 670	5,40	1,21	0,810	0,400	0,83
Базальтовый щебень						
40..70	2 620	0,78	1,56	0,156	1,404	3,80
20..40	2 620	1,40	1,68	0,280	1,400	3,70
10..20	2 620	2,72	1,94	0,540	1,400	3,40
5..10	2 620	5,43	2,10	0,810	1,290	3,40
Известняковый щебень						
40..70	2 600	0,76	1,24	0,152	1,09	1,27
20..40	2 600	1,41	1,38	0,283	1,10	1,27
10..20	2 600	2,82	1,50	0,565	0,95	1,20
5..10	2 600	5,40	1,60	0,800	0,80	1,20
Щебень из песчаника						
40..70	2 450	0,78	4,76	0,160	4,60	8,00
20..40	2 450	1,42	4,80	0,280	4,52	8,00
10..20	2 450	2,68	4,90	0,580	4,32	8,00
5..10	2 450	5,30	4,96	0,800	4,16	7,20
Гравий речной						
40..70	2 600	0,58	1,12	0,120	1,00	1,64
20..40	2 600	1,16	1,24	0,240	1,00	1,64
10..20	2 600	2,31	1,38	0,480	0,90	1,60
5..10	2 600	4,38	1,46	0,660	0,80	1,52

7. Проверяют корректировку расхода заполнителей по выходу бетона:

$$M'_n = \frac{M_n}{V_6}, \text{ кг;} \quad (3.10)$$

$$M'_{щ(зр)} = \frac{M_{щ(зр)}}{V_6}, \text{ кг.} \quad (3.11)$$

8. Определяют общую водопотребность заполнителей (кг):

$$B_3 = 0.0001 \cdot \left(M'_n \sum_{i=1}^n P_{n,i} \cdot B_{n,i} + M'_{щ(зр)} \sum_{i=1}^n P_{щ(зр),i} \cdot B_{щ(зр),i} \right), \quad (3.12)$$

где $B_{n,i}$ и $B_{щ(зр),i}$ — водопотребность отдельных фракций.

9. Определяют количество воды, адсорбируемой поверхностью за-
полнителей (кг):

$$B_{ад} = 0.0001 \cdot \left(M'_n \cdot \sum_{i=1}^n P_{n,i} B_{n,ад,i} + M'_{щ(зр)} \cdot \sum_{i=1}^n P_{щ(зр),i} B_{щ(зр),ад,i} \right), \quad (3.13)$$

где $B_{n,ад,i}$ и $B_{щ(зр),ад,i}$ – количество адсорбируемой воды отдельными
фракциями (табл. 3.1 и 3.2).

10. Вычисляют расход цемента (кг) на 1 м³ бетона

$$Ц = \frac{1000 \cdot V_m - B_{ад}}{1,02 \cdot \left[\frac{1000}{\rho'_u} + K_{не} \cdot (x - 0,293) \right]}, \quad (3.14)$$

где ρ'_u – приведенная плотность цемента, вычисляемая из выраже-

$$\text{ния: } \rho'_u = \frac{1000}{\frac{1000}{\rho_u} - 0,012 + 0,263 \cdot K_{не}}; \quad (3.15)$$

x – относительное водосодержание цементного теста, предель-
ные значения которого имеют границы $0,867 \div 1,65$, в которых
цементное тесто представляет собой связную систему

$x = \frac{(B/C)_T}{K_{не}}$. При вычислении расхода цемента значение x вы-

бирают произвольно в указанных границах.

Полученное значение расхода цемента сравнивают с нормативны-
ми требованиями.

11. Вычисляют водоцементное отношение бетона.

$$(B/C)_б = x \cdot K_{не} + \frac{B_{ад}}{Ц}. \quad (3.16)$$

Сравнивают полученную величину $(B/C)_б$ с нормативными требо-
ваниями, если таковые предусмотрены условиями эксплуатации
конструкции.

12. Определяют проектную прочность бетона

$$R_{сж} = \frac{K_{пер} \cdot K_3 \cdot R_u}{\frac{1 + 1,65 \cdot K_{не}}{K_{не}} \cdot (B/C)_б - 1,65 \cdot K_{не}}, \quad (\text{МПа}), \quad (3.17)$$

где $K_{пер}$ – коэффициент для пересчета марки цемента определяемой в
пластичных растворах (см. табл. 3.3);

K_3 – для гравия равен 1,0; для щебня – 1,13.

Таблица 3.3 – Значения переходного коэффициента для цемента

Коэффициент норм. густоты $K_{не}$	0,22	0,23	0,24	0,25	0,26	0,27	0,28	0,29	0,30	0,31	0,32
Переходный ко- эффициент $K_{пер}$	1,65	1,62	1,55	1,48	1,42	1,36	1,30	1,25	1,20	1,15	1,14

13. Уточняют объем цементного теста в бетоне. В случае необходимости увеличения расхода цемента в бетоне вводят добавку цемента D_u и тогда

$$V'_m = \frac{1,02 \cdot (Ц + D_u) \cdot \left(\frac{1000}{\rho_u} + K_{нв} \cdot (x - 0,293) \right)}{1000} \quad (3.18)$$

14. Вычисляют величину осадки стандартного конуса (см)

$$OK = \frac{20 \cdot \tau \cdot \rho_{б.см} \cdot V'_m \cdot (x - 0,876)}{0,774} \quad (3.19)$$

где $\tau = \frac{V_n}{V_n + V_{н(зр)}};$ (3.20)

$$V_n = \frac{M'_n}{\rho_n^e}; \quad (3.21)$$

$$V_{щ(зр)} = \frac{M'_{щ(зр)}}{\rho_{щ}^e}; \quad (3.22)$$

$\rho_{б.см}$ – средняя плотность смеси, принимаемая равной 2,4 т/м³.

Если осадка конуса получается больше требуемой, уменьшают величину x , если OK больше требуемой величины, вводят добавку цемента D_u . После подбора необходимой величины D_u , проверяется объем бетона в плотном теле.

15. Определяют объем (м³) бетона в плотном теле (уточнение выхода бетонной смеси).

$$V'_6 = \frac{Ц \cdot (1 + D_u)}{\rho'_u} + \frac{M'_n}{\rho_n} + \frac{M'_{щ(зр)}}{\rho_{щ(зр)}} + \frac{(B/Ц)_6 \cdot Ц(1 + D_u)}{\rho_в} \quad (3.23)$$

16. Определяют расход материалов на 1 м³ бетона

$$\text{Цемент} = \frac{Ц \cdot (1 + D_u)}{V'_6}, \text{ кг}; \quad (3.24)$$

$$\text{Песок} = \frac{M'_n}{V'_6}, \text{ кг}; \quad (3.25)$$

$$\text{Щебень (гравий)} = \frac{M'_{щ(зр)}}{V'_6}, \text{ кг}; \quad (3.26)$$

$$\text{Вода} = \frac{Ц \cdot (1 + D_u)}{V'_6}, \text{ кг}. \quad (3.27)$$

17. Выражают состав бетона по массе

$$\frac{Ц}{Ц} : \frac{П}{Ц} : \frac{Щ(ГР)}{Ц} : \frac{В}{Ц} \quad (3.28)$$

18. Определяют коэффициент выхода бетона

$$\beta = \frac{1000}{\frac{Ц}{\rho_{ц}^H} + \frac{П}{\rho_{п}^H} + \frac{Щ(ГР)}{\rho_{щ(гр)}^H}}; \quad (3.29)$$

19. Определяют расчетную плотность бетонной смеси (кг/м³)

$$\rho_6^{pac} = \text{цемент} + \text{вода} + \text{щебень (гравий)} + \text{песок}. \quad (3.30)$$

3.1.3 Пример расчета состава бетона

Необходимо запроектировать состав бетона С16/20, уплотненного вибрацией с удобоукладываемостью смеси ОК = 1..4 см.

Таблица 3.4 – Характеристики цемента и заполнителей

Цемент	Нормальная густота, %	Плотность, г/см ³	Активность, МПа	Марка		
Портландцемент	28,5	3,2	40,8	400		
Крупный заполнитель	Плотность, кг/м ³		Объем пустот в виброуплотненном состоянии	Содержание фракций в %, крупностью, мм		
	зерен	средняя в виброуплотненном состоянии		40..20	20..10	10..5
Гравий речной	2 650	1 820	31,3	45	39,8	12,2
Песок овражный	2 630	1 870	29	9 36	32 17	4 2

1. Определение минимальной пустотности смеси заполнителей:

а) определяем максимальную среднюю плотность смеси заполнителей в виброуплотненном состоянии:

$$\rho_{см}^a = 0,313 \cdot 1870 + 1820 = 2406 \text{ кг/м}^3;$$

б) определяем максимальную среднюю плотность смеси зерен заполнителей:

$$\rho_{см}^b = \frac{2630 + \frac{1820 \cdot 2650}{0,313 \cdot 1870}}{1 + \frac{1820}{0,313 \cdot 1870}} = 2650 \text{ кг/м}^3;$$

в) определяем минимальный объем пустот смеси заполнителей:

$$V_{п.см} = 1 - \frac{2406}{2650} = 0,08 \text{ (т. е. 8 \%)};$$

- г) строим график изменения пустотности смеси заполнителей в зависимости от объема песка и гравия в 1 м^3 смеси:

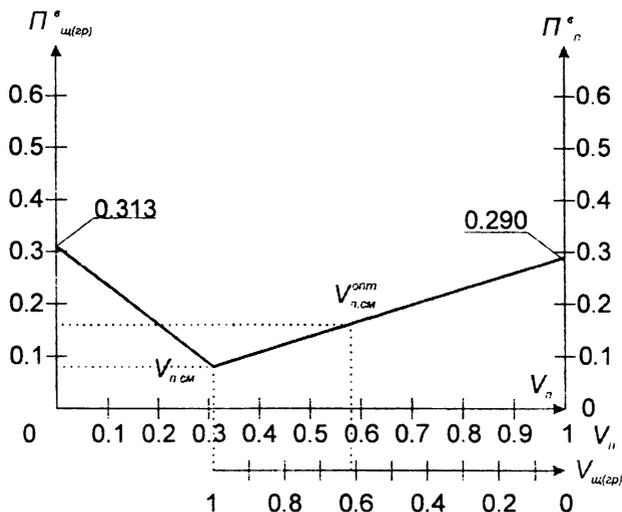


Рисунок 3.2 – График изменения пустотности смеси заполнителей

2. Принимаем оптимальную пустотность смеси $V_{п.см}^{опт} = 0,15$ и в соответствии с построенным графиком расход заполнителей:

по объему:

$$V_{п} = 0,58 \text{ м}^3, V_{зп} = 0,63 \text{ м}^3;$$

по массе:

$$M_{п} = 1\,870 \cdot 0,58 = 1\,085 \text{ кг}, M_{зп} = 1\,820 \cdot 0,63 = 1\,147 \text{ кг}.$$

3. Определяем суммарную удельную поверхность заполнителей:

$$S_{см} = 0,001 \cdot [1085 \cdot (9 \cdot 9,40 + 36 \cdot 20,2 + 32 \cdot 37,0 + 17 \cdot 72,0 + 4 \cdot 141,0 + 2 \cdot 293,0) + 1147 \cdot (45 \cdot 1,14 + 39,8 \cdot 2,31 + 15,2 \cdot 4,38)] = 4799 \text{ м}^2.$$

4. Определяем объем цементного теста на 1 м^3 бетона и выход бетона:

$$V_{с} = 1 + 0,000013 \cdot 4799 = 1,06 \text{ м}^3;$$

$$V_{м} = \frac{0,15 + 0,000013 \cdot 4799}{1,06} = 0,198 \text{ м}^3.$$

5. Корректируем расход заполнителей по выходу бетона:

$$M'_{п} = \frac{1087}{1,06} = 1013 \text{ кг}, M'_{зп} = \frac{1147}{1,06} = 1070 \text{ кг}.$$

6. Определяем общую водопотребность заполнителей:

$$B_3 = 0,0001 \cdot [1013 \cdot (9 \cdot 1,914 + 36 \cdot 2,07 + 32 \cdot 2,3 + 17 \cdot 3,46 + 4 \cdot 6,0 + 2 \cdot 12,01) + 1070 \cdot (45 \cdot 1,24 + 39,8 \cdot 1,38 + 1,38 + 15,2 \cdot 1,46)] = 41,8 \text{ л.}$$

7. Определяем количество воды, адсорбированной на поверхности заполнителей:

$$B_{ад} = 0,0001 \cdot [1013 \cdot (9 \cdot 0,374 + 36 \cdot 0,81 + 32 \cdot 1,48 + 17 \cdot 2,28 + 4 \cdot 5,65 + 2 \cdot 11,7) + 1070 \cdot (45 \cdot 0,24 + 39,8 \cdot 0,48 + 15,2 \cdot 0,66)] = 21,03 \text{ л.}$$

8. Определяем расход цемента на 1 м³ бетона. Принимаем значение относительного водосодержания цементного теста $x = 1,2$:

$$Ц = \frac{1000 \cdot 0,198 - 21,03}{1,02 \cdot \left[\frac{1000}{2760} + 0,285 \cdot (1,2 - 0,293) \right]} = 282 \text{ кг.}$$

9. Определяем В / Ц бетона:

$$В / Ц = 1,2 \cdot 0,285 + \frac{41,8}{282} = 0,49$$

10. Определяем проектную прочность бетона:

$$R_{сж} = \frac{1,27 \cdot 1,0 \cdot 40,8}{\frac{1 + 1,65 \cdot 0,285}{0,285} \cdot 0,49 - 1,65 \cdot 0,285} = 25,2 \text{ МПа.}$$

11. Уточняем объем цементного теста в бетоне. Поскольку расход цемента в бетоне удовлетворяет требованиям СНИП, то принимаем $D_c = 0$:

$$V'_m = \frac{1,02 \cdot (282 + 0) \cdot \left[\frac{1000}{2760} + 0,285 \cdot (1,2 - 0,293) \right]}{1000} = 0,1785 \text{ м}^3.$$

12. Вычисляем величину осадки стандартного конуса:

$$OK = \frac{20 \cdot \frac{\frac{1013}{1870} + \frac{1070}{1820}}{0,774} \cdot 2,4 \cdot 0,1785 \cdot (1,2 - 0,876)}{0,774} = 3,5 \text{ см.}$$

13. Уточняем выход бетона:

$$V'_6 = \frac{282 \cdot (1 + 0)}{3200} + \frac{1013}{2630} + \frac{1070}{2650} + 0,49 \cdot \frac{282 \cdot (1 + 0)}{1000} = 1,015 \text{ м}^3.$$

14. Определяем расход материалов на 1 м³ бетона:

$$\begin{aligned} \text{Цемент} &= \frac{282}{1,015} = 278 \text{ кг;} & \text{Песок} &= \frac{1013}{1,015} = 998 \text{ кг;} \\ \text{Гравий} &= \frac{1070}{1,015} = 1054 \text{ кг;} & \text{Вода} &= 282 \cdot 0,49 = 138 \text{ л;} \end{aligned}$$

3.2 Расчет состава легкого бетона на пористом заполнителе

В отличие от обычного тяжелого бетона при проектировании состава легкого бетона необходимо наряду с прочностью бетона и удобоукладываемостью бетонной смеси обеспечить заданную среднюю плотность бетона. Поскольку средняя плотность бетона зависит от свойств и содержания пористого заполнителя, то расходы мелкого (Π) и крупного (K) заполнителей, определяют из условий получения заданной средней плотности сухого бетона (ρ_{δ}).

При заданном расходе цемента (\mathcal{L}) и воды (B), которые определяют соответствующим образом требуемой прочностью бетона (R_{δ}) и удобоукладываемостью бетонной смеси, расходы заполнителей находят решая систему уравнений

$$\begin{cases} \rho_{\delta} = 1,15 \cdot \mathcal{L} + \Pi + Ж \\ \frac{\mathcal{L}}{\rho_{\mathcal{L}}} + \frac{\Pi}{\rho_{\Pi}^3} + \frac{Ж}{\rho_{K}^3} + B = 1000 \end{cases} \quad (3.31)$$

где $1,15 \cdot \mathcal{L}$ – масса цемента + 15 % химически связанной цементом воды;

$\rho_{\mathcal{L}}$ – плотность цемента, кг/л;

$\rho_{\Pi}^3; \rho_{K}^3$ – плотности зерен мелкого и крупного заполнителей в цементном тесте, кг/г.

Для получения состава легкого бетона при минимальных расходах цемента необходимо правильно выбирать материалы для бетона. Рекомендуется назначать марку цемента в зависимости от проектной марки бетона в соответствии с данными табл. 3.5.

Прочность на сжатие крупного пористого заполнителя должна быть не менее чем указано в табл. 3.6.

Насыпная плотность крупного заполнителя должна быть (как правило) не более указанной в табл. 3.7.

Таблица 3.5 – Марки цементов, принимаемые для приготовления легких бетонов

Класс бетона по прочности на сжатие	Рекомендуемые марки цементов	Допускаемые марки цементов
B12,5	400	300, 500
B15	400	300, 500, 600
B20	400	400, 600
B22,5	500	400, 600
B25	500	400, 600
B30	500	400, 600
B40	600	500

Таблица 3.6 – Минимальная прочность крупных пористых заполнителей в зависимости от заданной марки бетона

Класс бетона по прочности на сжатие	Марка крупного заполнителя по прочности на сжатие	Прочность на сжатие заполнителей при сдавливании в цилиндре МПа		
		пористого гравия	аглопоритового щебня	пористого щебня
B12,5	75	1,5	1,0	0,06
B15	100	2,0	1,2	0,07
B20	125	2,5	1,5	0,08
B22,5	150	3,5	1,8	1,0
B25	200	4,5	2,2	1,2
B30	250	5,5	2,7	1,4
B40	300	6,5	3,3	1,6

Таблица 3.7 – Максимальная марка по средней насыпной плотности крупных заполнителей в зависимости от заданной средней плотности бетона

Заданная марка бетона по средней плотности, кг/м ³	Пористый гравий	Пористый щебень
1 200	– / 500	– / –
1 300	– / 600	– / 500
1 400	– / 700	– / 600
1 500	600 / 800	500 / 700
1 600	700 / 900	600 / 800
1 700	800 / –	700 / 900
1 800	900 / –	800 / 1 000

Примечание: Над чертой насыпная плотность крупного заполнителя при использовании в бетоне плотного песка; под чертой насыпная плотность крупного заполнителя при использовании пористого песка

3.2.1 Методика расчета состава бетона

1. Определяют расход цемента в зависимости от заданного класса бетона прочности на сжатие, марки цемента и прочности крупного заполнителя (табл. 3.8).

Таблица составлена для бетонов на плотном песке и заполнителе с крупностью до 20 мм, жесткостью смеси до 5..8 с. При изменении этих условий ориентировочный расход цемента умножают на поправочный коэффициент K_c (табл. 3.9).

Таблица 3.8 – Ориентировочные расходы цемента в бетоне

Класс бетона по прочности на сжатие	Рекомендуемая марка цемента	Расход цемента в кг/м ³ при марке пористого заполнителя по прочности зерна.						
		75	100	125	150	200	250	300
B12,5	400	300	280	260	240	230	220	210
B15	400	–	340	320	300	280	260	250
B20	400	–	–	390	360	330	310	290
B22,5	500	–	–	–	420	390	360	330
B25	500	–	–	–	–	450	410	380
B30	500	–	–	–	–	–	480	450
B40	600	–	–	–	–	–	570	540

Таблица 3.9 – Поправочные коэффициенты K_u изменений расхода цемента

Характеристики изменяемых параметров и материалов	Значение поправочного коэффициента K_u для бетона классов по прочности на сжатие						
	B12,5	B15	B20	B22,5	B25	B30	B40
1	2	3	4	5	6	7	8
Цемент марки							
300	1,15	1,20	–	–	–	–	–
400	1,00	1,00	1,00	1,15	1,20	1,25	–
500	0,90	0,80	0,85	1,00	1,00	1,00	1,10
600	–	–	0,80	0,90	0,88	0,85	1,00
Песок:							
плотный	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
пористый	1,10	1,10	1,10	1,10	1,10	1,10	1,10
Наибольшая крупность заполнителя, мм							
40	0,90	0,90	0,93	0,93	0,95	0,95	0,95
20	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
10	1,10	1,10	1,07	1,07	1,05	1,05	1,05
Жесткость смеси, с							
5..8	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
8..12	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90
12..20	0,85	0,85	0,85	0,85	0,85	0,85	0,85
Подвижность смеси, см							
1..2	1,07	1,07	1,07	1,07	1,07	1,07	1,07
2..5	1,10	1,10	1,10	1,10	1,10	1,10	1,10
8..12	1,25	1,25	1,25	1,25	1,25	–	–

2. Устанавливают начальный расход воды в зависимости от заданной удобоукладываемости смеси, вида и крупности заполнителя (таблица 3.10).

Таблица 3.10 – Ориентировочные расходы воды в бетоне (B_0) при использовании плотного песка и пористого крупного заполнителя

Осадка конуса, см	Жесткость, с	Предельная крупность заполнителя, мм					
		гравия			щебня		
		10	20	40	10	20	40
8..12	–	235	220	205	265	250	235
3..7	–	220	205	190	245	230	215
1..2	3..5	205	190	175	225	210	195
–	5..8	195	180	165	215	200	185
–	8..12	185	170	160	200	185	175
–	15..20	175	160	150	190	175	165

Примечание: При использовании пористого песка расход воды увеличивается на 30..50 л или конкретизирован с учетом возрастания не только водопотребности песка, но и при повышенных расходах цемента, а также в зависимости от объемной концентрации крупного заполнителя в бетоне (смотри дальнейший ход расчета)

3. Определяют объемную концентрацию крупного заполнителя (табл. 3.11) в зависимости от выбранного расхода цемента и воды, средней плотности бетона, плотности зерен крупного заполнителя и водопотребности песка. Промежуточные значения находят по интерполяции.

Таблица 3.11 – Объемная концентрация крупного заполнителя (K_0) в бетоне

Средняя плотность бетона ρ_b в кг/м ³	Плотность зерен заполнителя ρ_z в кг/л	Водопотребность песка. %								
		6			8			10		
		Расход воды. л								
		160	200	240	160	200	240	160	200	240
1500	1.0	0.47	0.43	0.38	0.46	0.41	0.35	0.45	0.40	0.32
	1.2	0.50	0.46	0.42	0.50	0.45	0.40	0.48	0.46	0.38
	1.4	–	0.50	0.46	–	0.49	0.45	–	0.48	0.43
1600	1.0	0.43	0.38	0.32	0.42	0.35	0.25	0.39	0.32	–
	1.2	0.47	0.42	0.35	0.46	0.40	0.30	0.44	0.38	0.27
	1.4	0.50	0.46	0.41	0.50	0.45	0.39	0.48	0.43	0.36
	1.6	0.54	0.50	0.45	0.53	0.49	0.44	0.53	0.48	0.43
1700	1.0	0.39	0.31	–	0.36	0.26	–	0.32	–	–
	1.2	0.43	0.38	0.27	0.41	0.33	–	0.38	0.28	–
	1.4	0.47	0.41	0.33	0.45	0.39	0.30	0.43	0.36	0.29
	1.6	0.50	0.46	0.40	0.49	0.44	0.37	0.48	0.42	0.31
	1.8	0.54	0.50	0.45	0.53	0.49	0.43	0.53	0.48	0.41
1800	1.2	0.37	0.30	–	0.33	–	–	–	–	–
	1.4	0.42	0.34	0.25	0.39	–	–	0.36	–	–
	1.6	0.45	0.40	0.26	0.45	0.37	0.25	0.42	0.30	–
	1.8	0.51	0.45	0.38	0.49	0.44	0.30	0.48	0.41	0.27
	2.0	–	0.5	0.44	–	0.49	0.42	–	0.48	0.44

Примечание: Значения K_0 , приведенные в таблице, справедливы при расходе цемента 300 кг/м³. На каждые 100 кг увеличения расхода цемента K_0 увеличивается на 0.01 или уменьшается на ту же величину при снижении расхода цемента на 100 кг

Объемная концентрация крупного заполнителя не должна превышать более чем на 0.05 оптимальное значение, указанное в таблице 3.12.

Таблица 3.12 – Оптимальные значения объемной концентрации крупного заполнителя

Межзерновая пустотность в отн. ед.	Объемная концентрация K_0 крупного заполнителя при		
	Ж=8 с и более	ОК 1..2 см Ж 3..8 с	ОК = 3 см и более
0.36	0.52	0.49	0.47
0.38	0.50	0.47	0.45
0.40	0.48	0.45	0.43
0.42	0.46	0.43	0.41
0.44	0.44	0.41	0.39
0.46	0.42	0.39	0.37
0.48	0.40	0.37	0.35
0.50	0.38	0.35	0.33
0.52	0.36	0.33	0.31
0.54	0.34	0.31	0.29

Если K_0 больше оптимального значения, то необходимо использовать в бетоне более легкие заполнители.

4. Определяют расход крупного заполнителя на 1 м^3 бетона (кг):

$$K = K_0 \cdot \rho_k^3, \quad (3.32)$$

где ρ_k^3 – плотность зерен крупного заполнителя в цементном тесте, кг/м^3 .

5. Расход плотного песка устанавливают исходя из требуемой плотности бетона и расходов цемента и крупного заполнителя (кг):

$$\Pi = \rho_b - 1.15 \cdot \text{Ц} - K \quad (3.33)$$

6. Общий расход воды определяют по ориентировочному B_0 с учетом поправок B_1, B_2 и B_3 :

$$B = B_0 + B_1 + B_2 - B_3, \quad (3.34)$$

где B_1 – поправка на водопотребность песка, отличающегося от водопотребности плотного песка, среднее значение которой принято равным 7 %. Изменение водопотребности песка (B_n) на 1 % изменяет расход воды на 0.02 л/г абсолютного объема песка,

$$\text{следовательно } B_1 = 0.02 \cdot \frac{\Pi}{\rho_n^3} \cdot (B_n - 7); \quad (3.35)$$

B_2 – поправка на водопотребность при повышенных (более 450 кг/м^3) расходах цемента, составляющая 0.15 л/м^3 на каждый 1 кг/м^3 расхода цемента сверх 450 кг/м^3 :

$$B_2 = 0.15 \cdot (\text{Ц} - 450) \text{ л.} \quad (3.36)$$

B_3 – поправка расхода воды на величину объемной концентрации крупного заполнителя, отличающейся оптимальной, равной $0.35..0.4$, при которой водопотребность смеси минимальная.

$$B_3 = 2000 \cdot (K_0 - 0.37)^2 \text{ л.} \quad (3.37)$$

3.2.2 Пример расчета керамзитобетона

Пример расчета керамзитобетона класса по прочности на сжатие В20 со средней плотностью в сухом состоянии 1700 кг/м³ при подвижности смеси ОК = 2..5 см.

Материалы: цемент марки 400

Песок кварцевый, плотностью 2.65 кг/л, водопотребностью 6.5 %

Керамзитовый гравий марки 700.

Таблица 3.13 – Характеристики керамзитового гравия

Свойство	Фракции		Смесь фракций
	5..10 мм	10..20 мм	
Средняя насыпная плотность, кг/м ³	670	650	680
Плотность зерен в цементном тесте, кг/л	1.25	1.19	1.22
Прочность, определяемая в цилиндре, МПа	5.9	5.1	5.5
Пустотность	0.46	0.45	0.41

Принимаем соотношение фракций 5..10 и 10..20 мм 40 : 60 (по массе), отсюда плотность зерен смеси фракций:

$$\rho_{см}^3 = \frac{100}{\frac{40}{1.25} + \frac{60}{1.19}} = 1.22 \text{ кг/л,}$$

а средняя прочность керамзита в цилиндре для смеси фракций:

$$R_{см} = 0.01 \cdot (5.9 \cdot 40 + 5.1 \cdot 60) = 5.5 \text{ МПа.}$$

По свойствам керамзитовый гравий удовлетворяет требованиям для получения бетона заданных свойств и соответствует марке по прочности П200 (см. СТБ1217-2000 табл. 5).

1. Определяем расход цемента на 1 м³ бетона. По таблице 3.8 ориентировочный расход цемента 330 кг. С учетом поправочных коэффициентов
 $C = 330 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1.1 = 363 \text{ кг.}$
2. Начальный расход воды: $B_0 = 205 \text{ л.}$
3. Объем крупного заполнителя находим по интерполяции (таблица 3.12) $K_0 = 0.385$, что сравниваем с оптимальным (0.42) и, следовательно допустим, т. к. меньше оптимального.
4. Определяем расход керамзита на 1 м³ бетона
 $K = 1000 \cdot 0.385 \cdot 1.22 = 469.7 \text{ кг} \approx 470 \text{ кг.}$
5. Расход песка на 1 м³ бетона:
 $P = 1700 - 1.15 \cdot 363 - 470 = 813 \text{ кг.}$
6. Определяем общий расход воды на 1 м³ бетона

$$B_1 = 0.02 \cdot \frac{813}{2.65} \cdot (6.5 - 7) \approx 3.1 \text{ л}$$

$$B_2 = 0, \text{ т. к. } C = 345, \text{ что } < 450 \text{ кг}$$

$$B_3 = 2000 \cdot (0.385 - 0.37)^2 = 0.45 \text{ л}$$

$$B = B_0 + B_1 + B_2 + B_3 = 205 + 3.1 + 0.45 = 208.55 \text{ л.}$$

ГЛАВА 4. ОСОБЕННОСТИ ПОДБОРА СОСТАВА БЕТОНОВ С ДОБАВКАМИ

4.1 Проектирование состава бетона с добавкой-ускорителем твердения

Введение добавок-ускорителей твердения способствует повышению прочности бетона. Добавки-ускорители твердения позволяют получать более высокий предел прочности или при прочих равных условиях необходимую прочность бетона в более раннем возрасте (чем и оправдывают свое название). Поэтому модификацию бетонов добавками-ускорителями твердения называют химической активацией бетонов.

Введение в бетонную смесь добавок также вызывает сокращение сроков схватывания бетонной смеси. Так, например, при 2 % добавке от массы цемента продолжительность периода от затворения смеси до начала ее схватывания сокращается в два раза, при 4 % – в четыре, а при 5 % – в пять раз.

Уплотнение характеризуется коэффициентом контракции, являющимся отношением теоретического значения средней плотности цементного теста к средней плотности цементного теста в начале его схватывания (табл. 4.1).

Добавки-ускорители твердения способствуют пластификации цементного теста и бетонной смеси. Эффективность пластификации характеризуется коэффициентом снижения водопотребности цемента $K_{нз}$, учитывающим снижение показателя нормальной густоты цементного теста при введении добавки (табл. 4.2).

Таблица 4.1 – Значения коэффициента контракции цементного теста с химическими добавками

Содержание добавки, %	Значение коэффициента контракции при относительном водосодержании цемента X								
	0.9	1.0	1.1	1.2	1.3	1.4	1.5	1.6	1.65
0	1.045	1.043	1.038	1.032	1.026	1.019	1.011	1.003	1.000
1	1.025	1.024	1.021	1.018	1.014	1.010	1.001	1.000	1.000
2	1.015	1.013	1.011	1.009	1.008	1.006	1.000	–	–
3	1.007	1.006	1.000	–	–	–	–	–	–
4	1.001	1.001	1.000	–	–	–	–	–	–
5	1.000	–	–	–	–	–	–	–	–

Таблица 4.2 – Значения коэффициента $K_{не}$

Вид химической добавки	Значения $K_{не}$ при содержании добавки, %				
	1	2	3	4	5
ХК НХ	0.940	0.910	0.890	0.885	0.883
ННХК СН	0.968	0.947	0.928	0.912	0.902
ННК	0.978	0.964	0.951	0.940	0.930

4.1.1 Методика расчета

1. Значение коэффициента активации определяют по формуле:

$$k_{акт} = 1 + (k_y - 1) \cdot k_3, \quad (4.1)$$

где k_y – коэффициент, учитывающий увеличение прочности за счет снижения водосодержания цементного теста в бетоне:

$$k_y = \frac{1}{k_{с.в}^2}; \quad (4.2)$$

k_3 – коэффициент, учитывающий влияния водосодержания цементного теста на эффект активации:

$$k_3 = \frac{\varphi_i - 1}{\varphi_1 - 1}; \quad (4.3)$$

где φ_1 – коэффициент контракции для цементного теста без добавок при $X = 1$ (при нормальной густоте теста).

Принимая во внимание, что коэффициент контракции цементного теста без добавок при $X = 1$ равен 1.043: $k_3 = \frac{\varphi_i - 1}{0.043}$. (4.4)

2. Определяют значения относительного водосодержания цементного теста в бетонной смеси:

$$X = \sqrt{k_k \cdot k_3 \cdot k_{акт} \cdot \frac{R_u}{R_{сж}}}, \quad (4.5)$$

где k_3 – при отношении модулей упругости заполнителя и растворимой части бетона равном примерно 3, принимают 0.95:

$$k_k = 2.55 - 4.29 \cdot K_{не}. \quad (4.6)$$

3. Уточняют значение коэффициента активации и определяют прочность бетона:

$$R_{сж} = \frac{k_k \cdot k_3 \cdot k_{акт} \cdot R_u}{X^2} \quad (4.7)$$

4. Расход крупного и мелкого заполнителей, объем пустот в смеси заполнителей, водопоглощение заполнителей определяют в соответствии с методикой подбора состава для обычного бетона (раздел 3).

5. Объем бетонной смеси с учетом раздвижки зерен заполнителей, объем цементного теста выполняют в соответствии с разделом 3.
6. Расход цемента в бетоне определяют с уточненным показателем нормальной плотности, которая будет изменяться за счет пластификации цементного теста химической добавкой, определяется по формуле:

$$K'_{н2} = K_{с.в} \cdot K_{н2}. \quad (4.8)$$

Расход цемента:

$$Ц = \frac{1000 \cdot V_m}{4 \cdot \left(\frac{1000}{\rho_c} + X \cdot K'_{н2} \right)}. \quad (4.9)$$

При этом значение коэффициента контракции цементного теста для бетонной смеси с химическими добавками берут из таблицы 4.1.

7. Общий расход воды определяют с учетом уточненного показателя нормальной плотности:

$$B = Ц \cdot X \cdot K'_{н2} + B_3. \quad (4.10)$$

4.2 Проектирование состава бетона с пластифицирующей добавкой

Использование пластифицирующих добавок способствует повышению плотности и прочности бетона за счет уменьшения расхода воды вследствие пластифицирующего эффекта и сокращает сроки схватывания цементного теста. Эффект пластификации бетонной смеси добавками обусловлен снижением водопотребности цемента в присутствии добавки, проявляется в уменьшении показателя нормальной плотности цементного теста.

Так, при введении, например, лигносульфаноловых пластификаторов (ЛСТ, ЛСТМ и др.) в размере 0.05, 0.1, 0.15, 0.2, 0.25, 0.3, 0.4 и 0.5 % от массы цемента показатель нормальной плотности цементного теста понижается и характеризуется коэффициентом снижения водопотребности $K_{с.в}$, равным соответственно 0.965, 0.93, 0.91, 0.89, 0.875, 0.86, 0.84 и 0.825. Схватывание наступает в сроки, составляющие соответственно 70, 55, 43, 35, 27, 20, 13 и 10 % от срока схватывания цементного теста без добавок.

Коэффициент снижения водопотребности $K_{с.в}$ для других типов добавок принимается исходя из имеющихся теоретических и экспериментальных исследований.

Для добавок несколько понижающих прочность цементного камня и бетона при тех же значениях водосодержания по сравнению с цементным камнем и бетоном без добавки, вводится дополнительно коэффициент блокировки $K_{бл}$, принимаемый в зависимости от процентного содержания добавок по установленным рекомендациям.

4.2.1 Методика расчета

1. Коэффициент пластификации цементного теста определяется по формуле:

$$k_{nn} = k_y \cdot k_{бл}, \quad (4.11)$$

где $k_y = \frac{1}{k_{с.в}^2}$, (4.12)

$k_{бл}$ – коэффициент блокировки цементных зерен пластифицирующим веществом.

2. Относительное водосодержание цементного теста определяют:

$$X = \sqrt{k_x \cdot k_3 \cdot k_{nn} \cdot \frac{R_u}{R_{сж}}}. \quad (4.13)$$

3. При принятом значении X прочность бетона при сжатии составляет:

$$R_{сж} = \frac{k_x \cdot k_3 \cdot k_{nn} \cdot R_u}{X^2}. \quad (4.14)$$

Далее методика расчета аналогична приведенной для бетонов с добавкой – ускорителем твердения.

4.3 Проектирование состава бетона с воздухововлекающей добавкой

Использование воздухововлекающих добавок позволяет получать бетоны повышенной морозостойкости и с улучшенными теплотехническими свойствами.

Эффективность добавок проявляется за счет вовлечения воздуха в цементном тесте бетонной смеси и повышения его замкнутой пористости.

Содержание вовлеченного воздуха в цементном тесте при введении, например, СНВ в количестве 0.01, 0.02, 0.05, 0.1, 0.2 и 0.3 % от массы цемента составляет соответственно 3.0, 4.5, 6.0, 7.5, 9.0 и 10.0 %. Для других видов добавок содержание вовлеченного воздуха принимается из имеющихся теоретических и экспериментальных исследований.

Воздухововлечение способствует пластификации бетонной смеси и цементного теста. Пластификация характеризуется коэффициентом снижения водопотребности цемента $K_{с.в}$, учитывающим снижение показателя нормальной густоты цементного теста при введении добавки. Так, снижение водопотребности цемента с добавкой становится заметным лишь при содержании добавки СНВ более 0.05 % от массы цемента. Значения коэффициента $K_{с.в}$ при содержании добавки 0.05, 0.1, 0.2 и 0.3 % равны соответственно 0.993, 0.984, 0.955 и 0.912. Так же принимается значение $K_{с.в}$ для других видов добавок.

Вовлечение воздуха в цементное тесто и бетонную смесь приводит к снижению прочности бетона. Исследованиями доказано, что каждый процент повышения объема вовлеченного воздуха приводит к снижению прочности примерно на 6 %.

С учетом свойств бетона с воздухововлекающими добавками методика определения состава бетона будет иметь следующие дополнения:

- 1) по содержанию введенной добавки необходимо определить объем вовлеченного воздуха (или его процентное содержание от объема цементного теста в бетоне);
- 2) по процентному содержанию вовлеченного воздуха необходимо определить величину снижения прочности бетона и среднее значение снижения его плотности.

4.3.1 Методика расчета

1. Определяют значение коэффициента, учитывающего воздухововлечение в цементном тесте, по формуле:

$$k_{e.e} = k_y \cdot (1 - 6 \cdot P_e), \quad (4.15)$$

$$\text{где } k_y = \frac{1}{k_{c.e}^2}, \quad (4.16)$$

P_e — относительное содержание вовлеченного воздуха в цементном тесте.

2. Относительное водосодержание цементного теста составит:

$$X = \sqrt{k_x \cdot k_s \cdot k_{e.e} \cdot \frac{R_u}{R_{сж}}}. \quad (4.17)$$

3. При принятом значении X прочность бетона составит:

$$R = \frac{k_x \cdot k_s \cdot k_{e.e} \cdot R_u}{X^2}. \quad (4.18)$$

Далее методика расчета аналогична приведенным выше, за исключением определения расхода цемента:

$$U = \frac{(V_m - V_m \cdot P_e) \cdot 1000}{\varphi \cdot \left(\frac{1000}{\rho_u} + X \cdot k'_{не} \right)}, \quad (4.19)$$

$$\text{где } k'_{не} = k_{c.e} \cdot k_{не} \quad (4.20)$$

ГЛАВА 5. ОСОБЕННОСТИ РАСЧЕТА СОСТАВА БЕТОНА НА ОСНОВЕ НАПРЯГАЮЩЕГО ЦЕМЕНТА

В отличие от традиционных бетонов, бетоны на основе напрягающего цемента в процессе твердения претерпевают обычное расширение, а в условиях, когда деформациям расширения препятствуют внешние ограничивающие связи (например, расположенная в конструкции арматура), в структуре бетона формируется собственное напряжение сжатия (самонапряжение). Физико – химическая сторона явления расширения композитных материалов на основе напрягающих и расширяющихся вяжущих достаточно подробно изучена и представлена в ряде монографий.

Напрягающий бетон – это бетон на основе минерального вяжущего вещества, показывающий в процессе твердения в естественных условиях временное и прогрессивное управляемое увеличение объема, приводящее к его самонапряжению. Марки по энергоактивности вяжущего вещества согласно [5], являющегося источником расширения напрягающего, и его расход в составе бетонной смеси устанавливают расчетом в зависимости от требуемой величины самонапряжения бетона в конструкции и его обеспеченной длительной прочности.

Бетоны, у которых величину самонапряжения не нормируют, а расход расширяющегося вяжущего назначают из обеспечения требуемой длительной прочности, (см. главы 2, 3) называют бетоном с **компенсированной усадкой**.

Для напрягающего бетона, согласно [5], подобранный расчетом номинальный состав (см. главы 2, 3) корректируют в части расхода напрягающего цемента с учетом проектной марки бетона S_p по самонапряжению и энергоактивности (марки по самонапряжению) напрягающего цемента $f_{c,ce}$ устанавливают по результатам стандартных испытаний НЦ [5, 7].

Расход напрягающего цемента для бетонных смесей с маркой по удобоукладываемости П1 (подвижность 1..4 см) на плотном и мелкозернистом заполнителе следует определять:

$$Ц = 550 \cdot \left(\frac{f_{ce,d}}{f_{c,ce}} \right)^2 + 450, \quad (5.1)$$

где $f_{ce,d}$ – нормативное самонапряжение напрягающего бетона, численно равно проектной марке по самонапряжению S_p (см. таблицу 5.1).

Таблица 5.1 – Марки по самоупрочению бетонов на напрягающем цементе

Марка цемента по энергоактивности	НЦ – 20					НЦ – 40			НЦ – 60*		
Марка бетона по самоупрочению, S_p , МПа	0.6	0.8	1.0	1.2	1.5	2.0	3.0	4.0	4.5	5.0	6.0
Примечание: значения для цемента со (*) требуют лабораторной проверки											

Для бетонных смесей с маркой по удобоукладываемости ПЗ (подвижность 10..15 см) $f_{ce,d}$ вводят в расчет с коэффициентом 1, 2, а в промежуточных ситуациях – по интерполяции. При использовании пластифицирующих добавок для обеспечения повышенной подвижности смеси корректирующий коэффициент не вводят. Расход воды затворения (л/м³ смеси) для получения бетонной смеси с подвижностью 1..4 см следует определять по формуле:

$$V = 0.2 \cdot C + 100, \quad (5.2)$$

а для смеси с подвижностью 10..15 см по формуле:

$$V = 0.18 \cdot C + 135. \quad (5.3)$$

При этом для сохранения расчетной средней плотности бетонной смеси одновременно следует корректировать расход заполнителей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРНЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. М. А. Шалимо. Лабораторный практикум по технологии бетонных и железобетонных изделий.– Минск: Выш. школа, 1987. - с. 194.
2. И. Н. Ахвердов. Теоретические основы бетонирования.– Минск: Высшейшая школа, 1991. - с. 187.
3. Ю. М. Баженов. Способы определения состава бетона различных видов.– М.: Стройиздат, 1975. - с. 271.
4. В. П. Сизов. Проектирование составов тяжелого бетона. НИИЖБ Госстроя СССР.– М.: Стройиздат, 1979. - с.101.
5. ТУ 67 – 938 – 87 (взамен ТУ 67–654–85) Бетон на напрягающем цементе. - М.:НИИЖБ. 1998. – 24 с.
6. ТУ 21–26–13–90 Цемент напрягающий.– Взамен ТУ 21–20–18–80; Введ. 01.01.91.– М.: Минстроймат, 1990. – 15 с.
7. Пособие по проектированию самонапряженных железобетонных конструкций (к СНиП 2.03.01–84)/НИИЖБ.– М.: ЦИЧП, 1986. – 64 с.

Учебное издание

Сырица Галина Ивановна

Тур Виктор Владимирович

Довнар Надежда Ивановна

Басов Виктор Степанович

ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ ПРЕДПРИЯТИЯ СБОРНОГО ЖЕЛЕЗОБЕТОНА

ЧАСТЬ 2: ТЕХНОЛОГИЯ БЕТОНА

Конспект лекций для студентов специальности

70 01 01 «Производство строительных изделий и конструкций»

Под общей редакцией В.В. Тура и Г.В. Сырицы

Ответственный за выпуск **В.С. Басов**

Редактор **Т.В. Строкач**

Компьютерная верстка **Е.А. Боровикова**

Корректор **Никитчик Е.В.**

Подписано к печати 10.03.2008 г. Бумага «Снегурочка».

Формат 60×84 ¹/₁₆. Гарнитура «Arial». Усл. печ. л. 2,33. Уч.-изд. л. 2,5.

Тираж 120 экз. Заказ № 310. Отпечатано на ризографе учреждения образования «Брестский государственный технический университет».

224017, г. Брест, ул. Московская, 267.