

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
«Оренбургский государственный университет»  
Кафедра автомобильных дорог и строительных материалов

# **РАСЧЕТ СОСТАВА МЕЛКОЗЕРНИСТОГО ШЛАКОВОГО БЕТОНА**

Методические указания

Составитель  
В. И. Турчанинов

Рекомендовано к изданию редакционно-издательским советом федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Оренбургский государственный университет» для обучающихся по образовательным программам высшего образования по направлениям подготовки 08.03.01 Строительство и 08.04.01 Строительство

Оренбург  
2021

УДК 691:32(076.5)

ББК 38.33я7

Р 24

Рецензент – доцент, кандидат технических наук Л. В. Солдатенко

Р 24      **Расчет состава мелкозернистого шлакового бетона:** методические указания / составитель В. И. Турчанинов; Оренбургский гос. ун-т. Оренбург : ОГУ, 2021. – 16 с.

Методические указания к практическим занятиям излагают порядок выполнения расчета состава мелкозернистого шлакового бетона и его корректировку для обеспечения заданных свойств.

Методические указания предназначены для обучающихся по направлениям подготовки 08.03.01 Строительство, профиль «Производство и применение строительных материалов, изделий и конструкций», и 08.04.01 Строительство, профиль «Ресурсо- и энергосберегающие технологии в строительном материаловедении», всех форм обучения.

УДК 691.32(076.5)

ББК 38.33я7

© Турчанинов В.И.,  
составление, 2021

© ОГУ, 2021

## Содержание

Введение.....	4
1 Общие положения .....	5
2 Описание лабораторной работы .....	7
2.1 Подготовка заполнителей.....	7
2.2 Расчет состава бетонной смеси.....	9
Пример расчета.....	14
Список использованных источников .....	16

## Введение

Утилизация отходов промышленности в настоящее время является одним из наиболее актуальных вопросов, как в плане экономии минерально-сырьевых ресурсов, так и в плане охраны окружающей среды. К таким отходам могут быть отнесены металлургические шлаки, образующиеся при выплавке черных и цветных металлов.

Использование промышленных отходов чрезвычайно важно, поскольку обеспечивает производство богатым источником дешевого и частично уже подготовленного сырья; приводит к экономии капитальных вложений, необходимых для строительства предприятий, добывающих и перерабатывающих сырье; высвобождает значительные площади земельных угодий, занятых отвалами.

Это позволяет на 40 % удовлетворить потребности в сырье, от 10 % до 30 % снизить затраты на изготовление строительных материалов в сравнении с производством их из природного сырья, сократить объем капитальных вложений от 30 % до 50 %.

Следует отметить лидирующую роль России в использовании металлургических шлаков при производстве портландцемента. Но при производстве портландцемента главным образом используют гидравлически активные доменные гранулированные шлаки, в то время как малоактивные шлаки черной и цветной металлургии не находят должного применения. В то же время ряд регионов страны нуждается в качественных заполнителях для производства бетона, в том числе и мелкозернистого.

## 1 Общие положения

На основе металлургических шлаков или с частичным их использованием могут быть изготовлены следующие виды бетонов:

- бетоны обычные тяжелые со шлаковым щебнем;
- бетоны мелкозернистые с плотным шлаковым заполнителем;
- бетоны легкие с заполнителем из шлаковой пемзы;
- бетоны легкие с заполнителем из гранулированного шлака;
- бетоны ячеистые с вяжущим либо заполнителем на основе металлургических шлаков.

Учитывая более низкую стоимость металлургических шлаков в сравнении с природными каменными материалами, используемыми в качестве заполнителя, а также и более низкую стоимость вяжущих на основе металлургических шлаков в сравнении с традиционным портландцементом, всегда удается добиться снижения стоимости бетона при использовании металлургических шлаков.

По большинству показателей литой шлаковый щебень не уступает природному. По физико-механическим и деформативным характеристикам бетон на литом щебне не уступает бетону на гранитном, базальтовом и известняковом щебне, а по прочности, трещиностойкости и теплопроводности превосходит его.

К тому же он обладает повышенной вязкостью, что дает возможность применять его не только в обычных тяжелых бетонах, но и в бетонах для дорожных конструкций, испытывающих динамические нагрузки.

Такие бетоны характеризуются также повышенной структурной прочностью бетонной смеси - на 70-80 % выше в сравнении с бетоном на гранитном щебне. Это позволяет повысить качество изделий, изготавливаемых с немедленной распалубкой.

Мелкозернистый бетон, не содержащий щебня, применяют для изготовления тонкостенных железобетонных конструкций. Может

использоваться и для изготовления обычных бетонных и железобетонных конструкций в районах, где отсутствует щебень и гравийно-песчаная смесь.

Свойства мелкозернистого бетона (МЗБ) определяются теми же факторами, что и обычного. Однако в отличие от обычного бетона для него характерны большая однородность и мелкозернистость, высокое содержание цементного камня, отсутствие жесткого каменного скелета, повышенные пористость и удельная поверхность твердой фазы.

В песчаном бетоне (разновидность МЗБ с максимальным размером зерен заполнителя не более 5 мм) применение мелкого песка приводит к необходимости увеличения расхода воды для сохранения подвижности бетонной смеси и заметно снижает прочность бетона. Если в обычном бетоне замена крупного песка мелким понижает прочность от 5 % до 10 %, то в МЗБ – от 25 % до 30 %, а максимальная прочность может снизиться в 2-3 раза.

Освоение массового производства конструкций и изделий из МЗБ на природном песке сдерживается отсутствием кондиционных крупнозернистых чистых песков, а также присущими бетону на природных песках недостатками – повышенной пористостью (проницаемостью), усадкой и ползучестью. В районах с развитой металлургической промышленностью для изготовления бетонов, в том числе и мелкозернистых, могут быть использованы доменные шлаки – быстро охлажденные (гранулированные) и медленно охлажденные (отвальные, слитые в траншеи).

Шлакобетон может достигать прочности при сжатии от 30 до 100 МПа при средней плотности от 1800 до 2300 кг/м<sup>3</sup>. Учитывая высокие прочностные характеристики шлакового заполнителя, наиболее рационально производство высокопрочного МЗШБ.

Оптимальная технология высокопрочного МЗШБ должна заключаться в выборе и применении ряда технологических приемов, таких как:

- способы подготовки заполнителей с учетом их свойств;

- выбор вида вяжущего и оптимального вещественного состава смеси;
- определение рационального зернового состава заполнителей;
- введение химических добавок;
- способы приготовления бетонной смеси;
- способы уплотнения бетонной смеси при формировании изделий;
- способы и режимы ускоренного твердения бетона.

## **2 Описание лабораторной работы**

### **2.1 Подготовка заполнителей**

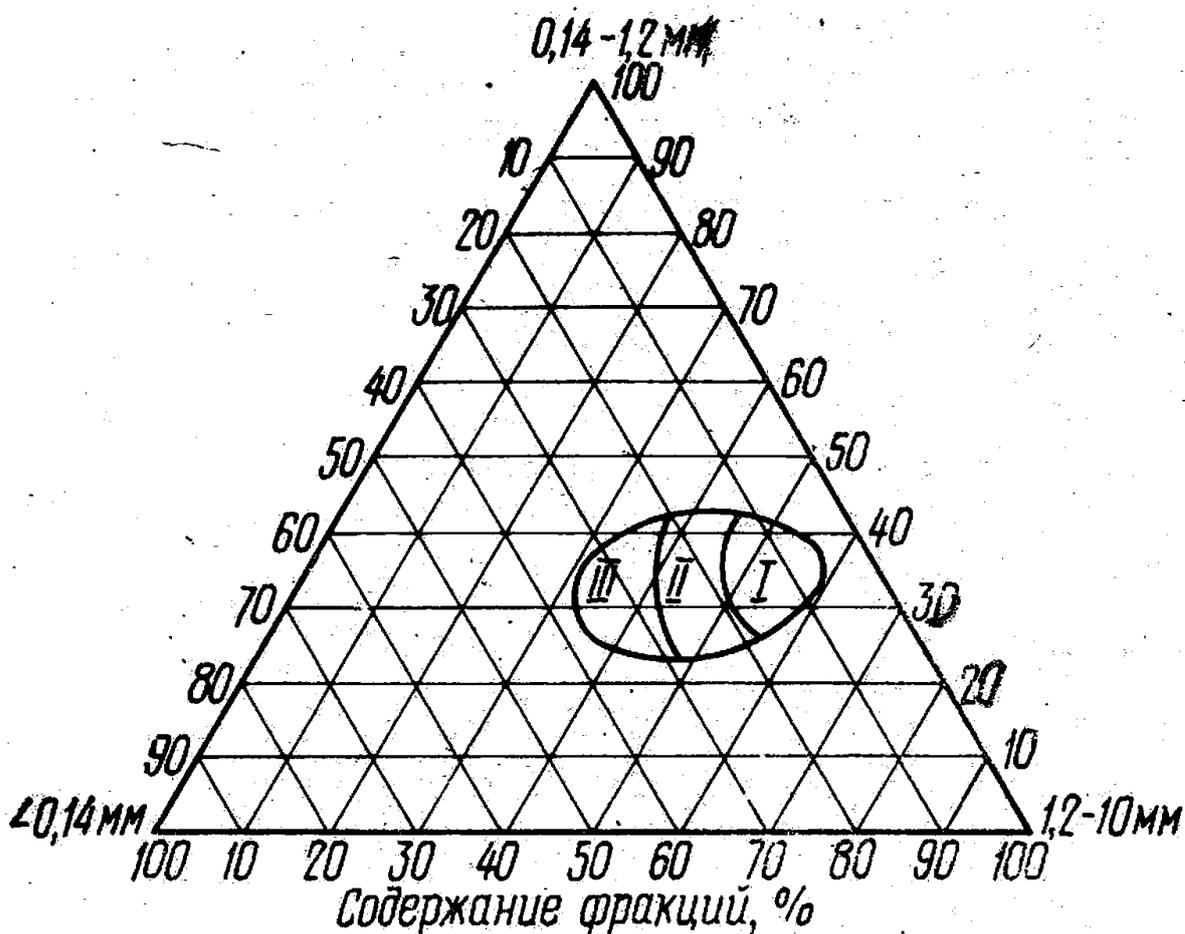
В естественном состоянии граншлак (как заполнитель бетона) представляет собой смесь крупнозернистого песка с пористым мелким щебнем. Более плотная структура бетона с минимальными значениями усадки получается при использовании непрерывного гранулометрического состава заполнителя. Исходный же заполнитель (граншлак) является крупнозернистым, поэтому его необходимо дополнительно подвергать измельчению для получения мелкой фракции. При измельчении разрушаются малопрочные зерна и уже за счет этого качество заполнителя улучшается.

Для получения зерен преимущественно округлой или кубической формы граншлак необходимо измельчать в агрегатах ударного или ударно-стирающего действия: дробилках молотковых, ударно-отражательных и мельницах.

Но одним дроблением невозможно добиться оптимального зернового состава, т. к. в дробленом шлаке содержание мелких частиц близко к оптимальному, но недостаточно количество средних и особенно крупных частиц. В недробленном шлаке, наоборот, низко содержание мелких частиц. Поэтому целесообразно использовать смесь дробленого и недробленого шлаков в соотношении, обеспечивающем оптимальный зерновой состав.

Отсев после дробления в щебень отвального доменного шлака имеет зерновой состав, близкий к оптимальному и, как правило, не требует

корректировки. На его основе можно изготавливать шлакобетон марок 600 и 1000. При этом соотношение между цементом и заполнителем в бетонной смеси изменяется от 1:3 до 1:2. При необходимости получения мелкозернистого бетона более низких марок – от 300 до 600, - используются, тощие бетонные смеси с соотношением между цементом и заполнителем от 1:6 до 1:3. Для обеспечения плотной структуры тощих бетонов в состав заполнителя из отвального доменного шлака следует вводить добавку молотого шлака (микрозаполнитель) в количестве, дополняющем содержание фракции размером менее 0,14 мм до требуемого по рисунку 1.



I – Ц:Ш – от 1:2 до 1:3; II – Ц:Ш – от 1:3 до 1:5; III – Ц:Ш – от 1:5 до 1:6

Рисунок 1 – Оптимальный гранулометрический состав шлака для мелкозернистого бетона в зависимости от соотношения цемент:шлак



В зависимости от требуемой прочности бетона выбирают оптимальный зерновой состав заполнителя. С увеличением расхода цемента прочность бетона возрастает. При этом в бетонной смеси увеличивается содержание дисперсных частиц, поэтому область зерновых составов шлака смещается в направлении стороны треугольника 0,14-1,2 – 1,2-10 мм.

## 2.2 Расчет состава бетонной смеси

Сущность метода заключается в определении соотношения Ц:Ш и расхода компонентов на 1 м<sup>3</sup> бетонной смеси, обеспечивающих получение бетона заданной прочности, а бетонной смеси необходимой подвижности при наименьшем расходе цемента.

Для пропаренных бетонов

$$R_B = AR_{Ц} \sqrt[3]{\frac{Ц}{В}} - 0,4 \quad (1)$$

где  $R_B$  – прочность при сжатии бетона в возрасте 28 суток после пропаривания, МПа;

$R_{Ц}$  – прочность при сжатии цемента, определенная в тех же условиях, МПа;

$A$  – эмпирический коэффициент, учитывающий структуру бетона, характеристики цемента и шлака, особенности технологии.

Формула справедлива при  $K_{упл}$  бетона не менее 0,97.

Расчёт состава бетонной смеси проводят в следующей последовательности.

1 Из формулы 1 выводится формула для расчета водоцементного отношения

$$\frac{В}{Ц} = \frac{A \cdot R_{Ц}}{R_B + A \cdot 0,4 R_{Ц}} \quad (2)$$

Значения коэффициента А принимается по таблице 1.

Таблица 1 – Значения коэффициента А

Плотность шлака $\rho_{ш}$ , г/см <sup>3</sup>	2,3-2,4	2,4-2,5	2,5-2,6	2,6-2,7	2,7-2,8
Коэффициент А	0,6	0,65	0,7	0,75	0,8

2 По рисункам 2 и 3 в зависимости от В/Ц и требуемой подвижности (ОК) или удобоукладываемости (Ж) методом интерполяции находят отношение Ц:Ш. Осадка конуса определяется по ГОСТ 310.4-81, а удобоукладываемость по ГОСТ 10181-2000 посредством конуса с диаметром нижнего основания 100 мм, устанавливаемого в форму размером 100x100x100 мм.

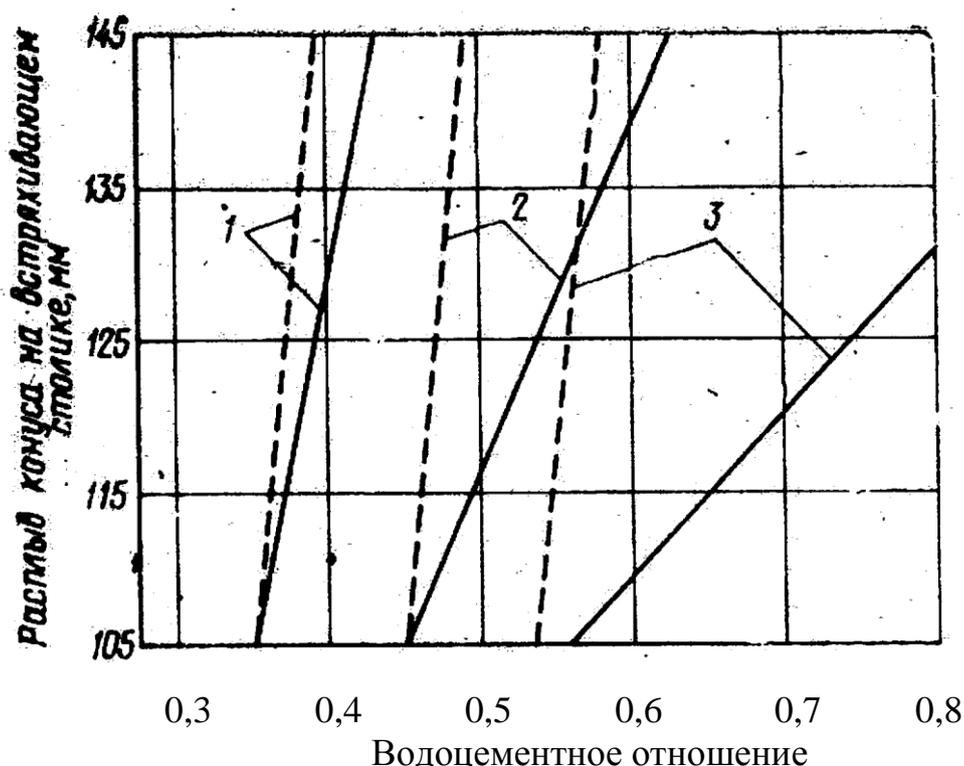
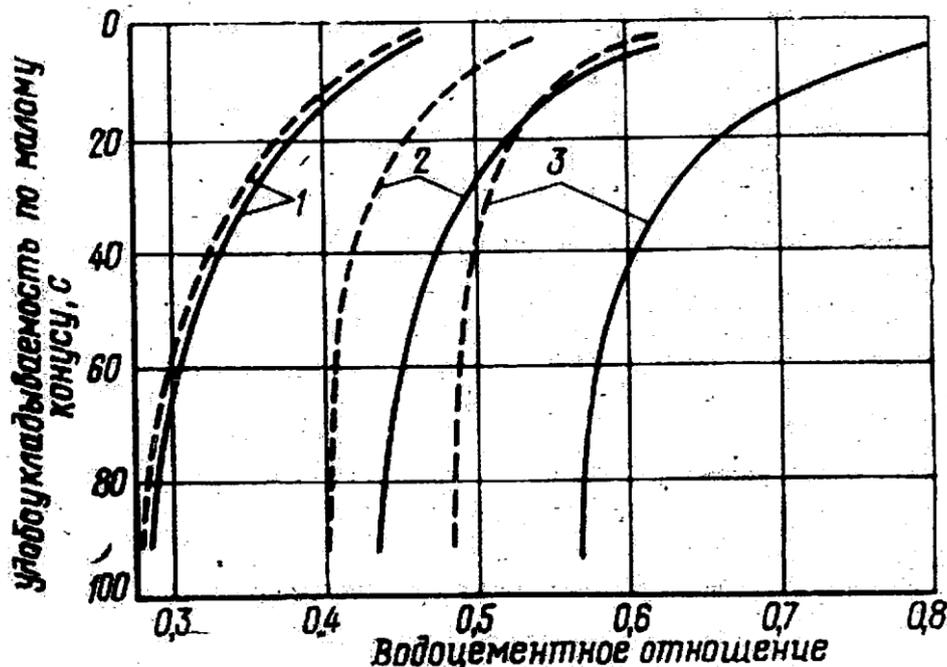


Рисунок 2 - Подвижность мелкозернистых шлакобетонных смесей в зависимости от В/Ц

Графики, представленные на рисунках 2 и 3, построены для шлака с водопотребностью 13 %. При отличных значениях водопотребности поправка принимается по графику, представленному на рисунке 4.



1 – состав 1:2; 2 – состав 1:3; 3 – состав 1:4 ( ----- - для цементно-песчаных смесей на природных заполнителях)

Рисунок 3 - Удобоукладываемость мелкозернистых шлакобетонных смесей в зависимости от В/Ц

3 Определяют расход цемента по формуле

$$Ц = \frac{1000 - BV}{\frac{1}{\rho_{ц}} + \frac{B}{Ц} + \frac{n}{\rho_{ш}}} \quad (3)$$

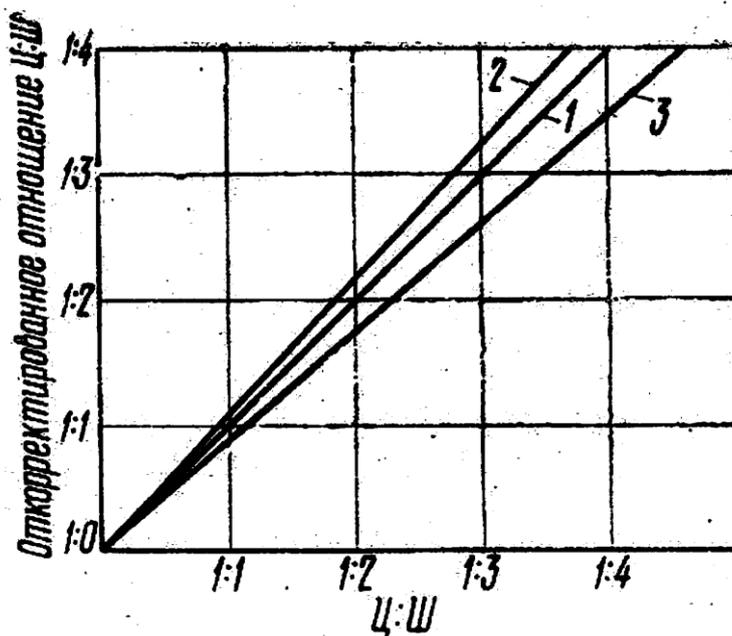
где  $\rho_{ц}$  - плотность цемента, кг/дм<sup>3</sup>;

$\rho_{ш}$  - средняя плотность шлака в цементном тесте, кг/дм<sup>3</sup>;

BV – объём вовлеченного при уплотнении в смесь воздуха, дм<sup>3</sup>;

n – число частей шлака, приходящихся на 1 массовую часть

цемента, определенное по п.2.



1, 2, 3 – водопотребность 13 %, 10 % и 18 % соответственно

Рисунок 4 – Корректировка соотношения Ц:Ш, которое обеспечивает заданную подвижность смеси в зависимости от водопотребности шлака

Для ориентировочных расчётов при уплотнении смесей вибрированием можно принимать следующие значения  $VВ$ ,  $дм^3$ :

- подвижная смесь (расплыв конуса более 115 мм) – 30;
- смесь средней подвижности (расплыв конуса от 110 до 115 мм) – 40;
- жесткая смесь (расплыв конуса менее 110 мм) – 60.

4 Расход воды определяют по формуле

$$В = Ц \frac{V}{Ц} \quad (4)$$

5 Расход шлака определяют по формуле

$$Ш = nЦ \quad (5)$$

6 Расход раствора сульфидно-дрожжевой бражки СДБ, в  $дм^3$

определяют по формуле

$$СДБ = \frac{С Ц}{Д П} \quad (6)$$

где С – количество добавки по сухому веществу, в % от массы цемента;

Ц – количество цемента, кг;

Д – концентрация раствора добавки по сухому веществу, %;

П – плотность раствора добавки, г/см<sup>3</sup>.

Зависимость плотности раствора СДБ от содержания сухого вещества в растворе представлена в таблице 2.

Таблица 2 – Плотность раствора СДБ

Содержание сухого вещества, % от массы раствора	1	5	10	20	30	40	50
Плотность, г/см <sup>3</sup>	1,004	1,021	1,043	1,091	1,144	1,202	1,266

7 Определяют расчетную среднюю плотность цементно-шлаковой бетонной смеси

$$\rho_{см} = Ц+В+Ш, \text{ кг/м}^3 \quad (7)$$

8 На пробных замесах уточняют удобоукладываемость либо подвижность бетонной смеси и при необходимости проводят корректировку её состава. Для повышения подвижности бетонной смеси в неё дополнительно вводят цемент и воду, сохраняя при этом В/Ц, а для снижения подвижности добавляют шлак. Количество вводимых добавок составляет от 5 % до 10 % от их содержания в расчетном составе бетонной смеси.

Затем определяют среднюю плотность свежееуложенной и уплотненной бетонной смеси, которая должна отличаться от расчетной величины не более

чем на  $\pm 2$  %. По средней плотности свежееуложенной бетонной смеси устанавливают окончательный расход материалов на  $1 \text{ м}^3$  бетона.

Затем на контрольных образцах, после твердения их по заданному режиму, проверяют прочность бетона и при необходимости корректируют её изменением  $n$  и В/Ц: для повышения прочности значения В/Ц и  $n$  уменьшают, а для снижения – повышают.

### Пример расчета

Необходимо рассчитать состав мелкозернистого шлакового бетона для тонкостенной конструкции кровли. Марка бетона 400, жесткость бетонной смеси с добавкой 0,2 % СДБ к массе цемента – 40 с. Материалы: шлакопортландцемент прочностью при сжатии  $400 \text{ кг/см}^2$  при твердении контрольных образцов в условиях пропаривания; заполнитель – доменный гранулированный шлак оптимального зернового состава, средней плотностью в цементном тесте равной  $2,54 \text{ кг/дм}^3$  и водопотребностью 15 %; водный раствор СДБ плотностью  $1,09 \text{ г/см}^3$ . Условия твердения – пропаривание при температуре от  $95^\circ\text{C}$  до  $100^\circ\text{C}$  по режиму 3+10+3 ч.

1 Рассчитываем В/Ц по формуле [2], с учетом значения коэффициента  $A=0,7$ , определенного по таблице 1

$$\frac{В}{Ц} = \frac{A \cdot R_{Ц}}{R_{Б} + A \cdot 0,4 R_{Ц}} = \frac{0,7 \cdot 400}{400 + 0,7 \cdot 0,4 \cdot 400} = 0,55$$

2 Определяем соотношение Ц:Ш по рисункам 3 и 4

$$\frac{Ц}{Ш} = \frac{1}{3,6}$$

3 Определяем расход цемента

$$Ц = \frac{1000 - ВВ}{\frac{1}{\rho_{Ц}} + \frac{В}{Ц} + \frac{n}{\rho_{Ш}}} = \frac{1000 - 60}{\frac{1}{3} + 0,55 + \frac{3,6}{2,54}} = 410 \text{ кг}$$

4 Определяем расход воды

$$B = \frac{B}{C} C = 410 * 0,55 = 225,5 \text{ кг}$$

5 Определяем расход шлака

$$Ш = nC = 3,6 * 410 = 1476 \text{ кг}$$

6 Определяем расход СДБ

$$\text{СДБ} = \frac{C}{D} \frac{C}{P} = \frac{0,2 * 410}{20 * 1,09} = 3,76 \text{ дм}^3$$

7 Определяем среднюю плотность цементно-шлаковой бетонной смеси

$$\rho_{\text{см}} = C + B + Ш = 410 + 225,5 + 1476 = 2111,5, \text{ кг/м}^3$$

8 Проводим контрольный замес. Предположим, что при этом смесь имеет заданную удобоукладываемость без корректировки состава и среднюю плотность  $2075 \text{ кг/м}^3$ . Тогда фактический расход материалов на  $1 \text{ м}^3$  бетонной смеси составит

$$C = 0,98 * 410 = 401,8 \text{ кг},$$

$$\text{где } 0,98 \text{ – коэффициент пересчета, равный } K_{\text{пер}} = \frac{2075}{2111,5} = 0,98;$$

$$B = 0,98 * 225,5 = 221 \text{ кг};$$

$$Ш = 0,98 * 1476 = 1446,5 \text{ кг}.$$

Остальные корректировки состава бетонной смеси проводим после испытания контрольных образцов.

## Список использованных источников

1 Турчанинов, В. И. Строительные материалы из техногенного сырья [Электронный ресурс] : учебное пособие / В.И. Турчанинов - ОГУ, 2017. – 208 с.

2 Федьнин, Н.И. Высокопрочный мелкозернистый шлакобетон / Н.Н. Федьнин, М.И. Диамант – М.: Стройиздат, 1975. – 176 с. : ил.

3 ГОСТ 310.4-81. Цементы. Методы определения предела прочности при изгибе и сжатии. Введен 1983-07-01. - М.: ИПК Издательство стандартов, 2003. Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/871001227>

4 ГОСТ 10181-2000 Смеси бетонные Методы испытаний Дата введения 2001-07-01. Взамен ГОСТ 10181.0-81-ГОСТ 10181.4-81. М.: Госстрой России, ГУП ЦПП, 2001. - Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/1200010596?marker=7D20K3>