

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования  
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

---

**С.А. Антипина, Н.А. Митина**

**ОСНОВЫ ТЕХНОЛОГИИ  
СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ  
НА ОСНОВЕ ВЯЖУЩИХ ВЕЩЕСТВ**

*Рекомендовано в качестве учебного пособия  
Редакционно-издательским советом  
Томского политехнического университета*

Издательство  
Томского политехнического университета  
2014

УДК 666.9(075.8)

ББК 35.41я73

A72

**Антипина С.А.**

A72 Основы технологии строительных материалов на основе вяжущих веществ: учебное пособие / С.А. Антипина, Н.А. Митина; Томский политехнический университет. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2014. – 128 с.

В пособии изложены технологии производства силикатного кирпича, легких и тяжелых бетонов. Описаны требования к качеству исходного сырья, процессы приготовления сырьевой смеси и готовой продукции, свойства и области применения. Пособие включает лабораторный практикум по изучению методов получения и определения основных строительно-технических свойств строительных материалов на основе вяжущих веществ.

Предназначено для студентов, обучающихся по направлению 240100 (550800) «Химическая технология».

УДК 666.9(075.8)

ББК 35.41я73

*Рецензенты*

Доктор технических наук, профессор ТГАСУ

*Н.О. Копаница*

Доктор технических наук, профессор ТГУ

*В.В. Козик*

© ФГАОУ ВО НИ ТПУ, 2014

© Антипина С.А., Митина Н.А., 2014

© Оформление. Издательство Томского политехнического университета, 2014

## ОГЛАВЛЕНИЕ

<b>ВВЕДЕНИЕ .....</b>	<b>5</b>
<b>1. ТЕХНОЛОГИЯ СИЛИКАТНОГО КИРПИЧА .....</b>	<b>6</b>
1.1. Сырьевые материалы и их технологическая характеристика .....	6
1.2. Подготовка сырьевых материалов.....	13
1.3. Приготовление силикатной массы .....	15
1.4. Формование силикатного кирпича-сырца .....	19
1.5. Автоклавная обработка силикатного кирпича .....	22
1.6. Свойства силикатного кирпича.....	27
1.7. Лабораторный практикум по теме: «Технология силикатного кирпича» .....	28
1.7.1. Характеристика свойств и подготовка сырьевых материалов для получения силикатного кирпича .....	28
1.7.2. Расчет состава и подготовка силикатной массы.....	29
1.7.3. Формование образцов силикатного кирпича .....	33
1.7.4. Тепловлажностная обработка силикатных образцов (запаривание) .....	34
1.7.5. Определение свойств готовых образцов силикатного кирпича .....	34
1.8. Контрольные вопросы по основам технологии силикатного кирпича .....	35
<b>2. ТЕХНОЛОГИЯ ЦЕМЕНТНЫХ БЕТОНОВ .....</b>	<b>37</b>
2.1. Классификация бетонов.....	38
2.2. Материалы для бетона .....	40
2.2.1. Портландцемент.....	40
2.2.2. Заполнители для бетона .....	45
2.2.3. Добавки к бетонам .....	56
2.2.4. Вода для приготовления бетонной смеси .....	60
2.3. Тяжелый бетон.....	60
2.3.1. Виды тяжелого бетона.....	60
2.3.2. Проектирование и расчет состава тяжелого бетона.....	64
2.4. Лабораторный практикум по теме: «Испытание тяжелого бетона» .....	68
2.4.1. Расчет состава тяжелого бетона методом абсолютных объемов.....	69
2.4.2. Приготовление и испытание бетонной смеси.....	73
2.4.3. Корректировка состава бетонной смеси и изготовление образцов.....	78

2.4.4. Испытание образцов и проверка марки запроектированного бетона.....	79
2.4.5. Определение номинального (лабораторного) и полевого (производственного) состава бетона .....	81
2.4.6. Определение коэффициента выхода бетона и расхода материалов на замес бетономешалки .....	81
2.5. Контрольные вопросы по основам технологии тяжелого бетона .....	82
<b>3. ТЕХНОЛОГИЯ ЛЕГКОГО БЕТОНА .....</b>	<b>83</b>
3.1. Классификация легких бетонов .....	83
3.2. Технология ячеистого бетона.....	85
3.2.1. Основные свойства ячеистого бетона.....	89
3.2.2. Характеристика сырьевых материалов.....	93
3.2.3. Подбор рационального состава ячеистого бетона.....	98
3.2.4. Свойства ячеистобетонных масс и их регулирование .....	101
3.2.5. Физико-химические процессы формирования пористой структуры ячеистого бетона.....	104
3.2.6. Формование ячеистых изделий .....	107
3.2.7. Физико-химические процессы твердения неавтоклавного ячеистого бетона.....	107
3.2.8. Особенности физико-химических процессов гидротермального синтеза соединений при получении газо- и пеносиликатов .....	109
3.2.9. Технические требования к готовым изделиям.....	114
3.3. Лабораторный практикум по теме: «Технология ячеистого бетона» .....	115
3.3.1. Характеристика свойств и подготовка сырьевых материалов для получения ячеистого бетона .....	115
3.3.2. Расчет состава, приготовление, исследование свойств ячеистобетонной массы и формование образцов ячеистого бетона.....	116
3.3.3. Тепловлажностная обработка ячеистобетонных образцов-изделий .....	123
3.3.4. Определение свойств готовых образцов ячеистого бетона...	123
3.4. Контрольные вопросы по основам технологии легких бетонов	124
<b>СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....</b>	<b>125</b>

## ВВЕДЕНИЕ

В данном учебном пособии представлены два раздела, рассматривающих вопросы особенностей технологии строительных материалов на основе вяжущих веществ: технология силикатного кирпича (1 раздел), технология цементных бетонов, включая тяжелый бетон, ячеистый бетон (2 раздел), технология ячеистого бетона (3 раздел), этапы технологии, физико-химические основы процессов твердения и основные строительно-технические свойства.

Каждая часть учебного пособия содержит основные теоретические положения по технологии строительных материалов и лабораторный практикум. В конце каждого раздела предлагаются вопросы для самоконтроля.

Работая по данному учебному пособию, Вы сможете изучить:

- физико-химические основы технологии материалов на основе известково-кремнеземистых вяжущих;
  - основные этапы проектирования и расчета сырьевой смеси силикатного кирпича;
  - технологические переделы производства силикатного кирпича;
  - основы технологии бетонов на основе портландцемента;
  - сырьевые материалы для производства цементных бетонов различных видов и назначений;
  - основы технологии и проектирования составов смесей тяжелых и ячеистых бетонов.

Если в процессе работы у Вас появятся вопросы, Вы можете обратиться по адресам электронной почты: [antipina@tpu.ru](mailto:antipina@tpu.ru), [mitinana@tpu.ru](mailto:mitinana@tpu.ru).

## 1. ТЕХНОЛОГИЯ СИЛИКАТНОГО КИРПИЧА

Способ изготовления автоклавного силикатного кирпича из смеси (по массе) извести (8...10 %) и кварцевого песка (90...92 %) впервые был предложен немецким ученым В. Михаэлисом в 1880 г. [1]. Автоклавные материалы и изделия, получаемые из смеси извести, кварцевого песка и твердеющие при повышенной температуре и давлении, в процессе изготовления подвергаются термической обработке (запариванию) в автоклавах при температуре 175...200 °С насыщенным водяным паром под давлением 0,8...1,2 МПа в течение 12...14 ч. В результате физико-химического взаимодействия компонентов (извести, песка и воды) образуются гидросиликаты кальция, обуславливающие монолитность и прочность силикатных изделий.

### 1.1. Сырьевые материалы и их технологическая характеристика

Основным компонентом силикатного кирпича (85...90 % по массе) является песок, поэтому заводы силикатного кирпича размещают, как правило, вблизи месторождений песка, и песчаные карьеры являются частью предприятий. Состав и свойства песка определяют во многом характер и особенности технологии силикатного кирпича.

*Песок* – это рыхлое скопление зерен различного минерального состава размером 0,1...5 мм. По происхождению пески разделяются на две группы: природные и искусственные. Последние, в свою очередь, делятся на отходы при дроблении горных пород (хвосты от обогащения руд, высевки щебеночных карьеров и т. п.), дробленные отходы от сжигания топлива (песок из топливных шлаков), дробленные отходы металлургии (пески из доменных и ватержакетных шлаков).

Природные пески являются продуктами выветривания магматических или осадочных горных пород (гранитов, порфиров, гнейсов, полевых шпатов, карбонатов и т. д.), которые в дальнейшем были перенесены водой или ветром и осажены или переосажены в местах их нынешнего нахождения.

Важнейшими свойствами песков являются [1]:

- химико-минералогический состав;
- истинная и объемная плотности, пустотность;
- форма и характер поверхности зерен;
- зерновой состав и модуль крупности;

- содержание пылевидных и глинистых частиц;
- наличие органических примесей;
- реакционная способность;
- содержание вредных примесей;
- радиационно-гигиеническая оценка.

*Химико-минералогический состав песков.* Средневаловый химический состав осадочных пород отличается между собой значительно. Превалирующее место среди породообразующих минералов природных песков занимает кварц, обладающий в условиях земной поверхности большой устойчивостью, минералы полевых шпатов и карбонатов [1].

*Кварц* (кристаллический кремнезем  $\text{SiO}_2$ ) благодаря высокой стойкости при выветривании остается в породе химически неизменным и входит в состав многих осадочных пород (песков, песчаников, глин и др.). Он отличается высокой плотностью – около  $2650 \text{ кг/м}^3$ , твердостью – 7, прочностью при сжатии до 2000 МПа и стойкостью. Кварц обладает несовершенной спайностью, имеет различную окраску и стеклянный блеск. При обычной температуре кварц не взаимодействует с кислотами (кроме плавиковой и горячей фосфорной) и щелочами. При повышенных температурах в среде насыщенного пара кварц взаимодействует с  $\text{Ca(OH)}_2$ , образуя гидросиликаты.

*Минералы полевых шпатов* – алюмосиликаты, образовавшиеся в результате взаимодействия оксидов кремния и алюминия с оксидами щелочных металлов. Наиболее распространенными разновидностями полевых шпатов являются: ортоклаз ( $\text{K}_2\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 6\text{SiO}_2$ ), альбит ( $\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 6\text{SiO}_2$ ), анортит  $\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$  и их смеси. Они имеют различную окраску, плотность  $2500 \dots 2750 \text{ кг/м}^3$ , твердость 6, прочность при сжатии до 170 МПа. Полевошпатовые пески образуются при разрушении гранитов, гнейсов и других кислых пород и тесно связаны с ними по составу и распространению. Они менее устойчивые в природе, чем кварцевые пески, и под действием воды, кислорода и углекислоты сравнительно быстро разлагаются до каолина.

Минералы карбонатных песков (кальцит –  $\text{CaCO}_3$ , магнезит –  $\text{MgCO}_3$ , доломит –  $\text{Ca}_2\text{Mg}(\text{CO}_3)_2$ ) имеют еще большую связь с материнскими породами, продуктами разрушения которых они являются.

Породы, применяемые для получения строительных материалов, чаще всего содержат в виде примесей следующие химические соединения:

- кремнезем в кристаллическом и аморфном состояниях (безводный и водный);
- алюмосиликаты (главным образом водные);
- карбонаты (безводные);
- сульфаты (безводные и водные).

Минералы, соответствующие этим соединениям (кварц, опал, каолинит, монтмориллонит, кальцит, магнезит, доломит, гипс, ангидрит), обычно сопутствуют осадочным породам.

В аморфном состоянии кремнезем в осадочных породах встречается в виде минерала опала. *Опал* ( $\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ ) менее плотен ( $\rho_V = 1900 \dots 2500 \text{ кг/м}^3$ ), прочен и стоек, чем кварц. Он отличается повышенной внутренней микропористостью и высокодисперсной структурой, обладает большой реакционной способностью к гидроксиду кальция и другим основным оксидам. Это свойство аморфного кремнезема широко используют при изготовлении минеральных смешанных вяжущих веществ и изделий на их основе.

*Каолинит* ( $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) – водный силикат алюминия, образуется при выветривании полевых шпатов и слюд. Цвет каолинита без примесей – белый, плотность –  $2600 \text{ кг/м}^3$ , твердость – 1. Каолинит и другие водные алюмосиликаты являются основой при образовании глин. Они часто встречаются в виде примесей. Наличие этих примесей понижает водо- и морозостойкость пород.

*Монтмориллонит* ( $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 4\text{SiO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O} \cdot n\text{H}_2\text{O}$ ) – слоистый минерал, в котором в твердом растворе находятся до 5 %  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , 4...9 %  $\text{MgO}$ , 3,5 %  $\text{CaO}$ . Плотность –  $2000 \text{ кг/м}^3$ , твердость 1...2. Монтмориллонитовые глины характеризуются высокой дисперсностью до  $300 \text{ м}^2/\text{г}$ .

*Кальцит* ( $\text{CaCO}_3$ ) имеет совершенную спайность по трем направлениям, плотность  $2700 \text{ кг/м}^3$ , твердость 3. Кальцит растворяется в кислотах, в обычной воде – мало (около 0,03 г/л). Это распространенный минерал, слагающий различные виды известняков. Окраска белая, серая, иногда он прозрачен.

*Магнезит* ( $\text{MgCO}_3$ ) имеет плотность  $2900 \dots 3100 \text{ кг/м}^3$ , твердость 3,5...4,5. Он распространен значительно меньше кальцита, порода называется «магнезит».

*Доломит* ( $\text{CaCO}_3 \cdot \text{MgCO}_3$ ) по физическим свойствам близок к кальциту, но более тверд – 3,5...4, плотен ( $\rho_V = 2900 \text{ кг/м}^3$ ) и прочен. Цвет доломита от белого до темно-серого в зависимости от примесей. Он встречается чаще, чем магнезит, образуя породу того же названия.

*Гипс* ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) – минерал кристаллического строения, его кристаллы имеют зернистое, столбчатое, пластинчатое, игольчатое или волокнистое строение. Он белого цвета, иногда окрашен примесями. Обладает спайностью в одном направлении. Плотность гипса  $2300 \text{ кг/м}^3$ , твердость 2, сравнительно легко растворяется в воде.

*Ангидрит* ( $\text{CaSO}_4$ ) – безводная разновидность гипса, образует породы одноименного названия. Плотность ангидрита  $2900 \dots 3000 \text{ кг/м}^3$ , твердость 3...3,5.

### *Важнейшие физико-механические свойства песков [3]*

*Влажность.* В природных материалах вода содержится в различных состояниях связи – гигроскопическая, пленочная, капиллярная, кристаллизационная и химически связанная. Способность природных материалов удерживать в себе воду за счет молекулярных сил сцепления называют молекулярной влагоемкостью, а влажность, соответствующую максимальному смачиванию, – максимальной молекулярной влагоемкостью. Влажность песка в значительной мере влияет на его объем, что необходимо учитывать при перевозке песка в железнодорожных вагонах или баржах, а также при намыве его. Наибольший объем пески занимают при влажности примерно 5 %. Различают абсолютную и относительную влажность.

*Гранулометрия песков.* Большинство исследователей к пескам относят зерна размером 0,05...2 мм. Установлено, что оптимальная упаковка зерен силикатной смеси (с учетом наличия в ней тонкодисперсных зерен вяжущего) находится в пределах соотношений фракций песка от 9 : 3 : 1 до 16 : 4 : 1. Меньшее соотношение фракций зерна каждой последующей фракции способствует не уплотнению, а наоборот, раздвижению зерен предыдущей фракции с увеличением пористости и ухудшением формуемости смеси. Зерновой (гранулометрический) состав песков характеризуют остатками на стандартных ситах 2,5; 1,25; 0,63; 0,315; 0,14 (или 0,15); 0,08 и модулем крупности.

*Форма и характер поверхности зерен песка.* Эти факторы имеют большое значение для формуемости силикатной смеси и прочности сырца, а также влияют на их реакционную способность – взаимодействие с известью. Поверхность песчинок может быть гладкой, корродированной и регенерированной. Последняя получается при нарастании на песчинках однородного материала, например кварца на кварцевых зернах. Нередко поверхность песчинок покрыта тонкой оболочкой, состоящей из иного вещества. Наличие оболочек на песчаных зернах может значительно изменять характер и степень взаимодействия основных минералов песка с вяжущими веществами в процессе автоклавной обработки, а также влиять на структуру цементного камня. Степень окатанности зерен зависит от их размеров. По мере увеличения размера зерен от 0,01 до 1 мм возрастает содержание округленных и полуокатанных и становится меньше угловатых зерен песка. Кроме того, степень окатанности зерен зависит от минерального состава, характера, условий, расстояния и длительности переноса и осаждения песка [3].

Пористость, межзерновая пустотность для песков составляет 35...55 %.

### Технические требования, предъявляемые к пескам для производства силикатного кирпича

Требования к пескам для производства силикатных изделий нормируются ОСТ 21-1-80 «Песок для производства силикатного кирпича и изделий из автоклавных бетонов» [3], табл. 1.1 и 1.2.

Таблица 1.1

*Технические требования к пескам для производства силикатного кирпича, ОСТ 21-1-80*

Наименование показателя	Значение
SiO <sub>2</sub>	не менее 50 %
Щелочи в пересчете на Na <sub>2</sub> O	не более 3,6 %
Пылевидные частицы менее 0,05 мм	не более 20 %
Сульфиды и сульфаты в пересчете на SO <sub>3</sub>	менее 2 %
Слюда	0,5 %
Органические примеси	не темнее эталона
Хлориды	менее 0,01 %
Сульфаты	менее 0,02 %

Таблица 1.2

*Технические требования к пескам для производства силикатного кирпича по гранулометрии, ОСТ 21-1-80*

Размер отверстий контрольных сит, мм	5	2,5	1,25	0,63	0,315	0,14	0,08
Полный остаток на ситах, % (мас)	0...0	0...10	0...18	10...47	30...80	60...90	70...95

По ГОСТ 8736-93 пески разделяют на группы в зависимости от их крупности [2], табл. 1.3.

Таблица 1.3

*Группы песков в зависимости от их крупности, ГОСТ 8736-93*

Группа песка	Полный остаток на сите 0,63 мм, %	Модуль крупности, Мкр
Очень крупный	более 75	более 3,5
Повышенной крупности	65...75	3,5...3,0
Крупный	45...65	2,5...3
Средний	30...45	2...2,5
Мелкий	10...30	1,5...2,0
Очень мелкий	до 10	1...1,5
Тонкий	Не нормируется	0,7...1
Очень тонкий	Не нормируется	до 0,7

*Известь* является второй составной частью сырьевой смеси, необходимой для изготовления силикатного кирпича и является основным вяжущим материалом для производства силикатных изделий. По химическому составу известь состоит из оксида кальция (CaO) с примесью некоторого количества оксида магния (MgO) [4].

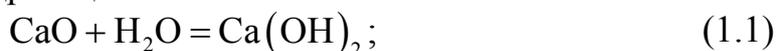
Различают два вида извести: негашеную и гашеную; на заводах силикатного кирпича применяется в основном негашеная известь. Технические условия на воздушную негашеную известь регламентированы ГОСТ 9179-7777, согласно которому известь разделяется на три сорта [5]. Требования к качеству извести изложены в табл. 1.4.

Таблица 1.4

*Технические условия на негашеную комовую известь по ГОСТ 9179-77*

Показатели	Сорта		
	1	2	3
Содержание активных CaO + MgO, считая на сухое вещество, % (не менее)	85	70	60
Содержание непогасившихся зерен, % (не более)	10	20	25
Скорость гашения в мин:			
быстрогосящаяся (до)	20	20	20
медленногсящаяся (более)	20	20	20

Гашение извести – взаимодействие комовой извести с водой, происходит по реакциям гидратации:



Реакции гидратации оксидов кальция и магния идут с выделением тепла. Комовая известь (кипелка) в процессе гидратации увеличивается в объеме и образует рыхлую, белого цвета, легкую порошкообразную (тестообразную или жидкую – состояние молока) массу гидроксида кальция Ca(OH)<sub>2</sub>.

Комовая негашеная известь – это полуфабрикат. Для того чтобы ее применять в работе, известь переводят в тонкодисперсное состояние измельчением или гашением. При гашении получают известь-пушонку (порошок), известковое тесто или известковое молоко. Для гашения извести в пушонку теоретически необходимо ввести 32,13 % воды по массе. Для гашения извести в известковое тесто необходимо добавлять 2,5 л воды на 1 кг извести. В промышленных условиях для получения теста известь гасят большим количеством воды до состояния известкового молока (3,5 л и более воды на 1 кг извести), которое затем отстаивается для отделения избыточной воды и получения теста. Для получения

для отделения избыточной воды и получения теста. Для получения извести в состоянии известкового молока на 1 кг извести приливается 3,5 л и более воды (в зависимости от необходимой плотности известкового молока).

**Технические требования, предъявляемые к извести  
для производства силикатного кирпича [5]**

1. Известь должна быть быстрогасящаяся, т. е. время гашения ее не должно превышать 15...20 мин; применение медленногасящейся извести снижает производительность гасильных установок.

2. Сумма активных оксидов кальция и магния ( $\text{CaO} + \text{MgO}$ ) в извести должна составлять не менее 70 %.

3. Содержание оксида магния в извести не должно превышать 5 %, так как магнезиальная известь гасится медленно.

4. Содержание недожженной извести не должно превышать 7 %, так как она не активна, является балластом, увеличивающим расход извести и удорожающим себестоимость готовой продукции.

5. Известь не должна быть пережженной, так как в таком виде она медленно гасится и вызывает растрескивание кирпича в запарочных котлах (автоклавах).

Хранение извести осуществляется в крытых складских помещениях, предохраняющих ее от воздействия влаги. Не рекомендуется длительное время хранить известь на воздухе, так как в нем всегда содержится небольшое количество влаги, которая гасит известь. Содержание в воздухе углекислого газа приводит к карбонизации извести и к частичному снижению ее активности [5].

*Вода.* При производстве силикатного кирпича воду применяют на всех стадиях производства: при гашении извести, приготовлении силикатной массы, прессовании и запаривании кирпича-сырца, получении технологического пара [6].

Природная вода не бывает чистой. Природная вода, содержащая большое количество углекислых солей кальция и магния (карбонатных), называется жесткой. Растворенных веществ в такой воде немного, и поэтому она называется мягкой.

Применять жесткую воду в промышленных целях, например для получения технологического пара, без предварительного ее умягчения нельзя, иначе при кипении воды на стенках промышленных котлов образуется накипь, которая выводит их из строя. При снабжении котлов мягкой водой срок их службы удлиняется.

Удаление накипи в паровых котлах осуществляется двумя способами: обработкой воды умягчением до поступления ее в паровые котлы и внутри котловой обработкой.

Воду умягчают двумя способами: термическим и химическим. Термический способ основан на разложении карбонатной жесткости нагреванием воды до 850...1100 °С, при этом образуются труднорастворимые выпадающие в осадок карбонат кальция и гидроокись магния. Этот способ обычно применяется в сочетании с химическим методом. Реагентами при этом являются едкий натр и кальцинированная сода.

Вода при нагревании превращается в пар. Если воду нагревать в закрытом сосуде, например в котлах, то она будет испаряться с поверхности, и пар будет накапливаться в пространстве над поверхностью воды до тех пор, пока между водой и образующимся из нее паром не установится динамическое равновесие, при котором в единицу времени столько же молекул воды испаряется, сколько и переходит обратно в жидкость.

Пар, находящийся в равновесии с жидкостью, из которой он образовался, называется насыщенным. В производстве силикатного кирпича для гашения силикатной массы и для запаривания кирпича-сырца применяется насыщенный пар, который производится в котельных [6].

## 1.2. Подготовка сырьевых материалов

*Технологическая подготовка песка.* В зависимости от типа месторождения в песке могут содержаться глина, камни, галька, корни деревьев и другие включения. Зимой песок в верхней части забоя замерзает, и мерзлые комья вместе с другими включениями попадают на заградительные решетки приемных бункеров песка.

*Подготовка песка* заключается в выделении из него посторонних включений, оттаивании мерзлых комьев (а в редких случаях и всего песка), извлечении всех компонентов, которые могут улучшить качество песка или уменьшить количество отходов. Имеющиеся в песке твердые крупные включения отделяются на решетках, которые закрывают верхнюю часть приемных бункеров песка. Обычно эти решетки на заводах выполняют в виде колосников из рельсов, установленных яблочком вниз, с таким расчетом, чтобы прошедшие сквозь колосники комья далее свободно проваливались сквозь решетку. Расстояние между рельсами составляет 80...100 мм в свету. Колосники устанавливают с уклоном 10...15° в противоположную загрузке сторону для удобства очищения решетки, а над образовавшейся пазухой между решеткой и задней стенкой бункеров вдоль последних обычно подвешивают балку, по которой перемещается тельфер с платформой или ковшом для уборки крупных каменистых включений [2].

*Шихтовка песков различной крупности.* Выше указывалось, что смешение песков различной крупности позволяет снизить пористость

смеси и расход вяжущего. Для этой цели необходимо различные пески подавать в определенной пропорции, т. е. их шихтовать.

В производстве силикатного кирпича применяют шихты, состоящие из крупного и мелкого природных песков; из крупного шлакового песка, являющегося продуктом дробления топливных шлаков, и мелкого карьерного песка; из карьерного песка и сопутствующего ему суглинка; из мелкого карьерного песка и дробленого камня (укрупняющая добавка); из однородного мелкого карьерного песка и золы ТЭС. Возможны и многокомпонентные шихты. Так, Гунцельманн рекомендует применять дроблевые горные породы для исправления естественной гранулометрии песков, доводя число шихтуемых фракций до четырех, а Кифхабер – даже до пяти. В наших условиях, когда одной из фракций служит молотая кварцевая мука, являющаяся компонентом известково-кремнеземистого вяжущего, обычно достаточно шихтовать две фракции заполнителя различной крупности.

*Просев песков.* Для выделения включений из талого песка применяют вибрационные или барабанные грохоты. Зимой на ситах этих грохотов остаются мелкие неоттаявшие комки мерзлого песка, попадающие вместе с камнями в отсеv. Поэтому на многих заводах зимой просеивают песок на ситах с крупными отверстиями (до 40 мм), а затем вторично просеивают гашеную горячую силикатную смесь на мелких ситах (8...10 мм). Это одновременно позволяет выделять из нее, помимо камней, также и случайно попавшие в процессе производства металлические предметы (болты, гайки и др.).

Выделенные из песка каменистые включения можно использовать в производстве силикатного кирпича. По данным Д.И. Алехина, С.А. Кржеминского и Г.Э. Бесси, при изготовлении силикатного кирпича в шихту можно вводить до 40 % каменистых включений крупностью до 5 мм. Помимо улучшения зернового состава песка и повышения прочности сырца и кирпича это придает и декоративный эффект.

*Прием вяжущих компонентов.* В том случае, когда заводы применяют привозную известь, металлургические шлаки и другие компоненты или виды вяжущих (белитовый шлам, магнийсодержащие отходы и т. п.), их обычно доставляют железнодорожным транспортом.

В большинстве случаев силикатные заводы получают сухую комовую известь, а шлаки и магнийсодержащие отходы – во влажном состоянии. Так как известь во избежание загашивания в пути перевозят в закрытых вагонах, ее выгрузка из них представляет трудности. Для хранения привозной извести используют силосные склады, вместимость которых зависит от мощности завода и частоты подачи составов с известью. Практика действующих заводов силикатного кирпича показала,

что ежедневная доставка извести нереальна, поэтому приходится рассчитывать приемные устройства и склады на одновременную подачу состава извести из 15–20 вагонов. Целесообразно при производстве силикатного кирпича обжигать известняк на этом же заводе [1].

*Подготовка вяжущих компонентов.* Компоненты, подвергаемые отдельно сухому помолу, подвергают искусственной сушке до влажности 1...1,5 % обычно в сушильных барабанах при расходе примерно 5000 кДж на 1 кг удаленной влаги. В тех случаях, когда в указанных компонентах содержатся куски крупнее 10 мм, их дробят.

Подготовка комовой извести заключается в ее дроблении, характер которого зависит от крупности ее кусков. Куски извести менее 80 мм сразу подвергают тонкому дроблению в молотковой дробилке, а куски более 80 мм измельчают в две ступени – грубое дробление в щековой и тонкое в молотковой дробилках.

Для получения готового продукта, 50 % которого проходит через сито № 021 (900 отв/см<sup>2</sup>), необходимо сблизить колосники молотковой дробилки так, чтобы расстояние между ними составляло 6...8 мм. Во избежание пыления при дроблении извести в молотковой дробилке, как показал опыт предприятий, необходимо герметизировать весь тракт: горловину бункера комовой извести, питатель и патрубок между ним и дробилкой, патрубок от дробилки к бункеру дробленой извести.

### **1.3. Приготовление силикатной массы**

*Процесс приготовления силикатной массы* состоит из следующих стадий: дозирование компонентов силикатной массы, смешение компонентов (обычно двустадийное), гашение массы, обработка с целью придания массе однородности, увлажнение до оптимальных значений формовочной влажности.

*Дозирование компонентов силикатной массы.* Дозирование компонентов силикатной массы осуществляется по объему и / или / по массе в соответствии с данными расчета состава силикатной массы (соотношение ИКВ: заполнитель в составе силикатной массы изменяется в широких пределах 12...30 : 88...70 и зависит от множества факторов). Для получения сырьевой смеси (силикатной массы) требуемого качества необходимо дозирование ее компонентов с точностью  $\pm 3\%$  при весовом и объемном дозировании.

Дозирование извести в силикатной массе определяют не по массовому содержанию в ней извести, а по содержанию той ее активной части оксида кальция, которая будет участвовать в реакции гашения и твердения. Поэтому норму расхода извести устанавливают в первую очередь в зависимости от ее активности.

На каждом заводе обычно расход извести устанавливается опытным путем. Среднее содержание активной извести в составе силикатной массы равно 6...8 %. При употреблении свежесожженной извести без посторонних примесей и недожога количество ее может быть уменьшено; если же в извести содержится большое количество недожженного камня и посторонних примесей, а также если известь долго хранилась на воздухе, норма ее в смеси должна быть увеличена. Как недостаточное, так и излишнее количество извести в силикатной массе влечет за собой нежелательные последствия: недостаточное содержание извести снижает прочность кирпича, повышенное содержание удорожает себестоимость, но в то же время не оказывает положительного влияния на качество готового изделия [1, 9].

Активность извести, поступающей в производство, часто изменяется, поэтому для получения массы с заданной активностью требуется часто изменять в ней количество извести. Определение активности извести (содержание суммы активных  $\text{CaO} + \text{MgO}$ ) необходимо проводить два раза в смену и в соответствии с активностью извести изменять дозировку ее для получения заданных свойств силикатной массы.

Определение скорости гашения извести следует производить не менее двух раз в смену; в случае удлинения времени гашения извести необходимо немедленно изменить режим гашения путем удлинения цикла приготовления силикатной массы.

Необходимое количество (по расчету) песка отмеривается по объему, а известь – по массе при помощи бункерных весов.

Кроме извести и песка, составной частью силикатной массы является вода, необходимая для полного гашения извести. Вода также придает массе пластичность, необходимую для прессования кирпича-сырца, и создает благоприятную среду для протекания химической реакции твердения кирпича при его запаривании [1].

Количество воды должно точно соответствовать норме. Недостаток воды приводит к неполному гашению извести; избыток воды, хотя и обеспечивает полное гашение, но создает не всегда допустимую влажность силикатной массы. Влажность частично поступает с песком, карьерная влажность которого колеблется в зависимости от климатических условий. Количество воды, необходимое для доведения влажности силикатной массы до нужной величины, практически также можно заранее рассчитать в зависимости от карьерной влажности поступающего в производство песка и составить таблицу для определения расхода воды на единицу продукции (1000 шт. кирпича или  $1 \text{ м}^3$  силикатной массы).

Общий расход воды для получения силикатной массы требуемого качества составляет около 13 % (от веса массы) и распределяется следующим образом [1], %:

на гашение извести –	2,5;
испарение при гашении –	3,5;
увлажнение массы при формовании –	7,0.

Иногда для повышения прочности кирпича в силикатную массу вводят различные добавки в виде молотого песка, глины и др.

Чтобы достигнуть правильного соотношения всех составляющих компонентов, применяют специальные дозирочные приспособления.

Приготовление силикатной массы требуемого качества является одной из наиболее важных операций в технологическом процессе производства силикатного кирпича, обязательно регулярно проверять в лаборатории ее свойства (состав, активность по СаО, влажность, тонину помола). Активность и влажность силикатной массы следует проверять через каждые 1...1,5 часа и в случае отклонения получаемых показателей от заданных немедленно изменять дозировку извести и воды [1, 9].

*Смешение компонентов силикатной массы.* Смешение компонентов силикатной массы осуществляется обычно в две стадии в одно- или двухвальных лопастных (смесители типа СМ-246, СМ-447, СМК-126, СМС-95), шнековых, стержневых смесителях и центробежных бегунах, валковых смесителях, смесительных дезинтеграторах, смесителях-растирателях СМС-55.

*Гашение силикатной массы.* Гашение силикатной массы осуществляется обязательно до стадии формования кирпича-сырца во избежание разрушения кирпича после формования и тепловлажностной обработки в автоклаве из-за остаточных процессов гашения извести, протекающих со значительными изменениями объема при гашении.

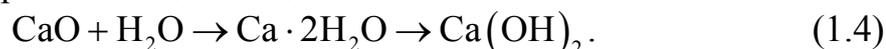
Для получения качественных силикатных изделий необходимо, чтобы известь в виде монослоя покрывала зерна кремнеземистого компонента и при этом соотношение значений удельной поверхности песка и извести (при активности извести 65 %) составляло:

$$A_{\text{см}} = 195S_{\text{уд}} / S_{\text{изв}} + 3,64 \cdot S_{\text{песка}}, \quad (1.3)$$

где  $S_{\text{песка}} = 75...400 \text{ см}^2/\text{г}$ ;

$S_{\text{изв}} = 5000...20\,000 \text{ см}^2/\text{г}$  при  $A_{\text{см}} = 2...12 \%$ .

Процесс гашения (гидратации) извести по Бакманну в составе силикатной массы протекает в две стадии:



По П. Ребиндеру процесс гидратации извести заключается в растворе СаО в воде, образовании насыщенного относительно СаО раствора,

из которого кристаллизуются кристаллы  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , как менее растворимые по сравнению с  $\text{CaO}$ . Реакция начинается с поверхности зерен  $\text{CaO}$  и сопровождается образованием на их поверхности частиц коллоидного размера  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ . При гашении извести в пушонку (порошок) частицы извести имеют больший размер, чем при гашении извести в тесто: порошок извести – размер частиц  $d = 6$  мкм и  $S_{\text{уд}} = 4000$  см<sup>2</sup>/г, известковое тесто – размер частиц  $d = 1$  мкм и  $S_{\text{уд}} = 20\,000$  см<sup>2</sup>/г.

В зависимости от способа гашения силикатной массы различают два вида производства силикатного кирпича: барабанный (используется редко) и силосный [1, 7].

Силосный способ приготовления массы имеет значительные экономические преимущества перед барабанным, так как при силосовании массы на гашение извести не расходуется пар. Кроме того, технология силосного способа производства значительно проще технологии барабанного способа. Подготовленные известь и песок непрерывно подаются питателями в заданном соотношении в одновальную мешалку непрерывного действия и увлажняются. Перемешанная и увлажненная масса поступает в силос, где выдерживается от 4 до 10 ч, в течение которых известь в составе силикатной массы гасится.

Силос представляет собой цилиндрический сосуд из листовой стали или железобетона; высота силоса 8...10 м, диаметр 3,5...4 м. В нижней части силос имеет конусообразную форму. Силос разгружается при помощи тарельчатого питателя на ленточный транспортер, при этом происходит большое выделение пыли. При вылеживании в силосах масса образует своды; причина этого – относительно высокая степень влажности массы, а также уплотнение и частичное твердение ее при вылеживании. Наиболее часто своды образуются в нижних слоях массы, у основания силоса. Для лучшей разгрузки силоса необходимо сохранять, возможно, меньшую влажность массы. Перечисленные отрицательные моменты устраняются механизацией разгрузки. Пример работы силоса: внутри силос разделен перегородками на три секции. Масса засыпается в одну из секций в течение 2,5 ч, столько же требуется на разгрузку секции. К моменту заполнения силоса нижний слой успевает вылежаться, т. е. около 2,5 ч. Затем секция выстаивается 2,5 ч, и после этого ее разгружают. Таким образом, нижний слой гасится около 5 ч. Так как разгрузка силосов происходит только снизу, а промежуток между разгрузками составляет 2,5 ч, то и все последующие слои также выдерживаются в течение 5 ч в непрерывно действующих силосах. Для облегчения разгрузки периодически включают вибратор, укрепленный на стенке силоса; и этим уменьшают прилипание массы к стенкам.

При более серьезных зависаниях массы в силосах их удаляют ломом через разгрузочные окна.

Для ускорения (в 1,5–3 раза) процессов гашения извести в составе силикатных масс можно регулировать температуру и давление в реакционной среде или использовать активаторы твердения (хлорид кальция). Для замедления процессов твердения извести можно вводить в силикатную массу сульфаты или щелочи. Однако добавки вызывают коррозию оборудования.

*Обработка силикатной массы* с целью придания массе однородности. После гашения силикатная масса представляет собой рыхлую неравномерно распределенную комовую массу. Для того чтобы вовлечь в реакцию комочки массы, их необходимо дезагрегировать, что можно сделать разными способами: ударом, раздавливанием, истиранием (перетиранием) и совмещением этих способов. Наиболее эффективно использование раздавливания и истирания. Для такой обработки гашеной силикатной массы используются: смесительные дезинтеграторы, двухвальные быстроходные смесители, струйные смесители, смеситель-растиратель СМС-55, стержневые смесители и центробежные бегуны.

*Увлажнение силикатной массы* до значений, близких к оптимальной формовочной влажности, осуществляется обычно на второй стадии смешения.

#### **1.4. Формование силикатного кирпича-сырца**

Формование (прессование) – важнейшая технологическая операция в производстве силикатного кирпича.

Для придания сырцовому изделию необходимых размеров и формы рыхлую зернистую силикатную массу уплотняют под некоторым давлением. Тщательно уплотнить сырец – значит довести до минимума свободное пространство между частицами песка, сблизив их настолько, чтобы они разделялись друг от друга только тончайшим слоем вяжущего вещества. Под действием формовочного усилия (давления) происходит уплотнение частиц смеси за счет размещения мелких зерен в промежутках между более крупными, уплотненная смесь приобретает заданные размеры и форму за счет различных сил:

- сцепления в местах контактов под действием молекулярных сил с долей общей прочности 3,58 %;
- механического зацепления частиц (силы трения) с долей общей прочности 14,65 %;
- сцепления за счет капиллярных сил с долей общей прочности 81,77 %.

Известно, что по мере уменьшения размеров частиц силикатной массы число контактов между ними увеличивается. Например: шары (частицы), занимающие 99,769 % всего объема силикатной массы, обеспечивают 0,024 % контактов, а шары (частицы), занимающие объем 0,0002 %, создают 91 % контактов, т. е. в дисперсной системе должно соблюдаться условие: каждый последующий по размеру шар (частица) должен отличаться от размеров предыдущего шара (частицы) на величину 0,228, т. е.  $d_2 = 0,228 \cdot d_1$ , иначе произойдет раздвижка зерен силикатной массы.

Основой прочности сырцовых изделий является натяжение воды в менисках микрокапилляров, создаваемых коллоидными частицами тонкодисперсного вяжущего, размещенного между зёрнами заполнителя. Поэтому следует стремиться к увеличению количества микрокапилляров, т. е. увеличению дисперсности вяжущего.

Важным является и расход вяжущего компонента в силикатной массе, который должен соответствовать гранулометрии кремнеземистого компонента. При использовании монофракционного заполнителя расход вяжущего увеличивается и соответственно увеличивается расход извести до 50 %. Если форма зерен заполнителя остроугольная, расход вяжущего компонента снижается на 2...3 %.

По данным ВНИИСТРОМа, в зависимости от вида вяжущего можно рассчитать содержание тонкодисперсного вяжущего по заданным значениям прочности сырцовых изделий при использовании:

- известково-кремнеземистого вяжущего:

$$P_{\text{вяж}} = (10 \cdot R_C + 1,75) / 0,36; \quad (1.5)$$

- известково-глино кварцевого вяжущего:

$$P_{\text{вяж}} = (10 \cdot R_C + 2) / 0,335, \quad (1.6)$$

где  $P_{\text{вяж}}$  – расход тонкодисперсного вяжущего силикатной массы, % (масс.);  $R_C$  – прочность кирпича-сырца, МПа.

При прессовании силикатного кирпича возникают силы сопротивления сжатию со стороны зерен песка, препятствующие максимальному сближению зерен. Сила трения массы о стенки формы и зерен друг о друга преодолевается путем применения давления. Поэтому давление должно распределяться равномерно по всей площади прессуемого изделия. Давление прессования необходимо увеличивать только до известного предела, так как при увеличении давления выше предельного в массе появляются упругие деформации, которые исчезают после снятия давления и ведут к разрушению сырца. Поэтому нельзя повышать давление до появления деформаций.

Таким образом, на качество кирпича и процессы формирования прочности силикатного кирпича наиболее существенно влияет давление прессования, которому подвергается силикатная масса во время прессования. Рабочее давление в прессах силикатного кирпича применяется равным 150...200 кг/см<sup>2</sup> [10].

Существенное значение имеет скорость поднятия давления. Так, например, ударное быстрое приложение усилия вызывает не уплотнение, а разрушение структуры изделия. Поэтому для преодоления внутренних сил трения давление должно прикладываться плавно с постепенным увеличением.

На нормальную работу пресса и на получение кирпича хорошего качества большое влияние оказывает содержание влаги в силикатной массе. В оптимальных условиях прессования кирпича влажность массы должна составлять 6...7 % от массы сухого вещества и постоянно контролироваться. Увеличение влажности выше оптимальной не дает возможности спрессовать сырце, снять его со стола пресса и уложить на тележку; уменьшение влажности приводит к тому, что спрессованный сырец трудно снять со стола пресса: он разламывается под действием собственной массы. Недостаточное содержание влаги в сырце лишает известь необходимой пластичности, обеспечивающей связь между отдельными зернами песка [10].

На процессы качественного формования силикатного кирпича оказывает влияние и запрессовка воздуха, давление запрессованного воздуха в сырце составляет 1,5...1,8 МПа. Это может привести к образованию трещин расслоения в сырце. Трещинообразование возможно и из-за того, что верхний слой сырца, как более уплотненный, имеет большее трение о стенки формы при выталкивании кирпича. Чтобы это исключить, проводится уширение формовочных гнезд в сторону выталкивания.

*Процесс формования (прессования) силикатного кирпича складывается из следующих основных операций: наполнения прессовых форм (коробок) массой, прессования сырца, выталкивания сырца на поверхность стола, снятия сырца со стола, укладки кирпича-сырца на запорочные вагонетки [10].*

Силикатная масса, приготовленная в силосах, подается при помощи транспортерной ленты в бункер над пресс-мешалкой пресса. Подача массы в пресс-мешалку должна регулироваться так, чтобы она занимала примерно 3/4 объема пресс-мешалки. Если поступающая масса имеет более низкую влажность, чем требуется, доувлажнение ее производится в пресс-мешалке, вокруг стенок которой укладывается водопроводная труба с мелкими отверстиями по ее длине, направленными вниз. Сила струи, поступающей по трубке воды, регулируется прессовщиком при

помощи вентиля. Увлажненная масса ножами пресс-мешалки при вращении их подается в прессовые формы через отверстия в дне пресс-мешалки. При повороте стола пресса формы, наполненные массой, перемещаются на определенный угол и занимают положение между прессующим поршнем и верхней стороной плитки контрштампа. Под давлением поршень постепенно поднимается и производится прессование кирпича-сырца. В момент прессования стол пресса останавливается, а ножи пресс-мешалки вращаются и заполняют массой следующую пару прессовых форм. После прессования стол пресса поворачивается так, чтобы штампы пресса вместе с сырцом подошли к выталкивающему поршню. Сырец выталкивается поршнем в вертикальном направлении – снизу вверх; верхняя пластина штампа при выталкивании выходит из прессовых форм на 3...5 мм выше уровня стола. Затем выталкивающий поршень опускается вниз в первоначальное положение. После снятия пары кирпичей со стола на запарочную тележку стол поворачивается и штампы подводятся под механическую щетку для очистки. Верхние пластины очищаются от налипшей массы, штампы опускаются на величину наполнения прессовых форм, и цикл начинается снова.

Плотность прессования сырца достигается исключительно изменением величины наполнения прессовых форм: чем больше высота наполнения, тем выше плотность сырца и, наоборот, чем меньше высота наполнения форм, тем ниже плотность сырца. Во время прессования необходимо следить за тем, чтобы сырец получался одинаковой плотности; для этого необходимо поддерживать высоту наполнения прессовых форм одинаковой. Ножи пресс-мешалки должны быть закреплены от дна стенок на одинаковом расстоянии.

После прессования полученные кирпичи автоматом-укладчиком укладываются на вагонетки и транспортируются в автоклавы, где производится тепловлажностная обработка силикатного кирпича [10].

### **1.5. Автоклавная обработка силикатного кирпича**

Автоклавная обработка силикатного кирпича – основная технологическая стадия в процессе силикатного кирпича, позволяющая превращать механическую смесь разнородных компонентов в химические соединения, связывающие зерна песка-заполнителя в монолит. Под воздействием насыщенного водяного пара высокого давления в порах кирпича-сырца создается жидкая высокотемпературная среда, обеспечивающая растворение исходных сырьевых компонентов и их взаимодействие с образованием водных силикатов кальция различного состава [7, 4].

Насыщенный пар используется с температурой 175 °С при соответствующем такой температуре давлении в 0,8 МПа.

Известно несколько теоретических положений, характеризующих процессы гидротермального синтеза соединений в силикатных системах.

*Ле-Шателье* выделяет два основных процесса: растворение сырьевых компонентов и кристаллизацию новообразований из насыщенных растворов.

*Михаэлис В.* выделяет три: гидратацию, образование гелеобразных новообразований, их перекристаллизацию.

*Байков А.А.* различает три периода: растворение и образование насыщенного раствора, гидратацию вяжущего (без растворения) и образование коллоидных частиц, перекристаллизация и образование кристаллического сростка.

*Волженский А.В.* предлагает следующую схему процессов:  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  в растворе почти полностью диссоциирует на ионы  $\text{Ca}^{2+}$  и  $\text{OH}^-$ , под действием ионов  $\text{OH}^-$  происходит разрыв связи  $-\text{SiO}-\text{SiO}-$  в тетраэдрах кремнезема и образование групп  $\text{Si}(\text{OH})_4$ , которые взаимодействуют с ионами кальция с образованием малорастворимых гидросиликатных соединений, которые выпадают в виде коллоидальных осадков.

*Бутт Ю.М., Раинович Л.Н.* характеризуют процессы гидротермального синтеза следующим образом: растворение известково-песчаной смеси, взаимодействие в растворе ионов кальция и кремнекислоты с образованием гидросиликатов кальция, которые малорастворимы в воде и образуют пересыщенные растворы, из которых кристаллизуются новые соединения.

*Хинт И.А.* важнейшими представляет твердофазные процессы, происходящие в спрессованных силикатных массах. Молекулы извести и кремнезема взаимно диффундируют друг в друга на глубину до 200 мкм, что возможно в присутствии воды, обладающей полярностью.

Существует и другая точка зрения на эти процессы: не всегда образование гидросиликатов кальция идет через раствор. Это подтверждается тем, что состав гидросиликатов кальция не соответствует соотношению растворенных в жидкой фазе компонентов, т. е. составу жидкой фазы.

Процессы синтеза гидросиликатных соединений характеризуются скоростью связывания извести и изменением прочности изделий в процессе запаривания.

На скорость образования гидросиликатов кальция и их структуру оказывает влияние растворимость исходных компонентов, их дисперсность, режим автоклавной обработки.

В процессе автоклавной обработки, т. е. запаривания кирпичасырца, различают *три стадии*.

*Первая стадия* начинается с момента впуска пара в автоклав и заканчивается при наступлении равенства температур теплоносителя (пара) и обрабатываемых изделий [1].

*Вторая стадия* характеризуется постоянством температуры и давления в автоклаве. В это время получают максимальное развитие все физико-химические процессы, которые способствуют образованию гидросиликатов кальция.

*Третья стадия* начинается с момента прекращения доступа пара в автоклав и включает время остывания изделий в автоклаве до момента выгрузки из него готового силикатного кирпича.

В *первой стадии* запаривания насыщенный пар с температурой 175 °С под давлением 0,8 МПа впускают в автоклав с кирпичомсырцом. При этом пар вытесняет воздух из автоклава (5...7 мин), омывает поверхности изделий, вагонеток, стенок автоклава и, отдавая скрытую теплоту, впитывается сырцом с поверхности, начинает охлаждаться и конденсироваться на кирпичесырце и стенках автоклава. Давление в автоклаве остается на уровне атмосферного пока изделия не прогреются до 100 °С (0,5...0,75 ч) – это период пропаривания без давления, и он продолжается до тех пор, пока температура сырца и пара не сравняются. После подъема давления пар начинает проникать в мельчайшие поры кирпича и превращается в воду. Следовательно, к воде, введенной при изготовлении силикатной массы, присоединяется вода от конденсации пара. Образовавшийся в порах конденсат растворяет присутствующий в сырце гидроксид кальция, высокодисперсный кремнезем и другие растворимые вещества, входящие в состав массы. Известно, что упругость пара растворов ниже упругости пара чистых растворителей. Поэтому подаваемый в автоклав водяной пар будет конденсироваться над растворами извести, стремясь понизить их концентрацию; это дополнительно увлажняет сырец в процессе запаривания. И третьей причиной конденсации пара в порах сырца являются капиллярные свойства материала [7].

Роль пара при запаривании сводится не только к сохранению воды в сырце в условиях высоких температур, но при отсутствии пара происходило бы немедленное испарение воды, а следовательно, высыхание материала и полное прекращение реакции образования цементирующих веществ – гидросиликатов кальция. Общая длительность этой стадии 1,5...2 ч.

С того момента, как в автоклаве будет достигнута наивысшая температура, т. е. 170...200 °С, наступает *вторая стадия* запаривания –

период изотермической выдержки. В изотермический период происходит выравнивание температур и влажности различных зон кирпича, и получают максимальное развитие химические и физические процессы, которые ведут к образованию гидросиликатных соединений и формированию монолита силикатного камня. К этому моменту поры сырца заполнены водным раствором гидроксида кальция  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , непосредственно соприкасающимся с  $\text{Si}(\text{OH})_4$ , т. к. наличие водной среды и высокой температуры вызывает на поверхности песчинок некоторое растворение кремнезема, образовавшийся раствор вступает в химическую реакцию с образовавшимся в течение первой стадии запаривания водным раствором гидроксида кальция, и в результате происходит синтез новых соединений – гидросиликатов кальция.

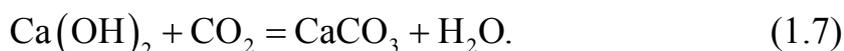
Сначала гидросиликаты находятся в коллоидальном состоянии, но постепенно выкристаллизовываются и, превращаясь в твердые кристаллы, сращивают песчинки заполнителя между собой. Кроме того, из насыщенного водного раствора гидроксид кальция также выпадает в виде кристаллов и своим процессом кристаллизации участвует в сращивании песчинок. При израсходовании всей извести (исходного компонента) начинается частичное растворение высокоосновных гидросиликатов кальция и переход их в низкоосновные, лучше закристаллизованные в наружных слоях кирпича и содержащих больше гелевидных фаз в его внутренних слоях. Длительность этого периода 6...8 ч. Таким образом, во второй стадии запаривания образование гидросиликатов кальция, их перекристаллизация вызывают постепенное нарастание прочности силикатного кирпича.

*Третья стадия* процесса характеризуется снижением температуры в автоклаве и медленным спуском пара. При быстром снижении температуры вода, находящаяся в порах кирпича, становится перегретой по отношению к теоретической температуре и бурно вскипает, что может привести к деформациям кирпича. В силикатном кирпиче преобладает открытая пористость, поэтому его охлаждение происходит по всему объему одновременно.

Третья стадия (общая длительность 2...3 ч) запаривания протекает с момента прекращения доступа пара в автоклав, т. е. начинается падение температуры в автоклаве быстрое или медленное в зависимости от изоляции стенок автоклава и наличия перепуска пара. Происходит снижение температуры и в изделиях и обеднение его водой, т. е. вода из них испаряется и повышается концентрация раствора, находящегося в порах. С повышением концентрации гидроксида кальция и снижением температуры цементирующего вещества гидросиликаты кальция становятся более основными, и это продолжается до тех пор, пока кирпич

не будет выгружен из автоклава. В результате снижения давления в автоклаве до атмосферного из кирпича удаляется вся вода, внесенная конденсатом и частью формовочной влаги, усиливаются процессы кристаллизации гидросиликатов кальция и, следовательно, повышается прочность силикатного кирпича. Одновременно пленки цементирующего вещества сильнее обогащаются выпадающим из раствора гидроксидом кальция [7, 4].

Механическая прочность силикатного кирпича, выгруженного из автоклава, ниже той, которую он приобретает при последующем выдерживании его на воздухе (в течение 7 суток), это объясняется происходящей карбонизацией гидроксида кальция за счет углекислоты воздуха по формуле:



Таким образом, полный технологический цикл запаривания кирпича в автоклаве состоит из операций очистки и загрузки автоклава, закрывания и закрепления крышек, перепуска пара; впуска острого пара, выдержки под давлением, второго перепуска, выпуска пара в атмосферу, открывания крышек и выгрузки автоклава. Совокупность всех перечисленных операций составляет цикл работы автоклава, который равен 10...14 ч [1].

Запаривание кирпича в автоклавах требует строгого соблюдения температурного режима: равномерного нагревания, выдержки под давлением и такого же равномерного охлаждения. Нарушение температурного режима приводит к браку.

Для контроля за режимом запаривания на автоклавах установлены: манометры и самопишущие дифманометры, снабженные часовым механизмом, записывающим на барограмме полный цикл запаривания кирпича [1].

Автоклав представляет собой стальную (сваренную из обечаек) трубу длиной 15...20 м и диаметром до 3 м. Автоклав длиной 19 м и диаметром 2 м вмещает 12 вагонеток ( $V = 5965 \text{ м}^3$ ). Режим работы автоклава:

- 1,5...2 ч – подъем пара;
- 6...8 ч – изотермическая выдержка;
- 1,5...2,5 ч – спуск пара.

Из автоклава силикатный кирпич поступает на теплый склад готовой продукции [1].

## 1.6. Свойства силикатного кирпича

В соответствии с ГОСТ 379-79 «Кирпич и камни силикатные» кирпич имеет свойства [9]:

- размеры стандартного кирпича  $250 \times 120 \times 65$  мм, утолщенного –  $250 \times 120 \times 88$  мм; силикатные камни –  $250 \times 120 \times 138$  мм;
- масса кирпича должна быть не более 4, утолщенного 4,3 кг;
- цвет светло-серый или цветные изделия (пигмент или краситель).

Силикатные изделия подразделяют по теплотехническим свойствам и объемной плотности:

- на эффективные силикатные материалы, которые позволяют уменьшать толщину ограждающей конструкции – это силикатный кирпич с плотностью  $< 1400 \text{ кг/м}^3$  и силикатные камни с плотностью  $< 1450 \text{ кг/м}^3$ ;
- условно-эффективные, они улучшают теплотехнические свойства ограждающих конструкций, они имеют плотность больше  $1400 \dots 1450$  и до  $1650 \text{ кг/м}^3$ ;
- силикатный кирпич, силикатные камни с плотностью  $> 1650 \text{ кг/м}^3$ .

Обычный силикатный кирпич имеет плотность  $1800 \dots 1850 \text{ кг/м}^3$ .

Силикатный кирпич может быть рядовой или лицевой, а также полнотелый и пустотелый.

В соответствии с ГОСТом различают следующие марки: 7,5; 10; 12,5; 15; 20; 25; 30 МПа.

Водопоглощение силикатных изделий должно быть не менее 6 и не более 16 % для рядового кирпича и не более 14 % для лицевых изделий.

Морозостойкость определяется циклами (температура замораживания и оттаивания  $-15$  до  $+15$  °С) и изменяется от 15 до 50 циклов (15, 25, 35, 50); для лицевых – не менее 25, а рядовых – не менее 15 циклов.

Теплопроводность находится на уровне  $0,35 \dots 0,7 \text{ Вт/м} \cdot \text{К}$ .

Жаростойкость – силикатные изделия стойки до  $800$  °С.

Атмосферостойкость – изменение физико-технических свойств при воздействии атмосферных факторов.

Для силикатных изделий усадка компенсируется наличием заполнителя.

Возможно получение отделочных цветных силикатных изделий. Существует множество способов окрашивания силикатных изделий:

- объемное окрашивание;
- нанесением цветных паст на лицевую поверхность;
- нанесением легкоплавких глазурей;
- окрашивание цветными растворами солей;

- покрытие поверхности цветными лаками и другими органическими соединениями.

Основное требование к применяемым красящим веществам – щелочестойкость.

В соответствии с вышеперечисленными свойствами силикатных изделий применяется следующие условные обозначения – Кирпич СОР 100/1800/15/ГОСТ 379-79 – кирпич силикатный рядовой марки 100 с объемной плотностью  $1800 \text{ кг/м}^3$ , морозостойкостью 15 циклов по ГОСТ 379-79.

### **1.7. Лабораторный практикум по теме: «Технология силикатного кирпича»**

*Цель лабораторной работы:* исследование процессов получения и свойств силикатного кирпича (с использованием традиционного и нетрадиционного кремнеземистого сырья).

Основные этапы выполнения лабораторной работы:

1. Характеристика свойств и подготовка сырьевых материалов для получения силикатного кирпича.
2. Расчет состава и подготовка силикатной массы.
3. Формование образцов силикатного кирпича.
4. Тепловлажностная обработка силикатных образцов (запаривание).
5. Определение свойств готовых образцов силикатного кирпича.

#### **1.7.1. Характеристика свойств и подготовка сырьевых материалов для получения силикатного кирпича**

Каждая группа студентов получает у преподавателя исходные данные о сырьевых материалах, на основе которых в лабораторных условиях будут получены и изучены свойства силикатных изделий.

На данном этапе работы (в рабочей тетради и в отчете) приводится полная характеристика свойств сырьевых материалов (по ранее проведенным исследованиям сырьевых материалов), используемых студентами в работе, с оценкой пригодности их для технологии силикатного кирпича в соответствии с требованиями, предъявляемыми к сырьевым материалам для производства силикатного кирпича.

Сырьевые материалы подвергаются необходимой подготовке в соответствии с их свойствами, в отчете приводится полное описание этих процессов с указанием их особенностей и последовательности проведения.

При реализации элементов научных исследований в данной работе используются различные по составу вяжущие и кремнеземистые компоненты силикатных масс, проводится сравнительный анализ технологи-

ческих параметров процессов технологии и строительно-технических свойств силикатных изделий.

### **Приборы и материалы для выполнения лабораторной работы**

1. Кварцевый песок, известь (или другие сырьевые материалы).
2. Фарфоровая ступка, пестик.
3. Сито № 0,21.
4. ПСХ-2 (прибор для определения удельной поверхности).
5. Шаровая лабораторная мельница.
6. Технические весы.
7. Сушильный шкаф.

### **Проведение испытаний**

Сырьевые материалы при необходимости высушиваются в сушильном шкафу до постоянной массы. Известь и песок измельчаются раздельно вручную в фарфоровой ступке или в лабораторной шаровой мельнице. Тонина помола извести –  $S_{уд} = 3800...4000 \text{ см}^2/\text{г}$  (по ПСХ-2) или полное прохождение через сито № 0,21. Песок (10 % от общего расхода песка в составе силикатной массы) измельчается до состояния пудры. Подготовленные сырьевые материалы складываются в эксикаторе в отдельных пакетах.

#### **1.7.2. Расчет состава и подготовка силикатной массы**

Каждая группа студентов рассчитывает и готовит силикатную массу из расчета 0,125 – 1 кг. Расчет состава силикатной массы производится на 1 кг массы [10], поэтому можно записать:

$$Q_{п} + Q_{изв} = 1000, \quad (1.8)$$

где  $Q_{п}$  – масса песка, г;  $Q_{изв}$  – масса извести, г.

$$Q_{п} = 1000 - Q_{изв}. \quad (1.9)$$

Расход извести ( $Q_{изв}$ ) можно выразить через активность смеси ( $A_{см}$ ) и извести ( $A_{изв}$ ):

$$Q_{изв} = A_{см} / A_{изв}, \quad (1.10)$$

где активность смеси выбирают из табл. 5 по содержанию суммы активных СаО + MgО в исходной извести, %.

В лабораторных условиях расход материалов на 1 кг сухой силикатной массы определяется по данным табл. 1.5.

В табл. 1.5 указывается общее содержание кремнеземистого компонента в составе силикатной массы, однако кремнеземистый компонент выполняет двойную роль в составе силикатных масс: компонента известково-кремнеземистого вяжущего и заполнителя. Обычно расход кремнеземистого компонента в составе известково-кремнеземистого

вяжущего принимается в количестве 10 % от общего расхода кремнеземистого компонента.

Таблица 1.5

*Расход песка и извести на 1000 кг сухой смеси, кг*

Активность извести по СаО, %	Расход извести (И) и песка (П)	Активность силикатной массы, %					
		5	7	9	11	13	15
60	И	83	117	150	183	216	250
	П	917	883	850	817	784	750
65	И	77	108	138	169	200	231
	П	923	892	862	831	800	739
70	И	71	100	128	256	185	215
	П	929	900	972	844	815	780
75	И	67	93	120	147	173	200
	П	933	907	880	853	827	800
80	И	63	87	113	137	163	186
	П	937	913	887	863	837	814
85	И	59	82	106	129	153	176
	П	941	918	894	871	847	824
90	И	55	79	100	123	144	167
	П	945	921	900	877	856	833

*Примечание.* На 1 кг массы расход материала будет в 1000 раз меньше, а на 0,125 кг массы – 1/8 этого количества.

Третьим компонентом силикатной массы является вода [6]. Вода затворения складывается из двух составляющих: воды для увлажнения силикатной массы ( $V_{см}$ ) и воды для гашения силикатной массы ( $V_{хс}$ ). Для определения ее количества ( $V_{зт}$ , % масс.) необходимо учитывать наличие активной СаО в смеси ( $A_{см}$ , % масс.) и гранулометрический состав песка. Мелкий песок является более водопотребным за счет смачивания зерен.

Общий расход воды затворения составит:

$$V_{зт} = 10 \cdot V_{см} + V_{хс} \quad (1.11)$$

Часть приливаемой воды вступает в реакцию гашения СаО и химически связывается:

$$V_{хс} = m \cdot A_{см}, \quad (1.12)$$

где  $m$  принимается равным 0,321.

Тогда:

$$V_{xc} = 0,321 \cdot A_{cm}. \quad (1.13)$$

Общий расход воды:

$$V_{zt} = 10(V_{cm} + 0,321A_{cm}). \quad (1.14)$$

Расход воды на смешение (увлажнение):

$$V_{cm} = A_{cm} + C, \quad (1.15)$$

где  $C$  – эмпирический коэффициент, равный 2.

Тогда расход воды затворения:

$$V_{zt} = 10(A_{cm} + C) + 3,21A_{cm}, \text{ или } V_{zt} = 13,21A_{cm} + 20. \quad (1.16)$$

Уравнение (1.16) справедливо для песка с наибольшей крупностью зерен (1,25 мм). В случае использования песков с другой крупностью надо вводить поправочный коэффициент  $n$ , который выбирается из табл. 1.6.

Таблица 1.6

*Зависимость поправочного коэффициента от крупности песка*

Наибольшая крупность песка, мм	5	2,5	1,25	0,63	0,315	0,15
Коэффициент, $n$	0,66	0,83	1	1,17	1,33	1,66

*Примечание.* За наибольшую крупность песка принимается фракция, в которой диаметр отдельных зерен является максимальным, а полные просевы через данное сито составляют 60...85 %.

С учетом поправочного коэффициента уравнение (1.14) принимает вид:

$$V_{zt} = 10(n \cdot V_{cm} + 0,321A_{cm}), \quad (1.17)$$

тогда

$$V_{zt} = 10n \cdot V_{cm} + 3,21A_{cm}, \text{ или } V_{zt} = 10n \cdot A_{cm} + 20 + 3,21A_{cm}. \quad (1.18)$$

В результате решения этого уравнения составлена таблица расхода воды, литр на 1000 кг сухой силикатной массы.

По результатам проведенного расчета состава силикатной массы в отчете привести сводную таблицу расхода основных сырьевых материалов по форме табл. 1.8.

#### **Приборы и материалы для выполнения лабораторной работы**

1. Подготовленные сырьевые материалы, дистиллированная вода.
2. Технические весы.
3. Чашка и шпатель (ложка) для приготовления силикатной массы.
4. Фарфоровые стаканы, емкостью до 500 мл.
5. Водяная баня.

Таблица 1.7

*Расход воды на 1000 кг сухой смеси с учетом крупности песка, л*

Наибольшая крупность песка, мм	Коэффициент, $n$	Активность смеси, % по СаО					
		5	7	9	11	13	15
		Влажность смеси ( $B_{зт}$ ), % по массе					
		7	9	11	13	15	17
0,15	1,66	<u>116+16</u>	<u>149+22</u>	<u>183+29</u>	<u>216+35</u>	<u>249+42</u>	<u>362+48</u>
		139	171	212	251	291	410
0,315	1,33	<u>93+16</u>	<u>120+22</u>	<u>146+29</u>	<u>173+35</u>	<u>199+42</u>	<u>290+48</u>
		109	142	175	208	241	338
0,63	1,17	<u>82+16</u>	<u>105+22</u>	<u>129+29</u>	<u>152+35</u>	<u>175+42</u>	<u>255+48</u>
		98	127	158	187	217	303
1,25	1	<u>70+16</u>	<u>75+22</u>	<u>110+29</u>	<u>130+35</u>	<u>150+42</u>	<u>170+48</u>
		86	97	139	165	192	218
2,5	0,83	<u>58+16</u>	<u>75+22</u>	<u>91+29</u>	<u>108+35</u>	<u>124+42</u>	<u>181+48</u>
		74	97	120	143	166	229
5,0	0,66	<u>46+16</u>	<u>59+22</u>	<u>73+29</u>	<u>86+35</u>	<u>99+42</u>	<u>144+48</u>
		62	81	102	121	141	192

*Примечание.* Над чертой – расход воды на увлажнение смеси плюс вода для гашения извести; под чертой – общий расход воды для затворения силикатной массы.

Таблица 1.8

*Расход основных сырьевых материалов для выполнения исследований*

Расход сырьевых материалов, г, на приготовление 250 г силикатной массы				
Исходный материал	Известь	Кремнеземистый компонент		Вода, мл
Силикатная масса для исследований		общее содержание	в составе ИКВ	

*Примечание.* ИКВ – известково-кремнеземистое вяжущее.

### Проведение испытаний

Подготовка силикатной массы при выполнении исследований предполагает: весовое дозирование сухих компонентов силикатной массы, их тщательное смешение в две стадии: смешение сухих компонентов массы, перемешивание массы с водой увлажнения (смешения) и гашение массы. Гашение силикатных масс осуществляется в фарфоровых стаканах, закрытых часовым стеклом на водяной бане в течение 2...4 ч при постоянном перемешивании массы и увлажнении ее при высыхании и по мере необходимости, используя расчетное количество воды для гашения массы.

### 1.7.3. Формование образцов силикатного кирпича

Каждая подгруппа студентов формует не менее 6 образцов-изделий из одного состава силикатной массы.

#### Приборы и материалы для выполнения лабораторной работы

1. Гашеная силикатная масса, дистиллированная вода.
2. Чашка и шпатель (ложка) для перетиранья силикатной массы (можно использовать фарфоровую ступку с пестиком).
3. Металлические разъемные формы для прессования образцов.
4. Гидравлический пресс.
5. Технические весы.
6. Линейка (штангенциркуль).

#### Проведение испытаний

Перед формованием образцов силикатных изделий предварительно погашенную силикатную массу необходимо увлажнить до значений оптимальной формовочной влажности, тщательно перетереть и перемешать.

Из подготовленной таким образом массы спрессовать образцы-плитки (кубики, цилиндры) на лабораторном гидравлическом прессе при давлении  $200 \text{ кг/см}^2$ , предварительно определив расчетное значение давления прессования (и показания манометра) образцов следующим образом:

$$R_{\text{сж}} = \frac{P_{\text{ман}} \cdot F_{\text{пор}}}{F_{\text{обр}}}, \quad (1.19)$$

где  $R_{\text{сж}} = 200 \text{ кг/см}^2$ ;  $F_{\text{пор}}$  – площадь поршня,  $\text{см}^2$ ;  $F_{\text{обр}}$  – площадь образца, рассчитывается с учетом формы и размеров прессуемого образца,  $\text{см}^2$ .

Тогда

$$P_{\text{ман}} = \frac{R_{\text{сж}} \cdot F_{\text{обр}}}{F_{\text{пор}}}. \quad (1.20)$$

Свежесформованные образцы взвесить ( $m$ ), определить их размеры и рассчитать объемную плотность по формуле:

$$\rho_V = \frac{m}{V}. \quad (1.21)$$

Спрессованные образцы-изделия разместить на подставке (стекло) и выдержать перед тепловлажностной обработкой не менее 24 ч при комнатной температуре. Для предотвращения высыхания верхних слоев сырца образцы на весь период выдержки на воздухе покрываются влажной тканью.

#### **1.7.4. Тепловлажностная обработка силикатных образцов (запаривание)**

После выдержки образцы-изделия взвешиваются, измеряются их размеры и рассчитываются значения объемной плотности по (1.20) выдержанных образцов перед запариванием.

##### **Приборы и материалы для выполнения лабораторной работы**

1. Сформованные и выдержанные в комнатных условиях образцы.
2. Технические весы.
3. Линейка (штангенциркуль).
4. Автоклав.

##### **Проведение испытаний**

Образцы-изделия помещаются в автоклав (лабораторный или заводской) и подвергаются тепловлажностной обработке по режиму 1,5–(6–8)–2 ч при давлении насыщенного пара 0,8 МПа (8 атм.) и температуре 175 °С. После полного охлаждения автоклава (через 10...12 ч), его открывают, образцы извлекаются из автоклава, протираются влажной (отжатой) тканью, взвешиваются, замеряются их размеры и вычисляется объемная плотность по (1.21). Определяется изменение массы образцов до (используют значения массы образцов после выдержки) и после запаривания. Проводят сравнительный анализ изменения значений объемной плотности свежесформованных, выдержанных перед запариванием и запаренных образцов.

#### **1.7.5. Определение свойств готовых образцов силикатного кирпича**

Образцы-изделия после запаривания испытываются для определения основных строительно-технических свойств.

##### *Приборы и материалы для выполнения лабораторной работы:*

1. Запаренные образцы-изделия.
2. Технические весы.
3. Линейка (штангенциркуль).
4. Гидравлический пресс.
5. Водяная баня.
6. Сушильный шкаф.

##### *Проведение испытаний*

*Объемная плотность.* Для оценки свойств силикатных образцов принимаются средние значения объемной плотности образцов.

*Прочностные характеристики.* Образцы-изделия после автоклавной обработки испытываются для определения прочностных характеристик силикатных изделий (предел прочности при сжатии, предел

прочности при изгибе на образцах-плитках). Испытания проводятся на гидравлическом прессе, расчет предела прочности при сжатии производится по формуле (1.19), предела прочности при изгибе:

$$R_{\text{изг}} = \frac{3 \cdot P_{\text{ман}} \cdot F_{\text{пор}}}{2 \cdot b \cdot h^2} \text{ кг/см}^2, \quad (1.22)$$

где  $R_{\text{изг}}$  – предел прочности при изгибе, кг/см<sup>2</sup>;  $P_{\text{ман}}$  – показания манометра, кг/см<sup>2</sup>;  $F_{\text{порш}}$  – площадь поршня, см<sup>2</sup>;  $b$  – ширина изделия, см;  $h$  – высота изделия, см.

*Водопоглощение.* Образцы помещаются в стакан с водой на сетку, слой воды над образцами должен быть не менее 4 см, образцы нагреваются и кипятятся в течение 1...2 ч, затем образцы промокаются влажной тканью и взвешиваются. Далее образцы высушиваются при 105 °С в сушильном шкафу до постоянной массы и снова взвешиваются.

Водопоглощение ( $W$ , %) вычисляется по формуле:

$$W = \frac{(m_1 - m_2)100}{m_1}, \quad (1.23)$$

где  $m_1$  – масса образца в высушенном состоянии, г;

$m_2$  – масса образца в насыщенном водой состоянии, г.

По результатам проделанной лабораторной работы делается *вывод* об основных строительно-технических свойствах полученных в лабораторных условиях образцов силикатных изделий.

*Примечание.* Элементы научных исследований в данной работе будут состоять:

- в использовании различных по составу вяжущих и кремнеземистых компонентов и изучении их влияния на свойства силикатных изделий;
- в исследовании влияния добавок различного назначения на свойства силикатных изделий;
- изучении влияния различных технологических факторов (параметров: активности и расхода извести, активности и расхода силикатной массы, давления прессования изделий, режима тепловлажностной обработки изделий и т. д.) на строительно-технические свойства силикатных изделий.

## **1.8. Контрольные вопросы по основам технологии силикатного кирпича**

1. Основные признаки классификации силикатных изделий.
2. Особенности автоклавной технологии.
3. Агрегатное состояние веществ, участвующих и образующихся при гидротермальном синтезе.

4. Типы химических связей гидросиликатных соединений.
5. Типы структур силикатных и гидросиликатных соединений.
6. Типы структур гидросиликатных соединений различной степени устойчивости.
7. Структура силикатного камня. Общее представление.
8. Классификация гидросиликатов кальция по Боггу и Тейлору (условное обозначение соединения, его состав).
9. Важнейшие свойства гидросиликатов кальция.
10. Роль воды в формировании структуры соединений в процессе гидротермального синтеза.
11. Формы связи воды в структуре соединений, образующихся в процессе гидротермального синтеза.
12. Химические процессы взаимодействия между водой и твердым телом в гидротермальных условиях.
13. Водяной пар, его технологические параметры и роль в процессах гидротермального синтеза.
14. Основные положения теории прочности автоклавных материалов.
15. Физико-химические процессы гидротермального синтеза соединений (назвать основные процессы).
16. Технологические факторы, влияющие на процессы гидротермального синтеза соединений.
17. Особенности классификации гидросиликатов кальция по структурному признаку.
18. Ассортимент и номенклатура силикатных изделий.
19. Виды и краткая характеристика сырья для производства силикатного кирпича.
20. Основные принципы проектирования силикатных масс.
21. Схема расчета силикатной массы.
22. Основные технологические стадии производства силикатного кирпича.
23. Особенности подготовки кремнеземистого компонента силикатных масс.
24. Особенности подготовки вяжущего компонента силикатных масс.
25. Процессы при гашении силикатных масс и способы их интенсификации.
26. Процессы при формовании силикатного кирпича.
27. Факторы, определяющие прочность кирпича-сырца.
28. Физико-химические процессы при тепловлажностной обработке силикатного кирпича.
29. Режимы и основные стадии запаривания силикатного кирпича.

## 2. ТЕХНОЛОГИЯ ЦЕМЕНТНЫХ БЕТОНОВ

Бетонами называют искусственные каменные материалы, получаемые в результате затвердевания тщательно перемешанной и уплотненной смеси из минерального вяжущего вещества с водой, мелкого и крупного заполнителей. До затвердевания эту смесь называют бетонной смесью [12].

В строительстве широко используют бетоны, приготовленные на цементах или других неорганических вяжущих веществах. Эти бетоны обычно затворяют водой. Цемент и вода являются активными составляющими бетона; в результате реакции между ними образуется цементный камень, скрепляющий зерна заполнителей в единый монолит.

Между цементом и заполнителем обычно не происходит химического взаимодействия, поэтому заполнители часто называют инертными материалами. Они существенно влияют на структуру и свойства бетона, изменяя ее пористость, сроки затвердевания, поведение при воздействии нагрузки и внешней среды. Заполнители значительно уменьшают деформации бетона при твердении и обеспечивают получение большеразмерных изделий и конструкций. В качестве заполнителей используют преимущественно местные горные породы и отходы производства. Для снижения плотности бетона и улучшения его теплотехнических свойств используют искусственные и природные пористые заполнители [12].

Для регулирования свойства бетона и бетонной смеси в их состав вводят различные химические добавки и активные минеральные компоненты, которые ускоряют или замедляют схватывание бетонной смеси, делают ее более пластичной и удобоукладываемой, ускоряют твердение бетона, возникающие при его твердении.

В течение длительного времени в бетонах происходит изменение пористой структуры, наблюдается протекание структурообразующих, а иногда и деструктивных процессов. С увеличением возраста бетона повышаются его прочность, плотность, стойкость к воздействию окружающей среды. Свойства бетона определяются не только его составом и качеством исходных материалов, но и технологией приготовления и укладки бетонной смеси в конструкцию, условиями твердения бетона.

Бетон является хрупким материалом: его прочность при сжатии в несколько раз выше прочности при растяжении. Для восприятия растягивающих напряжений бетон армируют стальными стержнями, получая железобетон. В железобетоне арматуру располагают так, чтобы она воспринимала растягивающие напряжения, а сжимающие напряжения

передавались на бетон. Совместная работа арматуры и бетона обусловлена хорошим сцеплением между ними и приблизительно одинаковыми температурными коэффициентами линейного расширения [12].

Технология бетона включает ряд этапов или технологических переделов: подготовку сырья, определение состава бетона, дозирование цемента, воды, заполнителей и других материалов, перемешивание, транспортировку бетонной смеси к месту укладки, заполнение формы и опалубки конструкции бетонной смесью, ее уплотнение, последующее твердение бетона в нормальных условиях (при температуре около 20 °С и влажности 80...100 %) либо при повышенных температурах в специальных аппаратах и устройствах [12].

## 2.1. Классификация бетонов

Бетоны классифицируют по средней плотности, виду вяжущего вещества, структуре, технологическим особенностям и назначению [12].

Многие свойства бетона зависят от его *плотности*, на величину которой влияют плотность цементного камня, вид заполнителя и структура бетонов. По плотности бетоны делят на особо тяжелые с плотностью более 2500 кг/м<sup>3</sup>; тяжелые – 1800...2500 кг/м<sup>3</sup>; легкие – 600...1800 кг/м<sup>3</sup>; особо легкие – менее 600 кг/м<sup>3</sup>.

Особо тяжелые бетоны готовят на тяжелых заполнителях – стальных опилках или стружках (сталебетон), железной руде (лимонитовый и магнетитовый бетоны) или борите (баритовый бетон).

В строительстве наиболее широко используют тяжелый бетон с плотностью 2100...2500 кг/м<sup>3</sup> на плотных заполнителях из горных пород (гранита, известняка, диабаз и др.). Облегченный бетон с плотностью 1800...2000 кг/м<sup>3</sup> получают на щебне из горных пород с плотностью 1600...1900 кг/м<sup>3</sup> или из песка (крупнопористый бетон). Легкие бетоны изготавливают на пористых заполнителях (керамзите, аглопорите, вспученном шлаке, пемзе, туфе и др.).

К особо легким бетонам относятся ячеистые бетоны (газобетон, пенобетон), которые получают вспучиванием смеси вяжущего, тонкомолотой добавки и воды с помощью специальных способов, и крупнопористый бетон на легких заполнителях. В ячеистых бетонах заполнителем по существу является воздух, находящийся в искусственно созданных ячейках [13].

Главной составляющей бетона, во многом определяющей его свойства, является *вяжущее вещество*, по виду которого различают бетоны цементные, силикатные, гипсовые, шлакощелочные, полимербетоны, полимерцементные и специальные [12].

- *Цементные бетоны* приготавливают на различных цементах и наиболее широко применяют в строительстве. Среди них основное место занимают бетоны на портландцементе и его разновидностях (около 65 % от общего объема производства), успешно используются бетоны на шлакопортландцементе (около 20...25 %) и пуццолановом цементе. К разновидностям цементных бетонов относятся: декоративные бетоны, изготавливаемые на белом и цветном цементах, бетоны для самонапряженных конструкций – на напрягающем цементе, бетоны для специальных целей, получаемые на особых видах цемента – глиноземистом, безусадочном и т. д.

- *Силикатные бетоны* готовят на основе извести и кремнеземистого компонента. Для производства изделий применяют автоклавный способ твердения.

- *Гипсовые бетоны* применяют для внутренних перегородок, подвесных потолков и элементов отделки зданий.

- *Шлакощелочные бетоны* делают на молотых шлаках, затворенных щелочными растворами.

- *Полимерцементные бетоны* изготавливают на смешанном связующем, состоящем из цемента и полимерного вещества. В качестве полимера используют, например, водорастворимые смолы и латексы.

- *Специальные бетоны* готовят с применением особых вяжущих веществ. Для кислотоупорных и жаростойких бетонов применяют жидкое стекло с кремнефтористым натрием, фосфатное, магнезиальное и другие связующие. В качестве специальных вяжущих используют шлаковые, нефелиновые, стеклощелочные и др., полученные из отходов промышленности.

В зависимости от *особенностей структуры* различают следующие группы бетонов:

- крупнозернистый бетон со слитной структурой;
- мелкозернистый бетон (без щебня);
- малощебеночный бетон, в котором уменьшено содержание щебня;
- крупнопористый или беспесчаный;
- ячеистый, в структуре которого имеется большое количество воздушных или газовых пузырьков.

В зависимости от используемой *технологии* различают:

- бетоны из жестких бетонных смесей, позволяющие, как правило, немедленную распалубку изделий;

- литые бетоны для изготовления изделий и конструкций способом литья в форму;

- безусадочные;

- пропаренные;

- автоклавные бетоны и ряд других.

В зависимости от *области применения* различают:

- обычный бетон для железобетонных конструкций (фундаментов, колонн, балок, перекрытий, мостовых и других типов конструкций);
- гидротехнический бетон для плотин, шлюзов, облицовки каналов, водопроводно-канализационных сооружений и т. д.;
- бетон для ограждающих конструкций (легкий бетон);
- бетоны специального назначения, например, жароупорный, кислотостойкий, для радиационной защиты, бетон для полов, тротуаров, дорожных и аэродромных покрытий и др.

Общие требования ко всем бетонам и бетонным смесям следующие: до затвердевания бетонные смеси должны легко перемешиваться, транспортироваться, укладываться (обладать подвижностью и удобоукладываемостью), не расслаиваться; бетоны должны иметь определенную скорость твердения в соответствии с заданными сроками распалубки и ввода конструкции или сооружения в эксплуатацию; по возможности расход цемента и стоимость бетона должны быть минимальными.

Получить бетон, удовлетворяющий всем поставленным требованиям, можно при правильном проектировании его состава, надлежащем приготовлении, укладке и уплотнении бетонной смеси, а также при правильном выдерживании бетона в начальный период его твердения.

Бетон – это сложный материал, свойства которого могут заметно изменяться в процессе выдерживания и эксплуатации. Только глубокое понимание природы этого материала, закономерностей, управляющих формированием его структуры и свойств, могут обеспечить рациональное и эффективное его применение в строительных конструкциях [14].

## **2.2. Материалы для бетона**

Для приготовления бетона наиболее широко используют неорганические вяжущие вещества. Эти вещества при смешении с водой под влиянием внутренних физико-химических процессов способны схватываться (переходить из жидкого или тестообразного состояния в камневидное) и твердеть (постепенно увеличивать свою прочность). Различают неорганические вяжущие вещества водного (цементы) и воздушного (известь, гипс, магнезиальное вяжущее) твердения [12, 15].

### **2.2.1. Портландцемент**

Портландцемент – это гидравлическое вяжущее вещество, твердеющее в воде или на воздухе. Он представляет собой порошок серого цвета, получаемый тонким помолом клинкера с добавкой гипса. Клинкер полу-

чают путем равномерного обжига до спекания тщательно дозированной смеси, содержащей  $\text{CaCO}_3$  – 75...78 % и  $(\text{CaO} + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3)$  – 22...25 % [12, 15]. Для получения цемента высокого качества необходимо, чтобы его химический состав, а следовательно и состав сырьевой смеси, были устойчивы. При помолу к цементному клинкеру может добавляться до 20 % гранулированных доменных шлаков или активных минеральных (кремнеземистых) добавок.

В результате обжига при температуре 1200...1450 °С образуются клинкерные минералы:

- четырехкальциевый алюминат  $4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$ ;
- трехкальциевый алюминат  $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ ;
- двухкальциевый силикат  $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ ;
- трехкальциевый силикат  $3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ .

Это четыре соединения – основные минералы цементного клинкера, но два последних (силикаты кальция) составляют от 70 до 80 % от его массы. Ориентировочное содержание различных минералов в портландцементном клинкере составляет:

- $3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$  ( $\text{C}_3\text{S}$ ) – 37...60 %;
- $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$  ( $\text{C}_2\text{S}$ ) – 15...37 %;
- $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$  ( $\text{C}_3\text{A}$ ) – 5...15 %;
- $4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$  ( $\text{C}_4\text{AF}$ ) – 10...18 %.

Основным свойством, характеризующим качество любого цемента, является его *прочность (марка)*.

Прочность цемента при сжатии колеблется от 30 до 60 МПа. Соответственно прочность балочек на изгиб составляет 4,5...6,5 МПа. Цементы с прочностью от 30 до 40 МПа относят к марке 300, с прочностью 40...50 МПа – к марке 400 и т. д. В строительстве применяют цементы марок 300, 400, 500, 550, 600.

Действительную прочность цемента называют его активностью. Например, если прочность контрольных образцов окажется 44 МПа, то активность этого цемента будет 44 МПа, а марка – 400. При проектировании состава бетона лучше использовать активность цемента, так как это обеспечивает более точные результаты и экономию цемента. Повышение прочности цемента на 1 МПа приводит к снижению расхода цемента на 2...5 кг/м<sup>3</sup>.

Цементная промышленность выпускает в основном цементы М400...550, а по особому заказу – М600. Прочность цемента высоких марок нарастает быстрее, чем цемента низких марок. Применение таких цементов обеспечивает быструю распалубку конструкций и сокращает сроки изготовления сборных железобетонных изделий.

Помимо прочности к цементам предъявляются и другие требования, важными из которых являются нормальная густота и сроки схватывания.

*Нормальной густотой* называют то содержание воды (%), которое необходимо добавить к цементу, чтобы получить определенную консистенцию цементного теста, при которой пестик Тетмайера (прибора Вика) погружается в тесто на глубину, нормированную ГОСТ 310.3-76 (ГОСТ 30744-2001). Портландцементы имеют нормальную густоту 22...27 %, пуццолановые – 30 % и более. Нормальная густота увеличивается при введении в цемент при помоле тонкомолотых добавок, обладающих большой водопотребностью, например, трепела, опоки, микрокремнезема. Наименьшую нормальную густоту имеют чисто клинкерные цементы. Нормальная густота цемента определяет реологические свойства цементного теста и тем самым влияет на подвижность смеси [16, 17].

*Сроки схватывания* цемента, определяемые на приборе Вика (ГОСТ 30744-2001) по глубине проникания иглы в цементное тесто, характеризуют начало и конец процесса превращения материала в твердое тело. По стандарту требуется, чтобы начало схватывания при температуре 20 °С наступало не ранее чем через 45 мин, а конец завершался не позднее чем через 10 ч с момента затворения цемента водой. В действительности начало схватывания цемента наступает через 1...2 ч, а конец – через 5...8 ч. Эти сроки обеспечивают производство бетонных работ, так как дают возможность транспортировать и укладывать бетонные смеси и растворы до их схватывания. Для регулирования сроков схватывания в цемент при его производстве вводят гипс и другие химические продукты [17].

К технологическим свойствам цемента следует отнести *тонкость помола цемента и гранулометрический состав*, которые определяются в соответствии с ГОСТ 10178-85. Портландцемент имеет, как правило, тонкий помол: через сито № 008 (около 4900 отверстий на 1 см<sup>2</sup> с размером ячеек в свету 0,08 мм) должно проходить не менее 85 % общей массы цемента. Средний размер частиц цемента составляет 15...20 мкм [18].

Тонкость помола цемента характеризуется также удельной поверхностью зерен, содержащихся в 1 г цемента. Цемент среднего качества имеет удельную поверхность около 2500 см<sup>2</sup>/г, высокого качества – 3500 см<sup>2</sup>/г и более.

*Истинная плотность* портландцемента без добавок в зависимости от его химико-минералогического состава составляет 3000...3200 кг/м<sup>3</sup>. Другой технической характеристикой цемента служит его *насыпная плотность*, которая в рыхлом состоянии колеблется от 900 до 1000 кг/м<sup>3</sup>,

в уплотненном – от 1400 до 1700 кг/м<sup>3</sup>. На практике часто пользуются для расчета объема хранилищ средней цифрой – 1200 кг/м<sup>3</sup>.

Схватывание и твердение цемента – экзотермические процессы. Практически 1 кг цемента М300 выделяет в бетоне за 7 сут с момента затворения цемента водой не менее 170 кДж, 1 кг цемента М400 – не менее 210 кДж. *Тепловыделение цемента* зависит от минералогического состава цементного клинкера, типа введенных добавок и тонкости помола. Из клинкерных минералов, входящих в состав цемента, наибольшее тепловыделение у  $C_3S$ , затем у  $C_3A$ , у остальных оно значительно меньше.

*Виды цемента.* Основу большинства цементов составляет портландцементный клинкер. Регулируя его минералогический состав и вводя минеральные или органические добавки, получают различные цементы, отличающиеся по свойствам и применяемые в разных областях строительства.

*Портландцемент (ПЦ)* – это цемент, не содержащий в своем составе минеральных добавок, кроме гипса. Чисто клинкерный портландцемент без добавок применяют для высокопрочных бетонов, в производстве сборного железобетона, особенно предварительно напряженных конструкций, при строительстве в особых условиях – на Севере и в районах с сухим и жарким климатом.

Наиболее распространенными цементными, которые составляют более 60 % от общего объема выпускаемых цементов, являются портландцементы с добавками.

*Быстротвердеющий цемент* является разновидностью портландцемента с добавками. Через 3 сут твердения прочность на сжатие этого цемента не менее 25 МПа, марки 400, 500. Для обеспечения быстрого твердения клинкер должен содержать  $C_3S > 50 \%$ ,  $(C_3S + C_3A) > 60 \%$ , а цемент иметь удельную поверхность не менее 3500 см<sup>2</sup>/г.

Шлакопортландцемент получают в результате совместного помола портландцементного клинкера и гранулированного доменного шлака. Шлакопортландцемент отличается более медленным схватыванием (начало через 4...6 ч, конец через 10...12 ч) и твердением в первые 7...10 сут. Истинная плотность его немного ниже – 2,9...3,0 г/см<sup>3</sup>. Этот цемент при содержании в клинкере менее 8 %  $C_3A$  дает бетон, стойкий в отношении действия минерализованных вод (сульфатных, морской воды).

*Сульфатостойкие цементы* выделены в отдельную группу (табл. 2.1). Сульфатостойкий портландцемент выпускают М400. Сульфатостойкость цемента обеспечивается нормированием его минералогического состава, в котором ограничивается содержание менее стойких к сульфатной агрессии минералов. Этот цемент содержит  $C_3S$  50 %,

$C_3A$  5 %, ( $C_3A + C_4AF$ ) 10...22 %. Сульфатостойкий портландцемент с добавкой получают совместным помолом портландцементного клинкера специального состава [ $C_3A < 5$  %, ( $C_3A + C_4AF$ )  $< 22$  %] и тонкомолотой активной минеральной добавки: трепела, опоки, диатомита (5...10 %) или доменного гранулированного шлака (10...22 %). Добавка связывает выделяющийся при гидратации  $C_3A$  гидрат оксида кальция, что способствует повышению сульфатостойкости цемента.

Таблица 2.1

*Требования к цементам*

Виды цемента	Марка	Содержание добавок, %		
		Гранулированный шлак	Активные минеральные	
			Трепел, опока, диатомит	Прочие
Цементы общестроительного назначения				
Портландцемент	400, 500, 550, 600	Не допускается		
Портландцемент с минеральными добавками	400, 500, 550, 600	20	10	15
Быстротвердеющий портландцемент	400, 500	20	10	15
Шлакопортландцемент	300, 400, 500	20...60	–	–
Быстротвердеющий шлакопортландцемент	400, 500	20...60	–	–
Цементы сульфатостойкие				
Сульфатостойкий портландцемент	400	Не допускается		
Сульфатостойкий портландцемент с добавками	400, 500	10...20	5...10	Не допускается
Сульфатостойкий шлакопортландцемент	300, 400	21...60	Не допускается	
Пуццолановый цемент	300, 400	Не допускается	20...30	25...40

*Сульфатостойкий шлакопортландцемент* получают, ограничивая содержание в клинкере  $C_3A < 8$  %; выпускают его М300, 400. Сульфатостойкий цемент предназначен для бетонных и железобетонных конструкций, эксплуатируемых в условиях переменного уровня воды, а также сооружений, которые подвергаются агрессивному воздействию суль-

фатных вод при одновременном многократном замерзании и оттаивании или многократном увлажнении и высыхании.

*Пуццолановый портландцемент* также отнесен к группе сульфатостойких цементов. Этот цемент получают путем совместного помола портландцементного клинкера, содержащего  $C_3A < 8 \%$ , с активной минеральной добавкой, которая вводится в большем количестве, чем в обычный портландцемент с добавкой. Содержание добавки зависит от ее вида и составляет для трепела, опоки и диатомита 20...30 %, для других активных минеральных, чаще всего кремнеземистых, добавок, например туфа, трасса, пемзы, – 25...40 %. Пуццолановый портландцемент светлее обыкновенного, имеет меньшую плотность (2,8...2,9 г/см<sup>3</sup>), чем обыкновенный. Нормальная густота такого цемента составляет 30...40 %, при этом образуется более вязкая смесь с низкой подвижностью, которая требует введение пластифицирующих добавок. Из-за связывания большей части свободного гидроксида кальция хорошо затвердевший пуццолановый портландцемент не выщелачивается пресной водой и не разрушается под действием морских и других минерализованных вод. Применять пуццолановый портландцемент следует в тех случаях, когда необходима повышенная физико-химическая стойкость бетона и обеспечение его твердения во влажной среде.

### **2.2.2. Заполнители для бетона**

Заполнители занимают в бетоне до 80 % объема и оказывают влияние на свойства бетона, его долговечность и стоимость. Введение в бетон заполнителей позволяет резко сократить расход цемента. Жесткий скелет из высокопрочного заполнителя несколько увеличивает прочность и модуль деформации бетона, уменьшает деформации конструкций под нагрузкой, а также ползучесть бетона – необратимые деформации, возникающие при длительном действии нагрузки. Заполнитель уменьшает усадку бетона, способствуя получению более долговечного материала [13].

Пористые естественные и искусственные заполнители, обладая малой плотностью, уменьшают плотность легкого бетона, улучшают его теплотехнические свойства. В специальных бетонах (жаростойких, для защиты от радиации и др.) роль заполнителя очень высока, так как его свойства во многом определяют специальные свойства этих бетонов.

В бетоне применяют крупный и мелкий заполнитель. Крупный заполнитель (более 5 мм) подразделяют на гравий и щебень. Мелким заполнителем в бетоне является естественный или искусственный песок.

К заполнителям для бетона предъявляются требования, учитывающие особенности влияния заполнителя на свойства бетона. Заполнитель представляет собой совокупность отдельных зерен, то есть является зернистым материалом, для которого имеется ряд общих закономерностей. Наиболее существенное влияние на свойства бетона оказывают зерновой состав, прочность и чистота заполнителя [13].

*Зерновой состав* показывает содержание в заполнителе зерен разной крупности. Он определяется просеиванием пробы заполнителей через стандартные сита с величиной отверстий от 0,14 до 70 мм и более. Различают рядовой заполнитель, содержащий зерна различных размеров, и фракционированный, когда зерна заполнителя разделены на отдельные фракции, включающие зерна близких между собой размеров, например 5...10 мм или 20...40 мм. Заполнитель характеризуется наименьшей и наибольшей крупностью, под которыми понимают размеры наименьших или наиболее крупных зерен заполнителя. Зерновой состав называют непрерывным, если в нем встречаются зерна всех размеров – от наименьшего до наибольшего. Если же в заполнителе отсутствуют зерна какого-либо промежуточного размера, то такой зерновой состав называют прерывистым. Большинство исследователей считают более эффективным непрерывный состав заполнителей [12].

Для выбора непрерывного зернового состава заполнителя предлагаются различные «идеальные» кривые просеивания. Поскольку нельзя получить смесь одновременно с минимальным объемом пустот и наименьшей удельной поверхностью зерен, идеальная кривая подбирается из условия, чтобы количество пустот в смеси и суммарная поверхность зерен требовали минимального расхода цемента для получения определенной подвижности бетонной смеси прочности плотного бетона. При подборе соотношения зерен различных размеров по идеальной кривой получают наиболее подвижные смеси, менее склонные к расслаиванию. Примером подобных идеальных кривых могут служить кривые просеивания, предложенные Фуллером и Боломеем, уравнение которых имеет вид [12, 13]:

$$y = k_{\phi} + (100 - k_{\phi}) \sqrt{\frac{x}{D_{\text{пр}}}}, \quad (2.1)$$

где  $k_{\phi}$  – коэффициент формы,  $k_{\phi} = 8 \dots 14$ ;  $x$  – размер зерен данной фракции;  $D_{\text{пр}}$  – предельная крупность заполнителя.

На практике подбор состава заполнителей точно по идеальной кривой требует дополнительных операций по рассеву песка и щебня. Часть материала отдельных фракций может оказаться лишней, а для пополнения других фракций требуется дополнительное дробление. Подобная

методика получила распространение только при применении фракционированных заполнителей.

Правильный выбор зернового состава заполнителя или соотношения между песком и щебнем может быть сделан только с учетом состава бетона, в частности, с учетом содержания цемента и воды [19, 20]. В бетонах низких и средних марок с расходом цемента 200...300 кг/м<sup>3</sup> при подвижной бетонной смеси наилучшие результаты обеспечивает зерновой состав, близкий к идеальным кривым просеивания. В бетонах высокой прочности с повышенными расходами цемента жестких бетонных смесях долю песка или мелкой фракции заполнителя в его общем объеме целесообразно несколько уменьшить, исходя из конкретных свойств заполнителя и состава бетона.

С зерновым составом непосредственно связана *пустотность* заполнителя, определяемая возможностью его плотной укладки. На пустотность влияет форма зерен. В табл. 2.2 представлено влияние формы зерна на объем пустот [21].

Таблица 2.2

*Пустотность (%) зернового материала в зависимости от формы зерен*

Форма зерен	Укладка		
	Наиболее плотная	Наименее плотная	Средняя
Кубы	0	87,1	43,55
Октаэдры	12,2	83,9	48,05
Додекаэдры	14,1	60,7	37,40
Икосаэдры	10,8	59,9	35,10
Шары	26,2	47,6	36,90

С увеличением угловатости зерен вероятные значения пустотности возрастают.

Пустотность заполнителей колеблется от 20 до 50 %. В бетоне желательно использовать заполнители, состоящие из нескольких фракций и имеющие наименьшую пустотность.

Соотношение между песком и щебнем (гравием) [22], при котором получается минимальная пустотность, можно ориентировочно определить, полагая, что песок полностью заполнит пустоты между зернами крупного заполнителя с учетом некоторой раздвижки зернами песка. Тогда:

$$\frac{\Pi}{\rho_{\Pi}} = \Pi_{\text{от.щ.}} \left( \frac{\rho_{\text{щ}}}{\rho_{\text{п}}} \right) \alpha, \quad (2.2)$$

где  $\Pi$ ,  $\Psi$  – расходы песка и щебня;  $\rho_{\text{п}}$ ,  $\rho_{\text{щ}}$  – соответственно плотность песка и щебня;  $\Pi_{\text{от.щ}}$  – относительная пустотность щебня;  $\alpha$  – коэффициент раздвижки.

Важной характеристикой заполнителя, связанной с его зерновым составом и определяющей его влияние на свойства бетона и бетонной смеси, является *удельная поверхность* зерен заполнителя [22].

Удельная поверхность заполнителя может быть ориентировочно определена по формуле А.С. Ладинского:

$$S_3 = \frac{16,5R_{\phi}}{1000}(a + 2b + 4c + 8d + 16e + 32f), \quad (2.3)$$

где  $R_{\phi}$  – коэффициент, учитывающий форму зерен и другие особенности заполнителя; по данным В.М. Москвина,  $R_{\phi} = 1,5 \dots 2,5$ ;  $a$ ,  $b$ ,  $c$ ,  $d$ ,  $e$ ,  $f$  – соответственно частные остатки на ситах с размером отверстий 2,5; 1,25; 0,63; 0,315; 0,14 мм и количество заполнителя, прошедшее через сито с отверстием 0,14 мм.

При определении удельной поверхности щебня частные остатки делят на коэффициенты по мере возрастания размера зерна: частный остаток на сите 5 мм – на коэффициент 2, на ситах 10, 20, 40 мм – соответственно на 4, 8, 16.

Удельные поверхности природных среднезернистых песков колеблются от 50 до 100 см<sup>2</sup>/г [22].

Для получения монолитного бетона необходимо, чтобы цементное тесто не только заполнило пустоты между зернами песка, но раздвинуло зерна с целью создания между ними цементной прослойки. Расход цемента на получение подобной оболочки зависит от удельной поверхности заполнителя, возрастая с уменьшением размера зерен. В результате с увеличением удельной поверхности заполнителя либо повышается техническая вязкость бетонной смеси, либо для получения определенной жесткости или подвижности смеси приходится увеличивать расход воды и соответственно расход цемента, чтобы обеспечить получение бетона заданной прочности.

*Прочность* заполнителя определяется не только прочностью горной породы, из которой он получен, но крупностью зерен. При выветривании или дроблении породы разрушение происходит по более слабым местам структуры, и с уменьшением размера зерна прочность их повышается. Естественные пески обладают прочностью при сжатии и растяжении более высокой, чем прочность раствора или цементного камня. Прочность крупных заполнителей из прочных пород (гранита, диабаз и др.) превосходит по прочности раствор. Прочность пористых заполнителей может быть равна или меньше прочности раствора [22].

Большое влияние на прочность бетона оказывает чистота заполнителя. Пылевидные и глинистые примеси создают на поверхности зерен заполнителя пленку, препятствующую сцеплению их с цементным камнем. В результате прочность бетона значительно снижается.

*Природный песок*, применяемый для производства обычного бетона, представляет собой образовавшуюся в результате выветривания горных пород рыхлую смесь зерен (крупностью 0,14...5 мм) различных минералов, входящих в состав изверженных (реже осадочных) горных пород. Иногда применяют песок, полученный путем дробления твердых горных пород [22].

Крупность зерен определяют просеиванием песка через стандартный набор сит с размером ячеек 5; 2,5; 1,25; 0,63; 0,315; 0,14 мм. Наличие в песке зерен крупнее 10 мм не допускается, зерен размером 5...10 мм должно быть не более 5 % (по массе). Остатки на каждом сите (%), называемые частными, характеризуют распределение зерен песка по степени крупности, то есть зерновой (гранулометрический) состав песка. Складываемая частный остаток на данном сите с суммой остатков на предыдущих ситах, определяют полные остатки (%) на ситах. Для условного выражения крупности песка пользуются модулем крупности, обозначающим сумму полных остатков  $a$  (%) на ситах стандартного набора, деленную на 100:

$$M_{кр} = \sum a_{полн} / 100. \quad (2.4)$$

Результаты просеивания песка можно представить графически. На рис. 2.1 в виде заштрихованной полосы указаны допустимые пределы колебаний зернового состава песка для бетона. Кривая просеивания песка, получаемая по результатам ситового анализа, должна находиться между верхней и нижней ломаными линиями [22].

Модуль крупности позволяет приблизительно оценить влияние заполнителя на свойства бетона. По крупности пески разделяют на крупные, средние, мелкие и очень мелкие или тонкие (табл. 2.3) [22].

Таблица 2.3

*Характеристика песка по крупности*

Группа песка	Модуль крупности	Полный остаток на сите 063, %	Водопотребность, %
Крупный	3,5...2,5	50...70	4...6
Средний	2,5...2,0	35...50	6...8
Мелкий	2,0...1,5	20...35	8...10
Очень мелкий	1,0...1,5	Менее 20	Более 10

Для полной характеристики песка используют величину его пустотности. В качественном песке пустотность не должна превышать 38 %.

Для бетона наиболее пригоден крупный песок, содержащий достаточное количество средних и мелких зерен. При такой комбинации зерен объем пустот будет малым, а площадь поверхности зерен – небольшая. Этот оптимальный состав песка соответствует заштрихованной полосе на рис. 2.1.

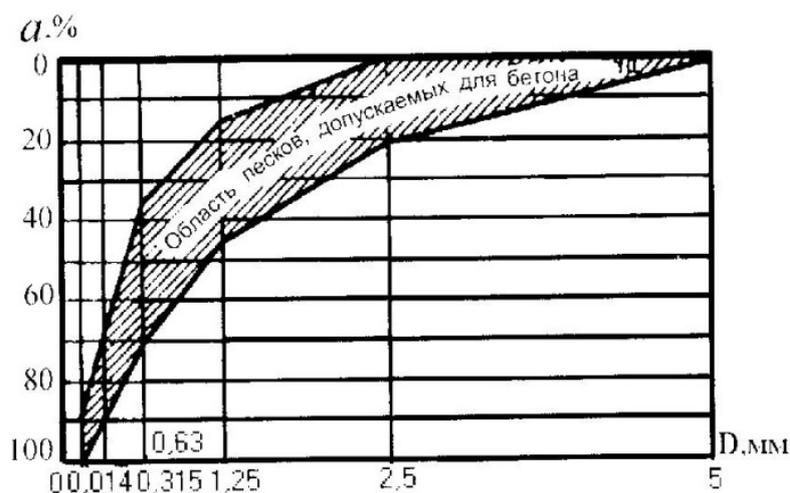


Рис. 2.1. Зерновой состав песка:

$a$  – полные остатки;  $D$  – размер отверстий контрольных сит [22]

Плотность песка зависит от его истинной плотности, пустотности и влажности и определяется в сухом рыхлом состоянии – это насыпная плотность. Песок для бетона М200 (класс В 12,5) и выше или для бетона в конструкциях, подвергающихся замерзанию в насыщенном водой состоянии, должен иметь насыпную плотность не ниже  $1550 \text{ кг/м}^3$ ; в остальных случаях – не ниже  $1400 \text{ кг/м}^3$ .

Важное значение имеет чистота песка, то есть содержание в нем пыли, мельчайших частиц и глины. Содержание в песке зерен размером менее  $0,14 \text{ мм}$  не должно превышать 10 %, а содержание глинистых, илистых и пылевидных примесей, определенных отмучиванием, – 3 % по массе. Органические примеси, например гумусовые, допускаются только в ограниченном количестве, так как они понижают прочность и даже разрушают цемент (особенно органические кислоты).

*Гравием* называют рыхлый материал, образовавшийся в результате естественного разрушения (выветривания) горных пород. Гравий состоит из более или менее окатанных зерен размером  $3 \dots 70 \text{ мм}$ . Это могут быть зерна высокой прочности, например гранитные, и слабые зерна пористых известняков. При большом содержании песка такой материал называют песчано-гравийной смесью, или гравелистым песком.

Для бетона наиболее пригодна малоокатанная (щебневидная) форма зерен гравия; малопригодна яйцевидная (окатанная) форма, и практически непригодна пластинчатая или лещадная форма зерен с шириной, в три и более раз превышающей толщину. Иголоватых и пластинчатых зерен в составе гравия должно быть не более 15 % (по массе).

В зависимости от величины зерен различают гравий следующих видов: рядовой – 3...70 мм; фракционированный: особо мелкий – 5...10 мм, мелкий – 2...20 мм, средний – 20...40 мм, крупный – 40...70 мм.

Крупность гравия определяют просеиванием его через стандартный набор сит с круглыми отверстиями размером 70, 40, 20, 10 и 5 (или 3) мм.

Максимальная крупность зависит от размера бетонируемых конструкций: для удобной укладки бетонной смеси нельзя применять гравий крупнее  $\frac{1}{4}$  минимального размера сечения конструкций и больше минимального расстояния между стержнями арматуры в железобетонной конструкции; при бетонировании полов, покрытий и плит –  $\frac{1}{2}$  толщины плиты, при бетонировании массивных сооружений с редкой арматурой – 120...150 мм.

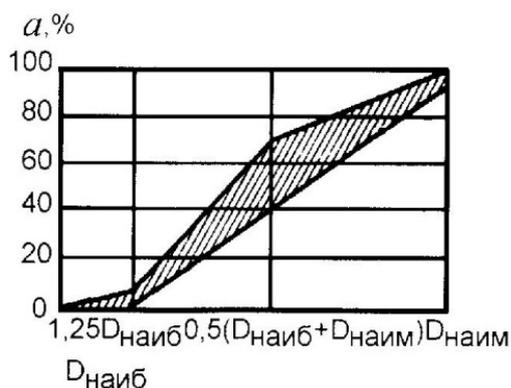


Рис. 2.2. Зерновой состав гравия (щебня)

После просеивания гравия определяют частные остатки (%) на каждом сите, начиная с наибольшего, затем вычисляют полные остатки. Результаты просеивания гравия наносят на график. Зерновой состав гравия должен располагаться по возможности в пределах заштрихованной площади, представленной на рис. 2.2.

Пустотность гравия не должна превышать 45 %. Прочность зерен гравия должна обеспечивать получение бетона, прочность которого на 20...50 % превышает заданную.

Гравий считается морозостойким, если в насыщенном водой состоянии он выдерживает без разрушения многократное замораживание при  $-15^{\circ}\text{C}$  и оттаивание, причем суммарная потеря в массе зерен должна быть не более 10 %, а при морозостойкости выше 50 циклов – не более 5 %. В суровых климатических условиях гравий должен выдерживать не менее 100...200 циклов замораживания и оттаивания, в умеренных – 50, в мягких – 15...25. Допускается ускоренное испытание на морозостойкость путем насыщения в растворе серно-кислого натрия и высушивания [ГОСТ 10060.3-95\*].

В гравии допускается не более 1 % (по массе) глинистых, илистых, пылевидных примесей, количество которых определяют отмучиванием [ГОСТ 8267-93].

*Щебнем* называют материал, полученный в результате дробления камней из горных пород. Щебень имеет остроугольную форму. Для приготовления бетона лучше всего использовать щебень, близкий по форме к кубу или тетраэдру. Форма зерен щебня зависит от структуры каменной породы и типа камнедробильной машины.

Для производства щебня используют гранит, диабаз и другие изверженные породы, а также плотные осадочные породы – известняк, доломит и измененные породы – кварцит. Наиболее широко в строительстве применяют известняковый и гранитный щебень.

К крупности, зерновому составу, прочности и морозостойкости щебня предъявляют те же требования, что и к гравию. Предельное содержание глинистых и пылевидных примесей допускается: для бетонов М300 (В25) и выше – 1 % в щебне изверженных пород и 2 % в щебне из карбонатных пород в соответствии с ГОСТ 8267-93 [24].

Для обычного бетона можно применять щебень только из каменных пород, прочность которых выше заданной марки бетона, а именно: необходимая прочность исходной каменной породы (в насыщенном водой состоянии)  $R_{\text{ш}} > 2R_{\text{б}}$  для бетона М300 (В25) и выше и  $R_{\text{ш}} > 1,5R_{\text{б}}$  для бетона более низких марок [24].

Для приготовления легких бетонов используют *легкие пористые заполнители* [23]:

- 1) щебень из пористых горных пород (пемзы, вулканических туфов и лав, известковых туфов, ракушечников и др.);
- 2) отходы промышленности:
  - а) топливные (котельные) шлаки, то есть отходы от сжигания угля;
  - б) гранулированные доменные шлаки;
  - в) зольный гравий из золы ТЭЦ;
- 3) специально изготавливаемые (искусственные) пористые заполнители:
  - а) керамзит, получаемый в результате вспучивания глин, глинистых сланцев и подобного сырья при ускоренном обжиге (керамзитовый гравий, щебень и песок);
  - б) шлаковая пемза (термозит) – пористые доменные шлаки, вспученные под действием водяного пара и раздробленные на щебень и песок;
  - в) агломерированные шлаки, получаемые спеканием зол и топливных шлаков на особых спекательных устройствах (аглопорит);

- г) вспученные при обжиге горные породы (перлит, вермикулит, шунгезит);
  - д) шлаковый пористый гравий, полученный специальной переработкой шлака;
  - е) пеностекольный гравий и щебень;
- 4) полимерные пористые заполнители (стирпор и др.).

Искусственные пористые заполнители отличаются более высоким качеством и позволяют получать более прочные, стойкие легкие бетоны.

Легкие (пористые заполнители) должны иметь плотность в насыщенном состоянии менее  $\rho_n = 1000 \text{ кг/м}^3$ , чаще всего  $\rho_n = 500 \dots 800 \text{ кг/м}^3$ , то есть примерно вдвое меньше, чем у обычного песка и гравия [13].

Основные показатели плотности и прочности важнейших видов легких заполнителей [13] приведены в табл. 2.4.

Таблица 2.4

*Свойства легких заполнителей*

Заполнитель	Насыпная плотность, $\text{кг/м}^3$	Предел прочности при сжатии в куске, МПа
Щебень: <ul style="list-style-type: none"> <li>• из обычной природной пемзы,</li> <li>• туфов легких,</li> <li>• ракушечников легких</li> </ul>	400...600 700...800 700...800	1,0...3,5 5,0...10 1,0...2,5
Шлаковая пемза (из вспученных доменных шлаков): <ul style="list-style-type: none"> <li>• легкая,</li> <li>• средняя</li> </ul>	400...600 700...800	2,5...10 5,0...20
Керамзитовый гравий (из вспученных глин): <ul style="list-style-type: none"> <li>• легкий,</li> <li>• средний</li> </ul>	300...400 500...700	2,5...10 5,0...20
Керамзитовый песок	600...800	—
Агломерированные (или вторичные) шлаки (щебень из спекшихся шлаков и зол)	600...1000	2,5...10
Гранулированные доменные шлаки: <ul style="list-style-type: none"> <li>• легкие,</li> <li>• средние</li> </ul>	500...600 800...1000	— —
Вспученные горные породы (перлит)	200...800	0,5...1,5

Истинная плотность пористых заполнителей составляет 2,6...2,7 г/см<sup>3</sup>. Общая пористость легких заполнителей 40...75 %, причем поры сообщающиеся и тем самым открыты для доступа воды. Закрытая пористость не превышает 10...20 %. Пустотность легких пористых заполнителей зависит от их зернового состава и равна 30...45 %. В легких бетонах используют крупный пористый заполнитель (гравий или щебень) стандартных фракций 5...10, 10...20, 20...40 мм и легкий песок, получаемый дроблением крупных фракций заполнителя, отсевом мелкой фракции или обжигом в печах кипящего слоя.

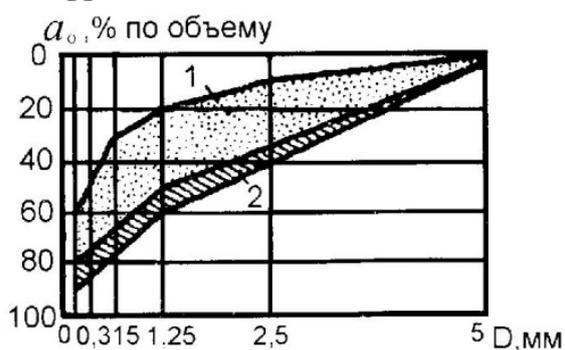


Рис. 2.3. Зерновой состав пористого песка:

$a_0$  – полные остатки по объему

Зерновой состав песка должен соответствовать областям, представленным на рис. 2.3 (1 – желательный, 2 – допустимый).

Пористая структура заполнителей значительно снижает их прочность (обычно в 50...100 раз). Ориентировочно прочность керамического пористого заполнителя типа керамзит можно определить по формуле

$$R_3 = 150\rho^2. \quad (2.5)$$

Опытным путем прочность пористых заполнителей определяют сдавливанием в стальном цилиндре диаметром 150 мм [ГОСТ 9757-90]. Действительная прочность заполнителя превышает условную: для керамзита – в 3–5 раз, аглопорита – в 20–30 раз.

Влияние легкого заполнителя на свойства бетона определяется всем комплексом его свойств, особенностями строения. Большое влияние оказывает не только общий объем пористости, но и ее характер: мелкопористые заполнители позволяют получать бетоны более прочные и экономичные по расходу цемента.

*Технологические характеристики заполнителя.* Существующие стандартные испытания дают в основном качественную оценку заполнителя и заключение о его пригодности для получения бетона заданной марки (класса). Для количественной оценки влияния заполнителя на свойства и экономичность бетона необходимо знать влияние его на подвижность или водопотребность бетонной смеси, а также на прочность бетона при сжатии.

Б.Г. Скрамтаевым и Ю.М. Баженовым [21] был предложен способ испытания заполнителя непосредственно в бетоне, что обеспечивает получение наиболее достоверных технологических характеристик

заполнителя: водопотребности и коэффициента прочности песка (или щебня).

Водопотребность песка и щебня устанавливают путем сравнительных испытаний растворной и бетонной смесей. При этом определяют водоцементное отношение цементного теста и бетонной смеси по расплыву и погружению конуса (подвижность бетонной смеси) соответственно.

Водопотребность песка (%) находят по формуле

$$V_{\text{п}} = \frac{(В/Ц)_{\text{р}} - (В/Ц)_{\text{ц}}}{2} 100, \quad (2.6)$$

где  $(В/Ц)_{\text{р}}$ ,  $(В/Ц)_{\text{ц}}$  – водоцементное отношение растворной смеси и цементного теста соответственно.

Водопотребность щебня (%) находят по формуле

$$V_{\text{щ}} = \frac{(В/Ц)_{\text{б}} - (В/Ц)_{\text{р}}}{3,5} 100, \quad (2.7)$$

где  $(В/Ц)_{\text{б}}$ ,  $(В/Ц)_{\text{р}}$  – водоцементное отношение бетонной смеси и растворной смеси соответственно.

В результате испытаний различных заполнителей было установлено, что водопотребность песка составляет 4...14 %, а крупного заполнителя – 1...10 % [22].

Влияние заполнителя на прочность раствора бетона можно приблизительно оценить по результатам испытаний раствора и бетона, приготовленных на исследуемых заполнителях, и по значению коэффициента прочности  $A$  в известной формуле прочности бетона

$$A = \frac{R_{\text{б(р)}}}{R_{\text{ц}} \left( \frac{Ц}{В} \right)^{0,5}}. \quad (2.8)$$

Для песков коэффициент  $A$  колеблется от 0,3 для 0,68, для щебня и гравия – от 0,34 до 0,75.

В табл. 2.5 приведены стандартные и технологические характеристики некоторых заполнителей [25].

Данные таблицы подтверждают полезность использования технологических характеристик. Заполнители с очень стандартными характеристиками могут иметь разные технологические свойства и по-разному влиять на подвижность бетонной смеси и прочность бетона.

Таблица 2.5

*Стандартные и технологические характеристики некоторых заполнителей*

Заполнитель	Истинная плотность, г/см <sup>3</sup>	Насыпная плотность, кг/л	Пустотность, %	Модуль крупности, Мкр	Водо-потребность, %	Коэффициент прочности
Щебень из изверженных пород	2,69	1,45	45,7	–	3,43	0,50
	2,6	1,47	42,6	–	5,88	0,59
Известняковый щебень	2,56	1,34	45,6	–	6,72	0,63
Строительный песок	2,63	1,51	42,5	2,79	7,0	0,53
	2,7	1,37	49,0	0,69	11,5	0,25
Вольский песок	2,65	1,56	41,0	2,05	4,0	0,32

**2.2.3. Добавки к бетонам**

Для регулирования свойств бетона, бетонной смеси и экономии цемента применяют различные добавки. Их подразделяют на два вида: химические добавки, вводимые в бетон в небольшом количестве (0,1...2 % от массы цемента) и изменяющие в нужном направлении свойства бетонной смеси и бетона, и тонкомолотые минеральные добавки (5...20 % и более), используемые для экономии цемента, получения плотного бетона при малых расходах цемента и повышения стойкости бетона [26].

*Химические добавки* классифицируют по основному эффекту действия [23, 26]:

1) регулирующие свойства бетонных смесей: пластифицирующие, то есть увеличивающие подвижность бетонной смеси; стабилизирующие, то есть предупреждающие расслоение бетонной смеси; водоудерживающие, уменьшающие водоотделение;

2) регулирующие схватывание бетонных смесей и твердение бетона: ускоряющие или замедляющие схватывание, ускоряющие твердение, обеспечивающие твердение при отрицательных температурах (противоморозные);

3) регулирующие плотность и пористость бетонной смеси и бетона: воздухововлекающие, газообразующие, пенообразующие, уплотняющие (воздухоудаляющие и коагулирующие поры бетона);

4) добавки-регуляторы деформаций бетона, расширяющие добавки;

5) повышающие защитные свойства бетона к стали, ингибиторы коррозии стали;

б) добавки-стабилизаторы, повышающие стойкость бетонных смесей против расслоения, снижающие раство- и водоотделение;

7) придающие бетону специальные свойства: гидрофобизирующие, то есть уменьшающие смачивание бетона; антикоррозионные, то есть повышающие стойкость в агрессивных средах, красящие, повышающие бактерицидные и инсектицидные свойства, электроизоляционные, электропроводящие, противорадиационные.

Некоторые добавки обладают полифункциональным действием, например, пластифицирующие и воздухововлекающие, газообразующие и пластифицирующие и др. В этом случае добавку классифицируют по наиболее выраженному действию.

Минеральные добавки. Для активного управления структурой и свойствами бетонной смеси и бетона, наряду с химическими, применяют минеральные добавки. Эти материалы представляют собой порошки различной минеральной природы, получаемые из природного или техногенного сырья (золы, молотые шлаки и горные породы, микрокремнезем и др.). Минеральные добавки отличаются от заполнителей мелкими размерами зерен (менее 0,16 мм), а от химических тем, что они не растворяются в воде, являясь по существу тонкой составляющей твердой фазы бетона. Поэтому минеральные добавки часто называют минеральными наполнителями [26].

Минеральные добавки из техногенного сырья – золы, молотые шлаки, микрокремнезем и другие – имеют различный минералогический состав и дисперсность, которые определяют их применение в цементах и бетонах (табл. 2.6).

В табл. 2.7 показана эффективность использования некоторых химических и минеральных добавок, применяемых непосредственно в бетонной смеси или производстве композиционного вяжущего вещества, используемого затем для приготовления бетона [12].

Минеральные добавки делятся на активные и инертные. Активные минеральные добавки способны в присутствии воды взаимодействовать с диоксидом кальция при обычных температурах, образуя соединения, обладающие вяжущими свойствами. Некоторые активные минеральные добавки, например молотые доменные шлаки, способны к самостоятельному твердению, которое активизируется при добавке извести.

Инертные добавки при обычной температуре не вступают в реакцию с компонентами цемента, однако при определенных условиях эти добавки могут проявлять реакционную способность. В большинстве случаев инертные добавки используют для регулирования зернового состава и пустотности твердой фазы бетона: заполнитель-цемент-минеральная добавка, с целью управления свойствами бетонной смеси и бетона.

Таблица 2.6

## Классификация и характеристика кремнеземсодержащих добавок техногенного происхождения [12, 26]

Классификация	Химический и минеральный состав	Физические характеристики
1. Обладающие вяжущими свойствами: – быстроохлажденные шлаки	В основном силикатное стекло (аморфный кремнезем), содержащее CaO, MgO, Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> . Кристаллические компоненты могут присутствовать в небольшом количестве	Не полностью приготовленный к применению материал представляет собой гранулы и содержит 5...15 % влаги. Перед применением высушивается и измельчается до частиц размером менее 45 мкм, частицы имеют шероховатую поверхность, удельная поверхность 350...500 м <sup>2</sup> /кг
2. Обладающие вяжущими и пуццолановыми свойствами: – высококальциевые золы уноса (CaO > 10 %)	В основном силикатное стекло (аморфный кремнезем), содержащее CaO, MgO, Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> . Кристаллические компоненты в виде SiO <sub>2</sub> и C <sub>3</sub> A могут присутствовать в небольшом количестве. Могут присутствовать CaO <sub>св</sub> и периклаз. Углерода < 2 %	Содержит от 10 до 15 % частиц размером более 45 мкм. Большая часть частиц имеет сферическую форму с диаметром < 20 мкм. Поверхность частиц в основном гладкая. Удельная поверхность 300...400 м <sup>2</sup> /кг
3. Обладающие высокой пуццолановой активностью: – микрокремнезем	Состоит в основном из кремнезема некристаллической (аморфной) модификации	Ультрадисперсный порошок, состоящий из сферических частиц в основном диаметром менее 0,5 мкм, удельная поверхность около 20 000 м <sup>2</sup> /кг
4. Обладающие нормальной пуццолановой активностью: – низкокальциевые золы (CaO < 10 %)	В основном силикатное стекло (аморфный кремнезем), содержащее Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> . Кристаллические компоненты в основном в виде кварца, муллита, магнетита в небольшом количестве. Углерода обычно менее 5 %	Содержит от 10 до 15 % частиц более 45 мкм. Большая часть частиц имеет сферическую форму с диаметром около 20 мкм. Удельная поверхность 250...350 м <sup>2</sup> /кг
5. Прочие: – медленно охлажденные шлаки; – золы гидроудаления, шлаки котельных	Содержит в основном кристаллические силикатные минералы и небольшое количество некристаллических компонентов	Дополнительно измельчаются для придания вяжущих или пуццолановых свойств. Измельченные частицы имеют шероховатую поверхность

Таблица 2.7

## Эффективность применения химических и минеральных добавок

Добавки		Технический эффект	Варианты использования	
Вид	Тип		Компонент бетонной смеси	Модификатор композиционного вяжущего
Суперпластификаторы	Поликарбоксилаты	Снижение водопотребности, %	20...25	20...50
		Сокращение расхода клинкерной части, %	15...20	20...60
	Полинафталинсульфаты	Снижение водопотребности, %	15...20	15...30
		Сокращение расхода клинкерной части, %	10...15	15...40
	Сульфированные меламиформальдегидные смолы	Снижение водопотребности, %	15...20	20...40
		Сокращение расхода клинкерной части, %	15...20	20...50
Регуляторы схватывания и твердения	Соли оксикарбоновых кислот	Замедление структурообразования, увеличение сохранности бетонной смеси, ч	8...36	8...48
	Соли минеральных кислот	Ускорение структурообразования, увеличение ранней прочности, %	10...30	30...50
Регуляторы структуры бетона	Соли смоляных кислот (воздухововлекающие)	Повышение морозостойкости, %	50...150	100...200
	Полигидросилоксаны (микрогазообразующие)	Повышение морозостойкости, %	50...200	100...30
	Наносиликаты (уплотняющие)	Повышение морозостойкости, %	50...200	—
Минеральные добавки	Активные пуццоланы с нормированным минералогическим составом	Повышение прочности бетона, %	5...15	15...30
		Сокращение расхода клинкерной части, %	5...15	10...50
	Микрокремнезем	Повышение прочности бетона, %	50...100	50...100
		Сокращение расхода клинкерной части, %	20...40	10...50
	Расширяющие	Повышение прочности бетона, %	5...15	20...40
		Сокращение расхода клинкерной части, %	5...15	10...50
		Снижение усадочных деформаций, %	50...150	200...300

Природные минеральные добавки получают тонким измельчением различных горных пород вулканического (туфы, пеплы, трассы) или осадочного (диатомит, трепел, опока) происхождения. Минеральные добавки вулканического или осадочного происхождения состоят в основном из аморфных кремнезема и глинозема (70...90 %). Эти добавки получили широкое применение при получении цемента. Основной их недостаток – это повышенная водопотребность.

При проектировании применения в бетоне добавок необходимо проводить технико-экономические расчеты для прогнозирования ожидаемого эффекта.

#### **2.2.4. Вода для приготовления бетонной смеси**

Для приготовления бетонной смеси используют водопроводную питьевую, а также любую воду, имеющую водородный показатель рН не менее 4. Вода не должна содержать сульфатов более 2700 мг/л (в пересчете на  $SO_4$ ) и всех солей более 5000 мг/л. Пригодность воды проверяют путем сравнительных испытаний образцов [28].

### **2.3. Тяжелый бетон**

Обычный тяжелый бетон является наиболее широко применяемым видом бетона. Его изготавливают на различных цементах (преимущественно портландцементе), песке, гравии или щебне из различных горных пород. Как правило, этот бетон имеет слитное строение и много разновидностей в зависимости от назначения или технологических особенностей. Прочность его может изменяться в широких пределах от 5 до 80 МПа и выше (классы В3,5...В60).

Тяжелый бетон используют для различных изделий и конструкций гражданского и промышленного строительства, для дорожного и гидротехнического строительства, для инженерных и специальных сооружений. Изделия и конструкции могут изготавливаться на заводах сборного бетона и железобетона или бетонироваться непосредственно на строительном объекте (монолитный бетон) [12].

#### **2.3.1. Виды тяжелого бетона**

*Бетон для сборных железобетонных конструкций.* Для ускорения твердения бетона при изготовлении сборных железобетонных конструкций применяют тепловую обработку. Рост прочности при этом определяется не только активностью цемента, составом бетона, консистенцией бетонной смеси, но также режимом тепловой обработки [30].

На заводах сборного железобетона применяются следующие режимы тепловой обработки: предварительная выдержка – 1...2 ч, подъем температуры – 2...3 ч, изотермическая выдержка – 6...12 ч, остывание – 3...4 ч.

Температура изотермической выдержки для бетона на портландцементе равна 80 °С, для бетона на шлакопортландцементе – 90 °С.

*Высокопрочный бетон.* В современных условиях возможно получать высокопрочные бетоны с прочностью 50...100 МПа и особо высокопрочные с прочностью более 100 МПа. Для получения высокой прочности необходимо создать особоплотную, прочную и монолитную структуру бетона. Этого можно достигнуть при выполнении ряда условий, вытекающих из физических основ структурообразования бетона:

- 1) применение высокопрочных цементов и заполнителей;
- 2) предельно низкие водоцементные отношения;
- 3) высокий предельно допустимый расход цемента;
- 4) применение суперпластификаторов и комплексных добавок, способствующих получению плотной структуры бетона;
- 5) особо тщательное перемешивание и уплотнение бетонной смеси;
- 6) создание наиболее благоприятных условий твердения [30].

Для высокопрочных бетонов следует применять цементы активностью  $R_{ц} > 50$  МПа с низкими значениями нормальной плотности. В зависимости от назначения бетона для его приготовления используют цемент определенного минералогического состава. При изготовлении сборных железобетонных изделий небольших и средних размеров применяют высокопрочные тонкомолотые портландцементы с повышенным содержанием  $C_3S$  и  $C_3A$  и быстротвердеющие цементы. Для массивных изделий и конструкций, изготавливаемых на полигонах без тепловой обработки, рекомендуется применять цементы с пониженным содержанием  $C_3A$  и ограниченным содержанием  $C_3S$  (менее 50 %), лучше всего белитовые. Для обеспечения более равномерного твердения используются пластификаторы и замедлители твердения.

Заполнители для высокопрочного бетона должны быть чистыми, обладать необходимым зерновым составом и малой пустотностью, не содержать слабых зерен. Предел прочности крупного заполнителя должен быть на 20 % выше заданной прочности бетона. Для особо высокопрочных бетонов применяют заполнители повышенной прочности из диабазы, базальта и других прочных пород.

Для получения высокопрочных бетонов необходимо применять более низкие водоцементные отношения В/Ц, что требует использования специальных приемов, позволяющих плотно укладывать бетонные смеси. К таким приемам относятся применение композиционных вяжущих веществ или суперпластификаторов и комплексных добавок, содержащих

повышенную дозу пластификатора, регуляторы твердения, микрокремнезем и антивоздуховлакающий компонент, либо использование особо интенсивных способов уплотнения бетонной смеси, например, пресования или роликового проката.

Для гарантированного получения плотной и прочной структуры расход цемента в высокопрочном ограничивают: для сборных железобетонных изделий малых и средних размеров максимально допустимый расход цемента составляет  $600 \text{ кг/м}^3$ , для изделий большой массивности –  $450 \text{ кг/м}^3$ . В высокопрочных бетонах следует особо уделять внимание снижению расхода цемента, так как при прочих равных условиях это способствует получению более плотной и менее дефектной структуры бетона и повышению его прочности. Для снижения расхода цемента используют:

1) применение более высокопрочных цемента, повышение их активности механическим или химическим путем (домол с добавкой 2...3 % гипса или с комплексной добавкой на основе суперпластификаторов до удельной поверхности  $4000...5000 \text{ см}^2/\text{г}$ , активацию в специальных установках, введение крентов);

2) применение специально подобранной смеси заполнителей с минимальной пустотностью и водопотребностью;

3) введение в бетонную смесь суперпластификаторов и комплексных добавок.

Наилучшими условиями для твердения высокопрочного бетона являются нормальные (температура  $20...25 \text{ }^\circ\text{C}$ , влажность 100 %). С повышением температуры и особенно при тепловой обработке в твердеющем бетоне возникают градиенты температуры и влажности, приводящие к миграции влаги, температурно-влажностным деформациям и неравномерной усадке цементного камня. В результате увеличиваются деструктивные явления, поэтому при применении для ускорения твердения высокопрочного бетона тепловой обработки необходимо применять более длительную предварительную выдержку, очень мягкие режимы с постепенным подъемом и спуском температуры, снижать температуру прогрева до  $50...60 \text{ }^\circ\text{C}$ , обеспечивать высокую влажность среды.

*Быстротвердеющий бетон.* Получение быстротвердеющего бетона, обладающего относительно высокой прочностью в раннем возрасте (1...3 сут.) при твердении в нормальных условиях, достигается применением быстротвердеющего цемента, а также различными способами ускорения твердения цемента. К этим способам относятся:

1) применение жесткой бетонной смеси с низкими водоцементными отношениями за счет применения суперпластификаторов;

2) использование добавок – ускорителей твердения  $\text{CaCl}_2$ , глиноземистого цемента и др.;

3) сухое или мокрое домалывание цемента с добавкой гипса (2...5 % от массы цемента) или с применением комплексных специальных добавок;

4) активация цементного раствора [12, 30].

*Бетон для гидротехнических сооружений* должен обеспечивать длительную службу конструкций, постоянно или периодически омываемых водой. Поэтому в зависимости от условий службы к гидротехническому бетону, помимо требований прочности, предъявляют также требования по водонепроницаемости и морозостойкости.

Гидротехнический бетон делят на следующие разновидности: подводный, постоянно находящийся в воде; расположенный в зоне переменного горизонта воды; надводный, подвергающийся эпизодическому омыванию водой.

Прочность при сжатии гидротехнического бетона определяют в возрасте 28 сут. В строительстве применяют бетон классов В10...В40.

По водонепроницаемости в 180-суточном возрасте бетон делят на 4 марки: W2; W4; W6; W8. Бетон марки W2 при стандартном испытании не должен пропускать воду при давлении 0,2 МПа, бетон марок W4; W6; W8 – при давлении соответственно 0,4; 0,6 и 0,8 МПа [31].

По морозостойкости гидротехнический бетон делят на пять марок: F50; F100; F150; F200; F300. В этом случае марка определяет число циклов замораживания и оттаивания (в возрасте 28 сут.), после которого прочность бетона снизилась не более чем на 25 %.

Специальные свойства гидротехнического бетона обеспечиваются:

1) выбором материалов, обеспечивающих требуемые морозостойкость и водонепроницаемость;

2) определением В/Ц исходя не только из уровня прочности, но и из условия долговечности;

3) назначением расхода цемента в определенных пределах;

4) выбором коэффициента раздвижки зерен заполнителя  $\alpha$ , обеспечивающего получение плотного и долговечного бетона;

5) применением микрозаполнителей, уменьшающих тепловыделение и объемные деформации и гарантирующих получение плотного бетона при низких расходах цемента;

6) применением воздухововлекающих добавок [12].

Для гидротехнического бетона допускается применение портландцемента, пластифицированного и гидрофобного цементов, пуццоланового, шлакового и сульфатостойкого цементов.

Заполнители для гидротехнического бетона должны обеспечивать его водостойкость и морозостойкость. Обычно применяют кварцевые пески, а щебень или гравий – из изверженных или осадочных пород.

*Бетон для дорожных и аэродромных покрытий.* В бетонных покрытиях дорог и аэродромов основными расчетными напряжениями являются напряжения от изгиба, так как покрытие работает на изгиб, как плита на упругом основании. Поэтому при проектировании состава данного бетона надо установить такое соотношение между его составляющими, которое обеспечивает требуемую прочность бетона на растяжение при изгибе, а также достаточную прочность на сжатие и морозостойкость [33].

### **2.3.2. Проектирование и расчет состава тяжелого бетона**

Проектирование состава бетона включает [32]:

1. Назначение требований к бетону исходя из вида и особенностей службы и изготовления конструкций.
2. Выбор материалов для бетона и получение необходимых данных, характеризующих их свойства.
3. Определение предварительного состава бетона.
4. Проверку состава в пробных замесах.
5. Контроль за бетонированием.
6. Корректировку состава в процессе производства при колебаниях свойств заполнителя и других факторов.

Определение предварительного состава бетона производят на основе зависимости прочности бетона от активности цемента, цементно-водного отношения, качества используемых материалов и зависимости подвижности бетонной смеси от расхода воды и т. д. Для получения уточненных зависимостей свойств бетона и бетонной смеси от его состава проводят предварительные испытания [32]. При этом часто используют математические методы планирования эксперимента и обработки результатов.

Подвижность (жесткость) бетонной смеси назначают в зависимости от размеров конструкции, густоты армирования, способов укладки и уплотнения (табл. 2.8).

Минимальный расход цемента зависит от консистенции бетонной смеси и крупности заполнителя (табл. 2.9). Если при определении состава бетона окажется, что расход цемента, требуемый из условий получения заданной прочности, ниже указанных значений, то в расчет принимают минимальный расход цемента.

*Порядок расчета состава бетона.* Состав бетонной смеси выражают двумя способами:

1. Соотношением по массе между цементом, песком и гравием (или щебнем) с обязательным указанием водоцементного отношения и активности цемента. Количество цемента принимают за 1, поэтому соотношение между составными частями бетона записывают в виде  $1 : x : y$  с указанием В/Ц (например,  $1 : 2 : 4$  по массе при В/Ц = 0,6).

Таблица 2.8

*Требования к подвижности и жесткости бетонной смеси*

Конструкции и способ уплотнения	Жесткость по стандартному вискозиметру, с	Подвижность, см
Сборные железобетонные с немедленной распалубкой, формуемые на виброплощадках	30...10	–
Перекрытия с пустотами, стеновые панели, формуемые в горизонтальном положении на виброплощадках	10...5	1...4
Густоармированные элементы (колонны, ригели, плиты), изготавливаемые с применением наружного или внутреннего вибрирования	5...3	5...9
Формуемые на ударно-вибрационных установках	30...20	–
Формуемые в кассетах	5...3	7...14
Центрифугированные	5...3	5...10
Гидропрессованные (трубы)	10...5	–

Таблица 2.9

*Минимальный расход цемента для получения нерасслаиваемой плотной бетонной смеси*

Смесь	Минимальный расход цемента, кг/м <sup>3</sup> , при предельной крупности заполнителя, мм			
	10	20	40	70
Особо жесткая (Ж = 20 с)	160	150	140	130
Жесткая (Ж = 10...20 с)	180	160	150	140
Малоподвижная (Ж = 5...10 с)	200	180	160	150
Подвижная (ОК = 1...10 см)	220	200	180	160
Очень подвижная (ОК = 10...16 см)	240	220	210	180
Литая (ОК > 16 см)	250	230	200	190

2. Расходом материалов по массе (кг) на 1 м<sup>3</sup> уложенной и уплотненной бетонной смеси, например: цемента – 280; песка – 700; щебня – 1250; воды – 170; итого – 2400.

Различают лабораторный состав бетона, устанавливаемый для сухих материалов, и производственный (полевой) – для материалов в естественно-влажном состоянии. Лабораторный состав определяют расчетно-экспериментальным путем. Состав бетона предварительно рассчитывают

по абсолютным объемам, используя формулы для определения расхода воды, цемента, песка и щебня (гравия), выведенные на основании рассмотренных выше зависимостей, а затем уточняют пробными затвердениями.

Порядок расчета состава бетона следующий [33]:

1. Определяют В/Ц (или Ц/В) в зависимости от требуемой прочности, срока и условий твердения бетона. Водоцементное или цементно-водное отношение находят путем предварительных опытов, устанавливающих зависимость прочности бетона от этого фактора и активности цемента (с применением местных заполнителей) или ориентировочно по формулам:

а) для обычного бетона при  $В/Ц > 0,4$

$$\frac{В}{Ц} = \frac{AR_{ц}}{(R_{б} + A \cdot 0,5R_{ц})}; \quad (2.9)$$

б) высокопрочного бетона при  $В/Ц < 0,4$

$$\frac{В}{Ц} = \frac{A_1R_{ц}}{(R_{б} - A_1 \cdot 0,5R_{ц})}. \quad (2.10)$$

Значения коэффициентов  $A$  и  $A_1$  – эмпирических коэффициентов, учитывающих влияние заполнителей и некоторых других факторов, берут из табл. 2.10. Можно находить Ц/В по графикам (рис. 2.4). Формулу (2.9) применяют, если  $R_{б} < 2AR_{ц}$ , в других случаях используют формулу (2.10) [33, 34].

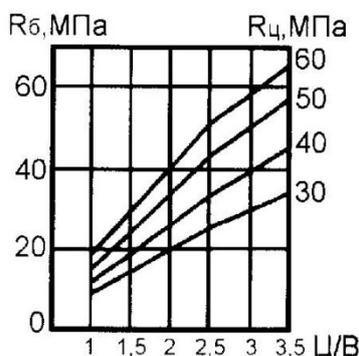


Рис. 2.4. График для назначения Ц/В в зависимости от требуемой прочности бетона  $R_{б}$  и активности цемента  $R_{ц}$

Таблица 2.10

Значения коэффициентов  $A$  и  $A_1$

Материалы для бетона	$A$	$A_1$
Высококачественные	0,65	0,43
Рядовые	0,6	0,4
Пониженного качества	0,55	0,37

*Примечание.* Высококачественные материалы: щебень из плотных горных пород высокой прочности, песок оптимальной крупности и портландцемент высокой активности, без добавок или с минимальным количеством гидравлической добавки; заполнители чистые, промытые, фракционированные с оптимальным зерновым составом смеси фракций. Рядовые материалы: заполнители среднего качества, в том числе гравий, портландцемент средней активности или высокомарочный шлакопортландцемент. Материалы пониженного качества: крупные заполнители низкой прочности и мелкие пески, цементы низкой активности.

2. Расход воды определяют на основании предварительных испытаний в зависимости от требуемой подвижности смеси. При этом, если водопоглощение крупного заполнителя более 0,5 % по массе, то его необходимо учитывать при расчетах. Также расход воды ориентировочно можно определить по графикам, представленным на рис. 2.5.

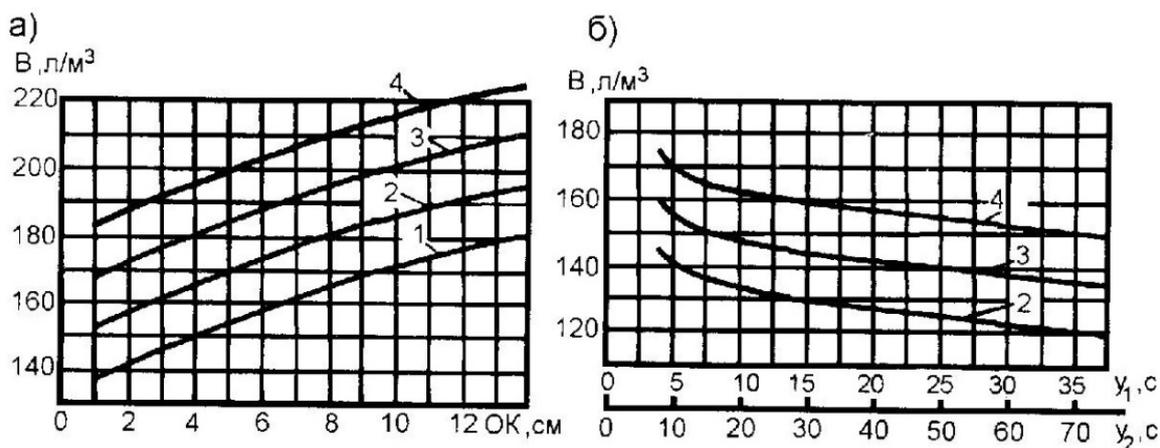


Рис. 2.5. График водопотребности  $V$  пластичной (а) и жесткой (б) бетонной смеси, изготовленной с применением портландцемента, песка средней крупности (водопотребность 7 %) и гравия наибольшей крупности: 1 – 80 мм; 2 – 40 мм; 3 – 20 мм; 4 – 10 мм;  $y_1$  – удобоукладываемость по стандартному прибору;  $y_2$  – то же, по способу Скрамтаева

*Примечание:*

1. Если применяют мелкий песок с водопотребностью свыше 7 %, то расход воды увеличивают на 5 л на каждый процент увеличения водопотребности; при применении крупного песка с водопотребностью ниже 7 % расход воды уменьшают на 5 л на каждый процент уменьшения водопотребности.
2. При применении щебня расход воды увеличивают на 10 л.
3. При применении пуццолановых цементов расход воды увеличивают на 15...20 л.
4. При расходе цемента свыше 400 кг расход воды увеличивают на 10 л на каждые 100 кг цемента.

3. Расход цемента определяют по формуле:

$$Ц = В : В/Ц. \quad (2.11)$$

Если расход цемента на 1 м<sup>3</sup> бетона окажется ниже допустимого по нормативному документу (табл. 2.9), то его расход либо увеличивают, либо вводят тонкомолотую добавку [19].

4. Устанавливают коэффициент раздвижки зерен заполнителя  $\alpha$  для пластичных бетонов в зависимости от количества цементного теста и крупности песка или выбирают его значения по табл. 2.11.

Таблица 2.11

*Оптимальные значения коэффициента  $\alpha$  для пластичных бетонных смесей ( $B_n = 7\%$ )*

Расход цемента, кг/м <sup>3</sup>	Оптимальные значения коэффициента $\alpha$ при В/Ц				
	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8
250	–	–	1,26	1,32	1,38
300	–	1,3	1,36	1,42	–
350	1,32	1,38	1,44	–	–
400	1,4	1,46	–	–	–
500	1,5	1,56	–	–	–

5. По формуле (2.11) определяют расход щебня или гравия.

$$Щ = \frac{1000}{\alpha \Pi_{щ} / \rho'_{щ} + 1 / \rho_{щ}}. \quad (2.12)$$

6. По формуле (2.12) определяют расход песка.

$$\Pi = \rho_{п} (1000 - Ц / \rho_{ц} - В - Щ / \rho_{щ}). \quad (2.13)$$

7. На пробных замесах проводят проверку подвижности или жесткости бетонной смеси и при необходимости вносят поправку в расчет состава бетона.

В общем случае расчет состава производят по представленной методике, хотя современная технология и отличается большим разнообразием требований к бетону, материалов для бетона и технологических приемов производства [32].

#### **2.4. Лабораторный практикум по теме: «Испытание тяжелого бетона»**

*Целью работы* является освоение проектирования бетона по методу абсолютных объемов и методов определения основных строительно-технических свойств бетонной смеси и бетона.

В процессе выполнения работы необходимо:

1. Рассчитать состав бетона.

2. Определить удобоукладываемость бетонной смеси.
3. Определить плотность бетонной смеси в свежееуплотненном состоянии.
4. Изготовить и испытать образцы.
5. Провести корректировку состава бетонной смеси.
6. Рассчитать номинальный и полевой состав бетона.

#### **Требуемые материалы и оборудование**

1. Цемент, отвечающий требованиям стандарта (ГОСТ 10178-85\*\*) [18].
2. Заполнители (кварцевый песок, щебень или гравий), отвечающие требованиям стандартов (ГОСТ 26633-61, ГОСТ 8736-93, ГОСТ 8267-93) [31, 2, 24].
3. Вода (питьевая), имеющая водородный показатель рН не менее 4, отвечающая требованиям стандарта (ГОСТ 23732-79) [28].
4. Конус нормальный (ГОСТ 10181-2000) [35].
5. Установка типа Вебе для определения жесткости (ГОСТ 10181-2000) [35].
6. Лабораторная виброплощадка, обеспечивающая вертикально направленные колебания частотой 50 Гц и амплитудой  $0,5 \pm 0,01$  мм.
7. Стальная линейка по ГОСТ 427.
8. Кельма типа КБ по ГОСТ 9533.
9. Прямой металлический гладкий стержень диаметром 16 мм, длиной 600 мм, с округленными концами.
10. Загрузочная воронка.
11. Гладкий металлический лист размерами не менее  $700 \times 700$  мм.
12. Металлические сосуды вместимостью 1; 5 и 10 л.
13. Металлические противни.
14. Сито с размером отверстий 5 мм.
15. Стекланные цилиндры вместимостью 250 мл и 1 л.
16. Пресс, удовлетворяющий требованиям ГОСТ 28840-90.
17. Формы для изготовления образцов в соответствии с требованиями ГОСТ 22685-89.

#### **2.4.1. Расчет состава тяжелого бетона методом абсолютных объемов**

Проектирование состава включает: назначение требований к бетону исходя из вида и особенностей службы и изготовления конструкций; выбор материала для бетонов и получение необходимых данных, характеризующих их свойства; определение предварительного состава бетона; проверку состава в пробных замесах; корректировку состава.

*Исходные данные для расчета состава тяжелого бетона:*

1. Проектная прочность бетона при сжатии (марка) –  $R_b$ , МПа.

2. Характеристика бетонной смеси по удобоукладываемости: осадка конуса – ОК, см или жесткость – Ж, с.

3. Характеристика исходных материалов:

- для цемента:
  - активность –  $R_{ц}$ , МПа;
  - насыпная плотность –  $\rho_{ц}^н$ , кг/м<sup>3</sup>;
- истинная плотность –  $\rho_{ц}$ , кг/м<sup>3</sup>;
- для песка:
  - зерновой состав;
  - модуль крупности –  $M_k$ ;
  - насыпная плотность –  $\rho_{п}^н$ , кг/м<sup>3</sup>;
  - истинная плотность –  $\rho_{п}$ , кг/м<sup>3</sup>;
  - влажность (для полевого состава) –  $W_{п}$ , %;
- для щебня (гравия):
  - зерновой состав;
  - наибольшая крупность –  $D_{наиб}$ , мм;
  - насыпная плотность –  $\rho_{щ}^н$ , кг/м<sup>3</sup>;
  - истинная плотность –  $\rho_{щ}$ , кг/м<sup>3</sup>;
  - пустотность –  $V_{пуст}$ , %;
  - влажность (для полевого состава) –  $W_{щ}$ , %.

*Расчет состава тяжелого бетона методом абсолютных объемов* основывается на следующих условиях и закономерностях:

• *условие первое* – сумма абсолютных объемов всех компонентов бетона равна 1 м<sup>3</sup> (1000 л) уплотненной бетонной смеси, то есть

$$\frac{Ц}{\rho_{ц}} + \frac{В}{\rho_{в}} + \frac{П}{\rho_{п}} + \frac{Щ}{\rho_{щ}} = 1, \quad (2.14)$$

где Ц, В, П, Щ – соответственно расходы на 1 м<sup>3</sup> бетонной смеси цемента, воды, песка и щебня, кг;  $\rho_{ц}$ ,  $\rho_{в}$ ,  $\rho_{п}$ ,  $\rho_{щ}$  – истинные плотности этих материалов, кг/м<sup>3</sup>;

$\frac{Ц}{\rho_{ц}}$ ,  $\frac{В}{\rho_{в}}$ ,  $\frac{П}{\rho_{п}}$ ,  $\frac{Щ}{\rho_{щ}}$  – абсолютные объемы материалов, м<sup>3</sup>;

• *условие второе* – цементно-песчаный раствор должен заполнить все пустоты между крупным заполнителем с некоторой раздвижкой его зерен, то есть

$$\frac{Ц}{\rho_{ц}} + \frac{В}{\rho_{в}} + \frac{П}{\rho_{п}} = \frac{Щ}{\rho_{щ}} \cdot \alpha \cdot V_{п}, \quad (2.15)$$

где  $\rho_{щ}^н$  – насыпная плотность щебня, кг/м<sup>3</sup>;  $V_{п}$  – пустотность щебня, относительная величина;  $\alpha$  – коэффициент раздвижки зерен щебня раствором.

Основной закон прочности бетона соответствует формуле Боломея–Скрамтаева:

$$R_b = A \cdot R_{ц} \left( \frac{Ц}{В} \pm 0,5 \right), \quad (2.16)$$

где  $R_b$  – проектная марка бетона, МПа;  $R_{ц}$  – активность цемента (марка), МПа;  $A$  – коэффициент, учитывающий качество материалов.

*Количество материалов рассчитывают на 1 м<sup>3</sup> плотной бетонной смеси:*

1. Определяют водоцементное отношение (В/Ц), исходя из требуемой марки бетона, при использовании цемента определенной активности и с учетом качества исходных материалов по формулам (2.9) и (2.10), которые получены преобразованием относительно В/Ц-формулы (2.16).

2. Ориентировочный расход воды определяют исходя из требуемой удобоукладываемости бетонной смеси по табл. 2.12, которая составлена с учетом вида и крупности зерен заполнителя [36]. В таблице приведены значения расхода воды для смесей на цементе с нормальной плотностью теста 26...28 % и песка с  $M_{кр} = 2$ . При изменении нормальной плотности цементного теста на каждый процент в меньшую сторону расход воды уменьшают на 3...5 л/м<sup>3</sup>, в большую – увеличивают на то же значение. В случае изменения модуля крупности песка в меньшую сторону на каждые 0,5 его значения необходимо увеличить, а в большую сторону – уменьшить расход воды на 3...5 л/м<sup>3</sup>.

3. *Расход цемента* вычисляют по формуле:

$$Ц = \frac{В}{В/Ц}. \quad (2.17)$$

Если при определении состава бетона расход цемента окажется выше допустимого СН 386-74, то следует провести технико-экономическое обоснование повышенного расхода цемента. Если расход цемента на 1 м<sup>3</sup> бетона окажется ниже допустимого СН 386-74 (табл. 2.9), то следует увеличить его до требуемой нормы или ввести тонкомолотую добавку. Последнюю обычно применяют в случае, если активность цемента слишком высока для бетона данной марки [37].

4. Определяют расход заполнителей в кг на 1 м<sup>3</sup> бетонной смеси исходя из двух условий метода абсолютных объемов.

Решая совместно уравнения (2.14) и (2.15), рассчитывают необходимый расход щебня (гравия), кг на 1 м<sup>3</sup> бетона:

$$Щ = \frac{1}{(1/\rho_{щ}) + \alpha \cdot (V_{пуст} / \rho_{щ}^H)}. \quad (2.18)$$

Таблица 2.12

Ориентировочный расход воды на 1 м<sup>3</sup> бетонной смеси

Марка по удобоукладываемости	Жесткость, с	Подвижность, см	Расход воды, л/м <sup>3</sup> , при крупности (Д), мм							
			гравия				щебня			
			10	20	40	70	10	20	40	70
СЖ 3	150...200	–	135	130	128	–	–	–	–	–
СЖ 3	90...120	–	145	140	135	–	160	155	140	–
СЖ 2	60...80	–	155	150	140	–	165	160	150	–
СЖ 1	30...50	–	165	160	150	–	175	170	160	–
Ж 3	21...30	–	170	165	160	125	180	175	165	130
Ж 2	11...20	–	175	170	165	130	185	180	170	135
Ж 1	5...10	–	180	175	150	135	190	185	175	145
П 1	–	1...2	185	176	155	140	200	185	170	155
П 1	–	3...5	195	180	165	150	210	195	180	165
П 2	–	6...8	205	190	175	160	220	205	190	175
П 3	–	9...12	215	200	185	170	230	215	200	185
П 3	–	12...16	225	220	205	195	235	230	215	205

Значения коэффициента раздвижки зерен заполнителя приведены в табл. 2.11. Для других значений Ц и В/Ц коэффициент  $\alpha$  находят интерполяцией.

Значения коэффициента  $\alpha$  даны при водопотребности песка 7 %; если водопотребность используемого мелкого песка более 7 %, коэффициент  $\alpha$  уменьшают на 0,03 на каждый процент увеличения водопотребности песка, если водопотребность крупного песка менее 7 %, коэффициент  $\alpha$  увеличивают на 0,03 на каждый процент уменьшения водопотребности.

Для жестких смесей при  $Ц < 400 \text{ кг/м}^3$   $\alpha = 1,05 \dots 1,15$ .

После определения расхода щебня (гравия) рассчитывают расход песка по формуле:

$$П = \left[ 1 - \left( \frac{Ц}{\rho_{ц}} + \frac{В}{\rho_{в}} + \frac{Щ}{\rho_{щ}} \right) \right] \cdot \rho_{п}. \quad (2.19)$$

По окончании расчета записывают необходимое количество материалов на 1 м<sup>3</sup> бетонной смеси, и просуммировав, получают расчетную среднюю плотность бетонной смеси:

Цемент = Ц, кг.

Песок = П, кг.

Щебень = Щ, кг.

Вода = В, кг.

Расчетная средняя плотность бетонной смеси =  $\rho_{\text{б.см}}^p$ , кг/м<sup>3</sup>.

#### 2.4.2. Приготовление и испытание бетонной смеси

Проверка расчетного состава бетона производится опытным путем, для чего изготавливается пробный замес в лаборатории объемом 7 л.

Потребное количество материалов на пробный замес рассчитывают по формулам:

$$Ц_{\text{пр}} = \frac{Ц \cdot 7}{1000}; \quad В_{\text{пр}} = \frac{В \cdot 7}{1000}; \quad Щ_{\text{пр}} = \frac{Щ \cdot 7}{1000}; \quad П_{\text{пр}} = \frac{П \cdot 7}{1000}, \quad (2.20)$$

где  $Ц_{\text{пр}}$ ,  $В_{\text{пр}}$ ,  $Щ_{\text{пр}}$ ,  $П_{\text{пр}}$  – количество материалов на пробный замес объемом 7 л;

Ц, В, Щ, П – расчетное количество материалов на 1 м<sup>3</sup> бетонной смеси.

Результаты заносят в таблицу (табл. 2.13).

Таблица 2.13

*Расход материалов на пробный замес*

Материалы	Расчетный состав, кг		Требуемая удобоукладываемость	1 корректировка		Фактическая удобоукладываемость	Уточненный расход материалов на 1 м <sup>3</sup> бетона
	на 1 м <sup>3</sup>	на пробный замес		добавлено материалов	количество материалов после добавления		
Цемент							
Вода							
Щебень							
Песок							
ИТОГО:							

#### Приготовление бетонной смеси

Приготовление бетонной смеси производится в следующей последовательности: в смоченный водой металлический противень помещают отвешенное количество песка, затем добавляют требуемое количество цемента и смесь перемешивают до получения однородного цвета, затем добавляют крупный заполнитель, и вся смесь перемешивается до тех

пор, пока крупный заполнитель не будет равномерно распределен в сухой смеси. Для добавления воды в середине смеси делается углубление, куда заливают примерно половину объема воды. Осторожно перемешав, бетонную смесь собирают в кучу и добавляют остальную воду. Затем бетонная смесь подвергается окончательному перемешиванию до однородности.

### Определение удобоукладываемости бетонной смеси

Для экспериментальной проверки состава бетона после приготовления бетонной смеси определяют ее удобоукладываемость. Вследствие особенностей свойств применяемого цемента и местного заполнителя осадка конуса или жесткость бетонной смеси может отличаться от заданной.

*Подвижность бетонной смеси* с зернами заполнителя наибольшей крупности до 40 мм определяют на стандартном конусе (рис. 2.6). Если наибольшая крупность свыше 40 мм, следует использовать увеличенный конус. Размер используемого конуса принимают по табл. 2.14.

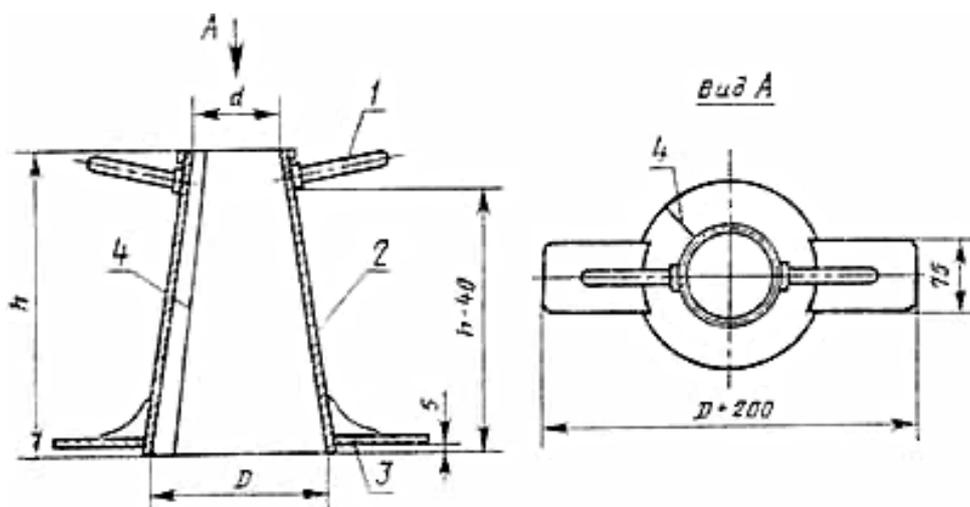


Рис. 2.6. Конус для определения подвижности бетонной смеси:  
1 – ручка; 2 – конус; 3 – упоры; 4 – сварной шов

Таблица 2.14

### Размер конуса для определения удобоукладываемости

Наименование конуса	Внутренний размер конуса, мм		
	$d$	$D$	$h$
Нормальный	$100 \pm 2$	$200 \pm 2$	$300 \pm 2$
Увеличенный	$150 \pm 2$	$300 \pm 2$	$450 \pm 2$
Конус для определения жесткости по методу Скрамтаева	$100 \pm 2$	$194 \pm 2$	$300 \pm 2$

Измерение осадки конуса бетонной смеси показано на рис. 2.7.

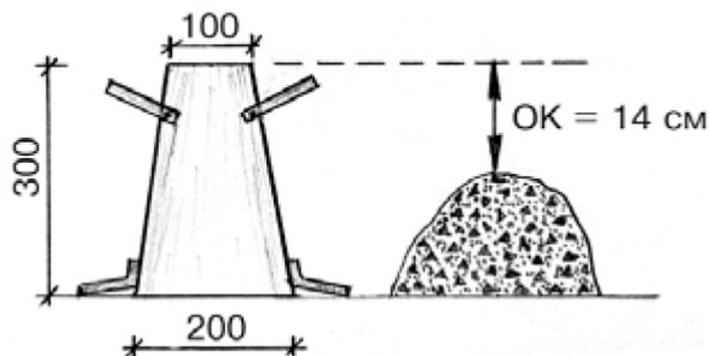


Рис. 2.7. Пример измерения осадки конуса бетонной смеси

Определение осадки конуса бетонной смеси выполняют в следующей последовательности. Конус, предварительно очищенный от схватившегося бетона и протертый влажной тканью, устанавливают на поддон или любую плоскую горизонтальную поверхность, не впитывающую влагу. Затем через воронку (насадку) конус заполняют тремя равными по высоте слоями бетонной смеси. Каждый слой штыкуют 25 раз металлическим стержнем диаметром 16 мм и длиной 600 мм с округленными концами. Во время штыкования бетонной смеси конус должен быть прижат к основанию.

После укладки и штыкования последнего слоя воронку снимают и избыток бетонной смеси срезают кельмой вровень с краями конуса. Затем конус строго вертикально снимают и осторожно ставят рядом с осевшим конусом из бетонной смеси. С помощью двух линеек измеряют расстояние между верхним основанием формы и серединой верхнего основания конуса из бетонной смеси (рис. 2.7). В тех случаях, когда после снятия конуса бетонная смесь сильно деформируется (разливается) и приобретает форму, затрудняющую определение ее осадки, измерение не выполняют и повторяют испытания. Осадка конуса вычисляется с округлением до 1,0 см как среднее арифметическое двух определений из одной пробы, отличающихся между собой не более чем на 1 см при  $OK \leq 9$  см; на 2 см при  $OK = 10 \dots 15$  см; на 3 см при  $OK \geq 16$  см. При большем расхождении результатов определение повторяют на новой пробе.

Для бетонных смесей с марками по удобоукладываемости ПЗ–П4 расплыв конуса РК оценивают по нижнему диаметру лепешки (см), образовавшейся в результате расплыва бетонной смеси.

Расплыв конуса РК определяют измерением металлической линейкой диаметра расплывшейся лепешки в двух взаимно перпендикулярных направлениях с погрешностью не более 0,5 см.

*Жесткость бетонной смеси.* Согласно ГОСТ 10181-2000 [37] в зависимости от марки бетонной смеси по удобоукладываемости по ГОСТ 7473 применяют следующие методы определения жесткости:

- на установке типа Вебе (рис. 2.8) – смесей марок Ж1-4 и СЖ1-3;
- по методу Красного – смесей марок Ж1-4;
- по методу Скрамтаева – смесей марок Ж1-4.

Установка типа Вебе состоит из цилиндра 1, конуса 2, кольца держателя с ручками 3, загрузочной воронки 4, штатива 5, а также диска с шестью отверстиями 8, шайбы 9, штанги 10.

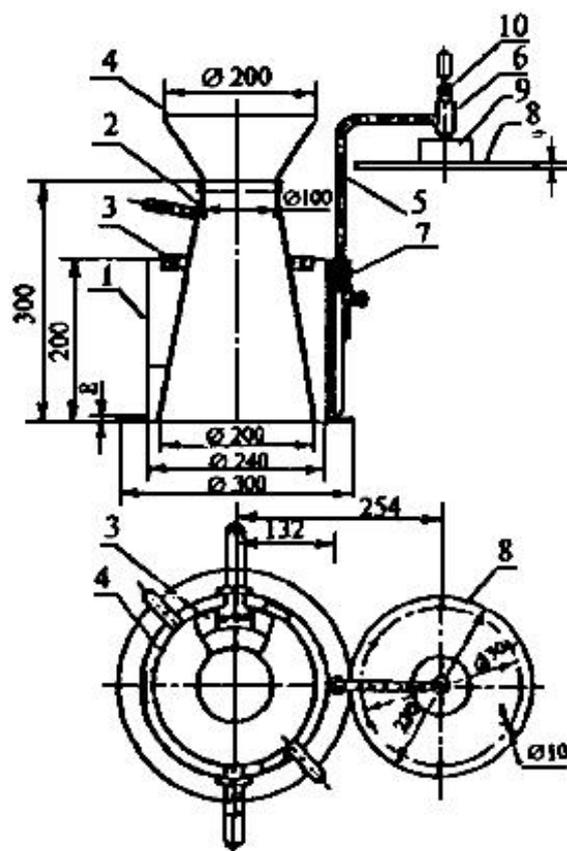


Рис. 2.8. Установка типа Вебе:

1 – цилиндр с фланцем в основании; 2 – конус; 3 – колюдержатель с ручками; 4 – загрузочная воронка; 5 – штатив; 6 – направляющая втулка; 7 – фиксирующая втулка; 8 – диск с шестью отверстиями; 9 – стальная шайба; 10 – штанга

Общая масса диска, штанги и шайбы прибора должна составлять при испытании смесей марок Ж1–Ж4  $2750 \pm 50$  г, а при испытании смесей марок СЖ1–СЖ3  $13000 \pm 50$  г. Перед испытанием кольцо и конус должны быть очищены от схватившегося бетона и протерты влажной тканью.

Прибор устанавливают на виброплощадке и жестко закрепляют цилиндрическое кольцо 1, в которое вставляют конус 2 с воронкой 4.

Конус заполняют бетонной смесью в три слоя с послойным штыкованием аналогично определению осадки конуса. Затем осторожно снимают конус, поворотом штатива 5 диск 8 устанавливают над отформованным конусом бетонной смеси и плавно опускают его на поверхность конуса. Зажимным винтом закрепляют штатив в фиксирующей втулке 7, после чего одновременно включают виброплощадку и секундомер. Вибрирование производят до тех пор, пока не начнется выделение цементного теста из двух любых отверстий дисков. В этот момент выключают секундомер и вибратор. Полученное время характеризует жесткость бетонной смеси. Жесткость бетонной смеси вычисляют как среднее арифметическое двух определений, не отличающихся более чем на 20 %.

Жесткость бетонной смеси по методу Скрамтаева определяют в форме ФК-200 по ГОСТ 22685 с помощью конуса размерами, приведенными в табл. 2.14.

В закрепленную на виброплощадке форму помещают конус Скрамтаева и заполняют его бетонной смесью в три слоя с послойным штыкованием аналогично определению осадки конуса. Затем конус осторожно снимают и включают одновременно виброплощадку и секундомер. Вибрирование осуществляется до тех пор, пока поверхность бетонной смеси не станет горизонтальной. Время (с), необходимое для выравнивания поверхности бетонной смеси в форме, характеризует жесткость смеси. Переходной коэффициент от метода Скрамтаева к методу определения жесткости на установке Вебе принимают равным 0,7. Результаты, полученные после проверки удобоукладываемости, заносят в табл. 2.13.

В случае, когда бетонная смесь получилась менее подвижной, чем требуется, увеличивают количество цемента порциями по 10 % первоначального и добавляют соответствующее Ц/В-отношению количество воды. Если же удобоукладываемость будет больше требуемой, добавляют небольшими порциями песок и крупный заполнитель, сохраняя отношение их постоянным.

#### **Определение фактической средней плотности бетонной смеси**

Среднюю плотность бетонной смеси, характеризуемую отношением массы бетонной смеси к ее объему, определяют в цилиндрическом мерном сосуде емкостью 1, 5 или 10 л в зависимости от максимальной крупности заполнителя соответственно 20, 40 и 70 мм.

В предварительно взвешенный сосуд загружают бетонную смесь и тщательно уплотняют вибрированием до появления на ее поверхности цементного молока. После уплотнения избыток смеси срезают стальной линейкой и поверхность тщательно выравнивают вровень с краями мерного сосуда. Затем сосуд с бетонной смесью взвешивают и плотность бетонной смеси вычисляют по формуле:

$$\rho_{\text{б.см}}^{\text{ф}} = \frac{m - m_1}{V}, \quad (2.21)$$

где  $m$  – масса мерного сосуда с бетонной смесью, кг;  $m_1$  – масса мерного сосуда без смеси, кг;  $V$  – объем мерного сосуда, м<sup>3</sup>.

Плотность бетонной смеси определяют дважды для каждой смеси и вычисляют с округлением до 10 кг/м<sup>3</sup> как среднее арифметическое определений, отличающихся между собой не более чем на 5 %. Результаты испытаний заносим в табл. 2.15.

Таблица 2.15

*Определение плотности бетонной смеси*

Номер опыта	Масса пустого цилиндра, кг	Масса цилиндра с уплотненной бетонной смесью, кг	Объем цилиндра, м <sup>3</sup>	Плотность бетонной смеси, кг/м <sup>3</sup>	Среднее значение плотности смеси, кг/м <sup>3</sup>

### 2.4.3. Корректировка состава бетонной смеси и изготовление образцов

#### Определение фактического расхода материалов на 1 м<sup>3</sup> бетона

Определяют фактический объем бетонной смеси в пробном замесе по формуле:

$$V_{\text{факт}} = \frac{\sum m}{\rho_{\text{б.см}}^{\text{ф}}}, \quad (2.22)$$

где  $\sum m$  – сумма масс материалов, израсходованных на пробный замес, кг;  $\rho_{\text{б.см}}^{\text{ф}}$  – фактическая плотность бетонной смеси, кг/м<sup>3</sup>.

Зная объем полученной бетонной смеси и расход материалов на пробный замес, определяют фактический расход материалов на 1 м<sup>3</sup> бетона по формулам:

$$Ц_{\text{ф}} = \frac{Ц_{\text{пр}}}{V_{\text{факт}}} 1000; \quad Щ_{\text{ф}} = \frac{Щ_{\text{пр}}}{V_{\text{факт}}} 1000; \quad П_{\text{ф}} = \frac{П_{\text{пр}}}{V_{\text{факт}}} 1000; \quad В_{\text{ф}} = \frac{В_{\text{пр}}}{V_{\text{факт}}} 1000, \quad (2.23)$$

где  $Ц_{\text{пр}}$ ,  $Щ_{\text{пр}}$ ,  $В_{\text{пр}}$ ,  $П_{\text{пр}}$  – расход цемента, песка, щебня и воды на пробный замес, кг;  $V_{\text{факт}}$  – фактический объем бетонной смеси, л.

#### Изготовление и хранение образцов

Из откорректированной бетонной смеси готовят контрольные образцы и затем их испытывают. Образцы формируют в металлических разъемных формах.

При уплотнении бетонной смеси вибрированием форму заполняют с некоторым избытком, после чего ее вибрируют на лабораторной виброплощадке (частота колебаний – 50 Гц, амплитуда колебаний вибратора – 0,5 мм). Продолжительность вибрирования для бетонных смесей жесткостью менее 200 с – до появления на ее поверхности тонкого слоя цементного теста. Для бетонных смесей жесткостью более 200 с уплотнение осуществляют вибрированием в течение 30...60 с с пригрузом, обеспечивающим давление не менее  $4 \cdot 10^3$  Па [19]. Избыток смеси срезают и заглаживают поверхность образца кельмой. Образцы маркируют.

Изготовленные образцы накрывают влажной тканью и хранят в формах в помещении с температурой воздуха  $20 \pm 2$  °С в течение суток, после чего их освобождают из форм и помещают в камеру нормального твердения, где хранят до испытания при температуре  $20 \pm 2$  °С и с относительной влажностью воздуха не менее 90 %.

#### 2.4.4. Испытание образцов и проверка марки запроектованного бетона

Перед испытанием образцы подвергают осмотру, измерению и взвешивают. При осмотре необходимо определить рабочие грани, которые выбирают так, чтобы сжимающая сила при испытании была направлена параллельно слоям укладки бетонной смеси.

##### Определение плотности бетона

Определяют плотность бетона в образцах по формуле:

$$\rho_b = \frac{m}{V}, \quad (2.24)$$

где  $\rho_b$  – плотность бетона, кг/м<sup>3</sup>;  $m$  – масса бетонного образца, кг;  $V$  – объем бетонного образца, м<sup>3</sup>.

Результаты испытаний заносят в табл. 2.16.

Таблица 2.16

*Результаты определения средней плотности бетона*

Номер образца	Размеры, м			Объем образца, м <sup>3</sup>	Масса образца, кг	Средняя плотность бетона, кг/м <sup>3</sup>	Среднее арифметическое значение средней плотности бетона, кг/м <sup>3</sup>
	длина	ширина	высота				

##### Определение предела прочности при сжатии

Для испытания образцы-кубы устанавливают выбранными рабочими гранями на опорную плиту прессы и центрируют. Нагрузка на образец при

испытании должна возрастать равномерно со скоростью 0,06...0,1 кН/с (6...10 кгс/с).

Прочность бетона при сжатии  $R_{сж}$  вычисляют для каждого образца по формуле, МПа (кгс/см<sup>2</sup>):

$$R_{сж} = \frac{P}{F}, \quad (2.25)$$

где  $P$  – разрушающая нагрузка, Н (кгс) – показание манометра прессы;  $F$  – площадь сечения образца (м<sup>2</sup>, см<sup>2</sup>).

Прочность бетона на сжатие вычисляется с точностью до 0,1 МПа как среднее арифметическое значение испытания трех образцов данной серии. Результаты не должны отклоняться более чем на 15 %, иначе наименьший результат отбрасывают.

Переводные коэффициенты для приведения предела прочности образцов кубов с длиной ребер 70,7; 100; 200; 300 мм к прочности базовых образцов-кубов с ребром 150 мм приведены в табл. 2.17.

Таблица 2.17

*Значения масштабных переводных коэффициентов*

Размер образцов, мм	Значения коэффициента
70,7 × 70,7 × 70,7	0,85
100 × 100 × 100	0,95
150 × 150 × 150	1,0
200 × 200 × 200	1,05
300 × 300 × 300	1,10

Результаты определения предела прочности при сжатии образцов бетона приведены в табл. 2.18.

Таблица 2.18

*Результаты испытания образцов бетона на прочность при сжатии*

№ образца	Размеры образца, см		Площадь поперечного сечения, см <sup>2</sup>	Разрушающая нагрузка, Н (кгс/см <sup>2</sup> )	Предел прочности при сжатии, МПа		Предел прочности с учетом коэффициента, МПа
	длина	ширина			отдельный образец	средний	

По пределу прочности при сжатии с учетом переводного коэффициента устанавливают марку бетона и делают вывод о ее соответствии требуемой.

### 2.4.5. Определение номинального (лабораторного) и полевого (производственного) состава бетона

Номинальный состав можно выразить по массе. Он получается делением массы составляющих материалов на массу цемента:

$$\frac{\text{Ц}}{\text{Ц}} : \frac{\text{П}}{\text{Ц}} : \frac{\text{Щ}}{\text{Ц}} = 1 : \frac{\text{П}}{\text{Ц}} : \frac{\text{Щ}}{\text{Ц}}, \quad (2.26)$$

где Ц, П, Щ – расход материалов на 1 м<sup>3</sup> бетона, кг.

Этот состав можно выразить по объему:

$$\frac{V_{\text{ц}}}{V_{\text{ц}}} : \frac{V_{\text{п}}}{V_{\text{ц}}} : \frac{V_{\text{щ}}}{V_{\text{ц}}} = 1 : \frac{V_{\text{п}}}{V_{\text{ц}}} : \frac{V_{\text{щ}}}{V_{\text{ц}}}, \quad (2.26a)$$

где  $V_{\text{ц}}$ ,  $V_{\text{п}}$ ,  $V_{\text{щ}}$  – объем материалов, м<sup>3</sup>.

На производстве часто применяют при приготовлении влажные заполнители. Количество влаги, содержащейся в заполнителях, должно учитываться при определении действительного расхода воды. В этом случае определяют полевой состав бетона, который рассчитывают на основе лабораторного с учетом естественной влажности материалов (2.27).

$$\text{Ц}_{\text{пол}} = \text{Ц}_{\text{ф}}; \quad (2.27)$$

$$\text{П}_{\text{пол}} = \text{П}_{\text{ф}} + \text{П}_{\text{ф}} \frac{W_{\text{п}}}{100};$$

$$\text{Щ}_{\text{пол}} = \text{Щ}_{\text{ф}} + \text{Щ}_{\text{ф}} \frac{W_{\text{щ}}}{100};$$

$$V_{\text{пол}} = V_{\text{ф}} - \left( \text{П}_{\text{ф}} \frac{W_{\text{п}}}{100} + \text{Щ}_{\text{ф}} \frac{W_{\text{щ}}}{100} \right);$$

где  $\text{Ц}_{\text{пол}}$ ,  $\text{П}_{\text{пол}}$ ,  $\text{Щ}_{\text{пол}}$  – расход материалов на 1 м<sup>3</sup> бетонной смеси с учетом естественной влажности, кг;  $W_{\text{п}}$ ,  $W_{\text{щ}}$  – естественная влажность песка и щебня, %.

### 2.4.6. Определение коэффициента выхода бетона и расхода материалов на замес бетономешалки

При загрузке цемента и заполнителя в бетоносмеситель их первоначальный объем больше объема получаемой бетонной смеси, так как при перемешивании происходит как бы уплотнение массы: зерна цемента располагаются в пустотах между зернами песка, зерна песка – между зернами щебня. Для оценки объема получаемой бетонной смеси используют коэффициент выхода бетона  $\beta$ , определяемый по формуле:

$$\beta = \frac{1000}{V_{\text{ц}} + V_{\text{п}} + V_{\text{щ}}} = \frac{1000}{\frac{\text{Ц}}{\rho_{\text{ц}}^{\text{н}}} + \frac{\text{П}}{\rho_{\text{п}}^{\text{н}}} + \frac{\text{Щ}}{\rho_{\text{щ}}^{\text{н}}}}; \quad (2.28)$$

где  $V_{\text{ц}}$ ,  $V_{\text{п}}$ ,  $V_{\text{щ}}$  – расход соответственно цемента, песка, щебня, л/м<sup>3</sup> бетона;

$\text{Ц}$ ,  $\text{П}$ ,  $\text{Щ}$  – расход соответственно цемента, песка и щебня, кг/м<sup>3</sup> бетона;

$\rho_{\text{ц}}^{\text{н}}$ ,  $\rho_{\text{п}}^{\text{н}}$ ,  $\rho_{\text{щ}}^{\text{н}}$  – насыпные плотности соответственно цемента, песка, щебня, кг/м<sup>3</sup>.

Коэффициент выхода бетона зависит от состава бетона и свойств используемых материалов и колеблется в пределах 0,55...0,75.

При расчете материалов на один замес бетоносмесителя принимают, что сумма объемов цемента, песка, щебня (в рыхлом состоянии) соответствует емкости барабана бетоносмесителя. Тогда объем бетона  $V_3$ , м<sup>3</sup>, получаемый из одного замеса, составит

$$V_3 = \beta \cdot V_{\text{бс}}, \quad (2.29)$$

где  $V_{\text{бс}}$  – емкость бетоносмесителя, м<sup>3</sup>.

Расход материалов на замес бетоносмесителя определяют по формулам:

$$\text{Ц}_3 = \text{Ц} \cdot V_3; \quad \text{П}_3 = \text{П} \cdot V_3; \quad \text{Щ}_3 = \text{Щ} \cdot V_3; \quad \text{В}_3 = \text{В} \cdot V_3, \quad (2.30)$$

где  $\text{Ц}$ ,  $\text{П}$ ,  $\text{Щ}$ ,  $\text{В}$  – расход цемента, песка, щебня, воды на 1 м<sup>3</sup> бетонной смеси, кг;

$V_3$  – выход бетонной смеси из одного замеса бетоносмесителя, м<sup>3</sup>.

## **2.5. Контрольные вопросы по основам технологии тяжелого бетона**

1. Что называют бетоном и бетонной смесью?
2. Что подразумевают под термином «высококачественный бетон»?
3. Что называют удобоукладываемостью или формуемостью бетонной смеси?
4. Как определить подвижность и жесткость бетонной смеси, от чего они зависят?
5. Какие условия и закономерности положены в основу метода абсолютных объемов?
6. Чем отличается полевой состав бетонной смеси от лабораторного?
7. От чего зависит прочность бетона?
8. Что называют маркой и классом бетона по прочности?

### 3. ТЕХНОЛОГИЯ ЛЕГКОГО БЕТОНА

Легкими бетонами называют все виды бетонов, имеющие среднюю плотность в воздушно-сухом состоянии от 200 до 2000 кг/м<sup>3</sup> [38].

Главные требования, предъявляемые к легкому бетону: заданная средняя плотность, необходимая прочность к определенному сроку твердения и долговечность. Характерными особенностями легкого бетона являются его пониженные значения средней плотности и коэффициента теплопроводности.

Особой разновидностью легкого бетона являются ячеистый бетон, который получают из смеси вяжущего, воды и порообразователей. Он имеет равномерно распределенные поры размером до 3 мм, а его средняя плотность составляет 250...1200 кг/м<sup>3</sup>.

#### 3.1. Классификация легких бетонов

Легкие бетоны классифицируют по различным признакам: основному назначению, виду вяжущего, виду заполнителя, структуре и т. д. [38].

*По назначению* легкие бетоны подразделяют на два вида:

- конструкционные, включая конструкционно-теплоизоляционные;
- специальные, в том числе жаростойкие, химически стойкие, декоративно-теплоизоляционные и теплоизоляционные.

*По виду вяжущего.* Легкие бетоны могут быть изготовлены на основе цементных, известковых, шлаковых, гипсовых, полимерных и других видов вяжущих веществ. В общем случае разделение следующее:

- на минеральном вяжущем – цементные бетоны (бетоны с использованием портландцемента, пуццоланового цемента, шлакопортландцемента, известково-шлакового, глиноземистого, быстротвердеющего и других видов цементов); силикатные бетоны – легкие бетоны автоклавного твердения на известковом вяжущем; гипсовые бетоны; бетоны на жидком стекле; на обжиговой связке – керамзитобетон, стеклобетон и т. п.

- на органических вяжущих – полимербетон.

*По виду пористого заполнителя* выделяют следующие виды легких бетонов: керамзитобетон, шунгзитобетон, аглопоритобетон, шлакопемзобетон, перлитобетон, бетон на щебне из пористых горных пород, вермикулитобетон, шлакобетон (бетон на топливном или пористом металлургическом шлаке), бетоны на аглопоритовом или зольном гравии. Природные пористые заполнители: дробленые пемза, вулканический туф или лава, известняк-ракушечник и др. Наиболее эффективны пемза

и вулканические туфы, имеющие высокую замкнутую пористость, характеризующиеся небольшим водопоглощением. Применение их эффективно, когда они являются местными материалами.

Искусственными заполнителями служат отходы промышленности (шлаки металлургические и топливные, шлаки химических производств, а также зола) и специальной переработки природных каменных материалов (вспученные при обжиге глины керамзит и аглопорит, вспученные перлит и вермикулит, шлаковая пемза, гранулированные шлаки, зольный гравий и пр.).

*По структуре* имеются следующие основные виды [38]:

1. Обыкновенные легкие бетоны, изготавливаемые из вяжущего вещества, воды, мелкого и крупного заполнителей при полном заполнении раствором пустот между зернами крупного заполнителя.

2. Крупнопористые (беспесчаные) легкие бетоны, в которых зерна крупного заполнителя покрыты тонким слоем цементного теста, а межзерновые пустоты остаются свободными.

3. Поризованные легкие бетоны на основе вяжущего вещества и порообразователя. С помощью порообразователя в структуре бетона возникают воздушные ячейки. Это повышает пористость цементного раствора и тем самым снижает плотность бетона.

*По области применения* в строительстве различают легкие бетоны:

- теплоизоляционные, определяющими свойствами которых являются плотность и теплопроводность. Средняя плотность в высушенном состоянии – менее  $500 \text{ кг/м}^3$ , прочность М15 и М25, коэффициент теплопроводности  $\lambda$  – до  $0,14 \text{ Вт/(м} \cdot \text{°C)}$ ;

- конструкционно-теплоизоляционные, используемые в основном для изготовления наружных стеновых ограждений. Средняя плотность –  $500 \dots 800 \text{ кг/м}^3$ , прочность – не менее М35, коэффициент теплопроводности  $\lambda = 0,14 \dots 0,54 \text{ Вт/(м} \cdot \text{°C)}$ ;

- конструкционные, в которых решающее значение имеют прочность и стойкость. Средняя плотность –  $1400 \dots 1800 \text{ кг/м}^3$ , прочность – не менее М50 и морозостойкость – не менее Мрз15. Значение теплопроводности для таких бетонов не нормируется.

Основными свойствами легких бетонов на пористых заполнителях являются плотность, теплопроводность, прочность и морозостойкость. Для того чтобы получить легкий бетон с заданными свойствами, необходимо не только выбрать исходные составляющие материалы, но и правильно подобрать состав бетона.

*Средняя плотность бетона* зависит главным образом от насыпной плотности и зернового состава заполнителя, расхода вяжущего и воды [38].

Плотность легкого бетона с увеличением расхода вяжущего возрастает. Поэтому для снижения плотности бетона необходимо за счет подбора оптимального зернового состава заполнителей добиваться наименьшего расхода вяжущего или образования в цементном камне мелких замкнутых пор. Так называемые поризованные легкие бетоны целесообразно готовить при наличии утяжеленных пористых заполнителей насыпной плотностью более  $600 \text{ кг/м}^3$ .

*Теплопроводность* легких бетонов колеблется в широких пределах – от 0,07 до 0,7 Вт/(м · °С). С увеличением плотности теплопроводность бетона повышается. Теплоизоляционные легкие бетоны теплопроводностью менее 0,2 Вт/(м · °С) получают при применении очень легких заполнителей, например, вспученного перлита.

*Прочность.* Чем больше в объеме бетона прочного цементного камня, тем выше прочность бетона. Однако при увеличении содержания цемента плотность бетона возрастает, а вместе с тем повышается его теплопроводность, что нежелательно.

*Морозостойкость* легкого бетона зависит от вида и количества израсходованного вяжущего, а также от морозостойкости заполнителя. Бетоны на портландцементе обладают более высокой морозостойкостью, которая возрастает с увеличением количества цемента. Морозостойкие легкие заполнители (пемза, керамзит, аглопорит) позволяют получать бетон морозостойкостью МРЗ 25–100.

### **3.2. Технология ячеистого бетона**

*Ячеистый бетон* – это искусственный камневидный пористый материал с характерной равномерно распределенной мелкодисперсной ячеистой структурой, получаемой в результате поризации и затвердевания рационально подобранной, тщательно перемешанной растворной смеси, состоящей из вяжущего, кремнеземистого компонента, порообразователя, воды и химических добавок.

Пористость ячеистым бетонам придается:

- механическим путем, когда тесто, состоящее из вяжущего и воды, часто с добавкой мелкого песка, смешивают с отдельно приготовленной пеной или вводят пенообразователь непосредственно в специальный смеситель; при отвердевании получается пористый материал – пенобетон;
- химическим путем, когда в вяжущее вводят специальные газообразующие добавки; в результате в тесте вяжущего вещества происходит реакция газообразования, оно вспучивается и становится пористым. Затвердевший материал называют газобетоном.

По структуре, свойствам и способам получения изделия из ячеистых бетонов превосходят традиционные материалы, а по эксплуатационным свойствам являются универсальными, они нашли широкое применение при возведении ограждающих конструкций жилых и промышленных зданий.

Структура ячеистых бетонов представлена плотными *межпоровыми перегородками* многофазного состава и *поровым пространством*, характеризующимся количеством и качеством (форма, размеры пор, их распределение) макро- и микропор, их соотношением. Поровое пространство ячеистых бетонов преимущественно состоит из пор сферической формы с размерами, изменяющимися от 0,05 до 3 мм. Главной особенностью структуры и свойств ячеистых бетонов является их высокая общая пористость (от 20 до 98 %). Значения основных показателей качества ячеистых бетонов по прочности, плотности и пористости материала взаимно связаны, чем больше пористость, тем меньше плотность материала и его прочность, поэтому строительно-эксплуатационные свойства этих материалов рассматриваются в функциональной зависимости от их плотности и пористости.

*Классификация ячеистых бетонов* осуществляется по следующим основным признакам: функциональному назначению изделий, способу поризации ячеистобетонных масс, виду вяжущего вещества и кремнеземистого заполнителя, способу твердения.

#### *1. По функциональному назначению.*

Выделяют четыре вида ячеистого бетона: теплоизоляционный – средняя плотность до  $500 \text{ кг/м}^3$  ( $P_{\text{общ}} = 82 \dots 92 \%$ ); теплоизоляционно-конструкционный – средняя плотность  $500 \dots 900 \text{ кг/м}^3$  ( $P_{\text{общ}} = 82 \dots 66 \%$ ); конструкционный бетон для конструктивных элементов жилых и сельскохозяйственных зданий – средняя плотность  $1000 \dots 1400 \text{ кг/м}^3$  ( $P_{\text{общ}} = 62 \dots 47 \%$ ); жаростойкий (бетон для теплоизоляции и ограждающих конструкций промышленных печей) со средней плотностью от  $800$  до  $1200 \text{ кг/м}^3$  и температурой применения до  $800 \text{ }^\circ\text{C}$ .

#### *2. По способу порообразования.*

Принципиально разделяют три способа создания пористой структуры ячеистого бетона: газообразование (газобетоны, газосиликаты и т. д.), пенообразование (пенобетоны, пеносиликаты и т. д.), аэрирование (аэрированный ячеистый бетон, аэрированный ячеистый силикат и т. д.), при этом пена отдельно не готовится, а воздух вовлекается непосредственно в массу, содержащую воздухововлекающие ПАВ.

Кроме того, известны и применяются разновидности этих способов и их совокупные комбинации. К таким способам Горлов Ю.П. [39] относит вспучивание газообразованием в вакууме (небольшое разреже-

ние), аэрирование массы под давлением (барбатирование ее сжатым воздухом) с последующим снижением давления до атмосферного (баротермальный способ).

В БТИСМе разработана новая вибровакуумная технология поризованных легких бетонов. Данная технология позволяет вспучивать очень вязкие композиции, в том числе без введения в них традиционных порообразователей, и получать неавтоклавный материал с высокими физико-механическими показателями [40].

Описанные выше способы и технические средства создания пористой структуры материала влекут за собой повышенный расход материальных средств, и, кроме того, пенообразователи для пенной поризации ячеистобетонной смеси являются весьма дорогостоящими и небезопасными с экологической точки зрения.

Поэтому наиболее распространенным способом поризации смеси является способ газообразования. Сущность этого способа состоит в выделении газообразных продуктов во всем объеме поризуемого материала, находящегося в пластично-вязком состоянии. Газообразование имеет ряд разновидностей, различающихся по следующим признакам: химизму процесса газообразования; виду газообразователя; температуре газообразования и вспучивания массы.

По химизму газообразование подразделяют на два способа: первый основан на выделении газа при взаимодействии газообразователя с компонентами вспучиваемой массы (газообразователи – алюминиевая пудра, карбонаты, кислоты и др.); второй – на выделении газа из газообразователя без его взаимодействия с поризуемой массой (газообразователи – пероксид водорода, порофоры, углеродсодержащие вещества).

В основном при производстве газобетонных изделий вспучивание смеси осуществляется за счет применения алюминиевой пудры ПАП-1 (ПАП-2) (ГОСТ 5494-71Е) [42]. Процесс порообразования регулируют, изменяя расход пудры и назначая соответствующие температурные параметры смеси. Этого, однако, недостаточно для создания качественной поровой структуры материала и бездефектных межпоровых перегородок. Существуют разнообразные способы активации газообразователей, в частности алюминиевой пудры, и примеры применения различных добавок для этой цели.

Горяиновым К.Э., Агафоновой Л.А. и Липатовым П.Е. [41] проведены производственные эксперименты по освоению новых составов ячеистого бетона с использованием комплексного порообразователя на основе алюминиевой пудры и тонкодисперсного угля ( $S = 9600 \text{ см}^2/\text{г}$ ). В ячеистобетонной массе, содержащей алюминиевую пудру и тонкодисперсный каменный уголь, образуется множество гальванических пар

микроэлементов. Частицы алюминия являются микрокатодом, а углеродсодержащие частицы – микроанодом. В результате возникновения электродвижущих сил (ЭДС) происходит увеличение глубины реакции между алюминиевой пудрой и гидроксидом кальция.

В соответствии с традиционной технологией газобетонная смесь приготавливается с температурой 35...45 °С, в противном случае не обеспечивается необходимая интенсивность выделения газа, и, следовательно, не достигается заданная плотность газобетонного изделия.

Ко всем газообразователям предъявляются определенные требования: обеспечивать плавное течение процесса газовыделения с получением нетоксичных и не вызывающих коррозию продуктов; выделять большой объем газа, т. е. характеризоваться большим газовым числом; быть доступным, иметь невысокую стоимость, обладать устойчивостью свойств при хранении и транспортировании. В полной мере всем перечисленным требованиям отвечает широко применяемая алюминиевая пудра, чего нельзя сказать об описанных выше газообразователях.

### *3. По виду вяжущего вещества.*

В технологии ячеистых бетонов в качестве вяжущего используют в основном цементы (газобетон, пенобетон) и известь (газосиликат, пеносиликат) и реже – гипс. Кроме традиционных вяжущих в технологии газобетонных изделий, как автоклавного, так и неавтоклавного способа обработки, в качестве компонентов вяжущего применяют такие материалы, как отходы промышленности и некоторые горные породы (в основном природные и искусственные стекла), содержащие оксиды кальция, магния, алюминия, железа и кремния. Наиболее широко из этой группы материалов применяют металлургические шлаки, отходы глиноземистого производства, стеклобой, перлиты.

В связи с удорожанием портландцемента, который используется как основной компонент вяжущего при производстве ячеистого бетона, разрабатываются составы малоклинкерных и бесклинкерных цементов марок 400-500.

Для изготовления неавтоклавного газобетона широко применяют вяжущие, в составе которых находятся различные шлаки, золы и другие отходы промышленности. При этом портландцемент вводится в небольшом количестве или отсутствует. Применение же только цемента для получения газобетона неавтоклавного твердения в сочетании с необходимыми добавками дает возможность практически полностью использовать его химическую энергию при создании прочности изделий.

### *4. По виду кремнеземистого компонента.*

Наиболее широко при производстве ячеистых бетонов применяют кварцевый песок, при этом предпочтение отдается пескам, содержащим

не менее 90 % кремнезема. При подготовке сырьевых компонентов природный кварцевый песок подвергается помолу до удельной поверхности 2700...3000 см<sup>2</sup>/г. В некоторых технологических процессах производства газобетона эта стадия отсутствует. Дисперсность кремнеземистого компонента в составе газобетонной смеси существенно влияет на вспучивающуюся способность данной смеси. Так, при использовании высокодисперсного кремнеземистого сырья структура газобетонных изделий получается более равномерной. Кроме того, при автоклавном способе производства газобетона тонкий помол или высокая дисперсность кварцевого песка, который в основном входит в состав смешанного вяжущего, является необходимым условием. Исключить стадию дополнительного измельчения кварцевого песка можно при использовании для производства газобетона (газосиликата) барханных песков, которые имеют достаточное количество мелких фракций: 0,25...0,05 мм – 84,79 %.

#### *5. По способу твердения.*

Ячеистые бетоны делят на два основных класса: неавтоклавные (или безавтоклавные), тепловлажностную обработку которых производят пропариванием, электропрогревом или другими методами нагрева при нормальном давлении, и автоклавные, которые твердеют при повышенных давлении и температуре в среде насыщенного водяного пара. Возможно также совмещение разных способов твердения. Так, например, двухстадийная тепловлажностная обработка ячеистого бетона, включающая обработку в пропарочной камере при температуре 90 °С в течение 3 ч, распалубку и последующую автоклавную обработку изделий без бортоснастки. При таком способе твердения материал характеризуется наиболее высокими показателями прочности. Объясняется это, прежде всего, высоким качеством структуры цементирующего вещества, обусловленной лучшими условиями гидратации, зародышеобразования и роста кристаллов.

### **3.2.1. Основные свойства ячеистого бетона**

Требованиями стандарта на ячеистые бетоны (ГОСТ 25485-89 «Бетоны ячеистые». Технические требования) в качестве основных физико-механических свойств определены: средняя плотность, класс прочности, морозостойкость, усадка при высыхании, а физико-технических – сорбционная влажность и коэффициенты теплопроводности и паропроницаемости.

*Плотность.* В соответствии с ГОСТ 25485-89 «Бетоны ячеистые» [43] ячеистые бетоны могут иметь объемную плотность от 200 до 1200 кг/м<sup>3</sup>

и подразделяются на *теплоизоляционные* плотностью 300...500 кг/м<sup>3</sup>, *теплоизоляционно-конструкционные* плотностью 500...900 кг/м<sup>3</sup> и *конструкционные* плотностью 1000...1200 кг/м<sup>3</sup>. От плотности любого поризованного материала зависят все его показатели, включая прочность, теплопроводность, усадку и др. Снижение плотности в два раза приводит к восьмикратному падению прочности. Отклонения от заданной плотности являются браком в изделии.

Одна из важнейших проблем, возникающих в технологии ячеистых бетонов, связана с формированием ячеистых структур пониженной плотности (менее 300 кг/м<sup>3</sup>) и допустимой прочности. В таких бетонах 90...98 % объема занимают газовые и капиллярные поры, поэтому межпоровый скелет должен быть плотным и прочным. Поризация ячеистых масс пониженной плотности эффективно осуществляется по газопенной технологии, которая включает аэрацию песчаного шлама, ячеистобетонной массы и ее поризацию газообразованием. Основные технологические приемы получения ячеистых бетонов низкой плотности – высокое В/Т-отношение, быстрое вспучивание массы за 6...12 мин, беспечение эластичности стенок пор, стабилизация массива за счет ускорения схватывания вяжущего и нарастания его структурной прочности, формирование мелкопористой структуры (размеры пор менее 0,8...0,5 мм, как наименее деформируемые).

*Прочность* является фундаментальной энергетической основой бетонов, критерием их образования и существования, обеспечивает целостность их структуры, определяет способность материала сопротивляться разрушению от воздействия различных факторов и закономерности их разрушения. Прочностные характеристики ячеистых бетонов по ГОСТ 25485-89 «Бетоны ячеистые» [43] и требованиям СТ СЭВ 1406 [43] характеризуются классом прочности, который изменяется от В0,5 до В15. Наиболее значимым фактором, определяющим прочность изделия, является *толщина межпоровой перегородки и ее прочность*. Увеличение прочности межпоровых перегородок обеспечивается при увеличении активности вяжущего, введении высокодисперсных добавок. Водоредуцирование – снижение В/Т – считается неэффективным приемом, так как приводит к уменьшению объема цементного теста, толщины перегородок и прочности изделия. При однородном распределении ячеек поровой структуры по размерам абсолютная величина диаметра пор не является значимым фактором прочности, более важным представляется *соотношение между толщиной межпоровой перегородки и диаметром пор*.

*Стойкость ячеистых бетонов к воздействиям внешних сред*. Сопротивляемость бетона любому разрушению обеспечивается его проч-

ностью, и чем выше прочность изделия в момент начала воздействия мороза, агрессивных сред, атмосферы и др., тем эффективнее оно сопротивляется разрушению.

*Морозостойкость* – эксплуатационная характеристика ячеистого бетона и определяет его долговечность. С уменьшением В/Т-отношения ячеистых масс прочность, морозостойкость и коррозионная стойкость изделий увеличивается. В капиллярах диаметром  $d = 1,57$  мм вода замерзает в лед при минус  $6,4$  °С,  $d = 0,15$  мм – минус  $14,6$  °С,  $d = 0,06$  мм – минус  $18$  °С, а  $d = 0,03$  мм при минус  $21$  °С, т. е. чем меньше капиллярные поры, тем выше морозостойкость. Введением высокодисперсных наполнителей можно также повысить морозостойкость изделий. Марки ячеистого бетона по морозостойкости по ГОСТ 25485-89 «Ячеистые бетоны» – F15; F25; F35; F50; F75; F100 [43].

*Коррозионная стойкость* ячеистых бетонов требует изучения новых способов их защиты. При воздействии сульфатных сред в ячеистых бетонах образуются соединения системы этtringит – таумасит, характеризующиеся высокой неравномерностью изменения объема при попеременном высушивании и увлажнения изделия. Карбонизация гидратных образований вяжущего – один из видов коррозии, через 1–2 года эксплуатации плотность ячеистых изделий увеличивается с  $365$  до  $425$  кг/м<sup>3</sup>, а прочность снижается от  $1,26$  до  $0,97$  МПа.

*Трещиностойкость*. Установлено, что чем дольше твердеет ячеистый бетон в естественных условиях (до 2 и более месяцев), тем меньше его усадка и трещинообразование. Основной причиной, вызывающей снижение трещиностойкости ячеистых бетонов, является образование большого объема капиллярных пор в межпоровых перегородках и уменьшение доли условно-закрытых пор.

*Огнестойкость*. Ячеистые бетоны – негорючие неорганические материалы – выдерживают воздействие открытого огня в течение 3...7 ч без разрушений.

*Жаростойкость*. При нагревании обычного ячеистого бетона до  $400$  °С прочность изделия увеличивается, а трещиностойкость падает, при воздействии температуры  $1000$  °С происходит полное разрушение структуры ячеистого бетона. Повышенной жаростойкостью характеризуются изделия, полученные на основе белитсодержащих вяжущих ( $800$  °С), основных зол и шлаков ( $600...700$  °С) и щелочного алюмосиликатного вяжущего ( $1000$  °С).

*Звукоизоляционные свойства*. Ячеистый бетон обладает высокой звукоизолирующей способностью. К примеру, звукоизолирующие свойства стен из ячеистого бетона плотностью  $400...500$  кг/м<sup>3</sup> характеризуются следующими показателями в зависимости от толщины:

при толщине стенки 100 мм – 35...37 дБ, 125 мм – 44...46 дБ, 150 мм – 55...57 дБ, 175 мм – 64...66 дБ, что значительно выше аналогичных показателей для ряда традиционно используемых материалов в современном строительстве.

*Усадка* (предельное отклонение номинальных размеров). Влажностная усадка ячеистых бетонов в условиях эксплуатации вызывается действием капиллярных сил и удалением физически и химически связанной воды. Ячеистые бетоны склонны к длительным самопроизвольным деформациям, происходящим под воздействием на бетон  $\text{CO}_2$ , попеременного высыхания и увлажнения, нагревания и охлаждения, что требует разработки специальных мер для их безопасной эксплуатации. Минимальная полная эксплуатационная усадка автоклавных изделий составляет 1,3 мм/м, неавтоклавных – до 3 мм/м, армирование ячеистых масс снижает усадочные явления.

*Водопоглощение* характеризует показатели открытой пористости изделий, и чем она выше, тем ниже их долговечность. При эксплуатации ячеистых бетонов рекомендуется защищать их поверхности от прямых воздействий окружающей среды и соблюдать влажностный режим эксплуатации, при котором влажность ячеистого материала не превышала бы величину сорбционной влажности  $6 \pm 2 \%$ . Снижение водопоглощения ячеистых бетонов является важной технологической задачей, т. к. каждый процент повышения влажности изделия увеличивает его теплопроводность на 6...8 %. Водопоглощение заметно снижается при их поверхностной или объемной гидрофобизации, так, введение 1 % битумной эмульсии снижает водопоглощение ячеистого изделия в 2–3 раза, максимальная прочность изделий получена при водопоглощении 30,2...33,2 % с объемом переходных пор в структуре ячеистого бетона 165...225 м/г.

*Воздухопроницаемость* ячеистых бетонов зависит от их плотности и макроструктуры – пористости. Установлено, что чем выше В/Т-отношение (при изменении от 0,52...0,58 до 0,62...0,65 воздухопроницаемость изменяется до  $4 \cdot 10^{-7} - 5,6 \cdot 10^{-7} - 8,5 \cdot 10^{-7} - 12,9 \cdot 10^{-7} \cdot \text{м}^3/\text{м} \cdot \text{с} \cdot \text{Па}$ ), тем крупнее поры и выше воздухопроницаемость. Регулировать воздухопроницаемость (уменьшить в 1,5 раза) рекомендуется использованием гидрофилизированной алюминиевой пудры.

*Теплотехнические характеристики* ячеистых бетонов высокие – при плотности бетона  $600 \text{ кг/м}^3$  толщина стены составляет 0,20...0,35 м, термическое сопротивление  $0,9...1,59 \text{ м}^2 \cdot \text{°C/Вт}$ , а коэффициент теплопроводности –  $0,2...0,6 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{°C}$ , эти показатели превышают теплотехнические свойства традиционных строительных материалов на 15...30 %. Теплотехнические свойства ячеистых бетонов зависят от вида кремне-

земистого заполнителя (кварцевый песок или зола-унос), заданной средней плотности, условий твердения, влажностных режимов эксплуатации изделий и связаны с его сорбционными свойствами. При использовании в качестве дисперсного заполнителя кварцевых песков с примесями глинистых, илистых, пылеватых частиц сорбционная влажность газобетона увеличивается на 5...8 %.

*Долговечность* изделий определяется комплексом его физико-технических и эксплуатационных свойств. Основные технологические приемы повышения долговечности ячеистых бетонов – выбор вяжущего, кремнеземистого заполнителя и В/Т-отношения, формирование качественной макро- и микропористой структуры, введение высокодисперсных и армирующих добавок, защитные покрытия, соблюдение режимов эксплуатации изделий.

### **3.2.2. Характеристика сырьевых материалов**

Для изготовления неавтоклавных ячеистых бетонов различного функционального назначения применяются широко распространенные в строительной практике сырьевые материалы: вяжущие вещества, кремнеземистые заполнители, порообразователи, вода, а также различные по назначению, корректирующие состав и регулирующие технологические свойства ячеистобетонных масс добавки (пластификаторы, стабилизаторы структурной прочности, ускорители твердения и др.).

#### **Вяжущие материалы**

В технологии ячеистых бетонов вяжущие вещества выбираются в зависимости от проектной прочности изделий из ячеистого бетона, традиционно используются в качестве основы вяжущего – портландцемент или его разновидности марки не менее 400, обеспечивающие необходимую структурирующую прочность ячеистобетонным массам до тепловлажностной обработки изделий, реже – строительная известь, молотые основные шлаки, золы, гипсовые и другие вяжущие.

С целью повышения прочности ячеистого бетона эффективно применять тонкомолотое многокомпонентное вяжущее, являющееся продуктом совместного помола минерального вяжущего (цемент и известь до удельной поверхности 350...400 м<sup>2</sup>/кг) с минеральной добавкой (золошлаковая смесь или кварцевый песок) при соотношении цемент : известь : заполнитель 1 : (0,5...1) : 0,7 по массе при использовании суперпластификатора С-3.

### **Требования, предъявляемые к вяжущему компоненту ячеистобетонных масс [15]**

- *Портландцемент*, отвечающий основным требованиям ГОСТ 10178-90, при применении в составе ячеистобетонных масс не должен содержать добавок трепела, глиежа, трассов, глиниста, опоки, пеплов. Содержание трехкальциевого алюмината ( $C_3A$ ) в цементе должно быть не более 6 % для изготовления крупноразмерных конструкций на цементном или смешанном вяжущем.

- *Известь* негашеная кальциевая должна отвечать требованиям ГОСТ 9179-77 и быть быстро- или среднегасящейся, иметь скорость гашения 5...25 мин и содержать активных  $CaO + MgO$  более 70 %, а «пережога» – менее 2 %.

- *Шлак* доменный гранулированный должен отвечать требованиям ГОСТ 3476.

- *Зола* высокоосновная должна отвечать требованиям ГОСТ 21-60, содержать  $CaO$  не менее 40 %, в том числе свободной  $CaO$  – не менее 16 %,  $SO_3$  – не более 6 % и  $R_2O$  – не более 3,5 %.

### **Природные кремнеземсодержащие заполнители [2, 3]**

Кремнеземистые заполнители ячеистых бетонов, на долю которых приходится до 60 % по массе и до 75 % по объему твердой фазы, являются основным видом сырья. В настоящее время выбор (в качестве заполнителя ячеистобетонных масс) природных кремнеземсодержащих сырьевых материалов и технологических приемов их переработки в основном определяется высоким валовым содержанием кремнезема. Традиционно в составах ячеистобетонных масс в качестве кремнеземистого заполнителя применяется кварцевый песок, содержащий не менее 90 % кремнезема (общее содержание) или не менее 75 % свободного кварца с обязательной стадией помола до удельной поверхности 150...300 (500)  $m^2/kg$  в зависимости от плотности изделий. Дисперсность кремнеземистого заполнителя в составе ячеистобетонных масс значительно влияет на процессы формирования равномерной структуры и прочностных характеристик газобетонных изделий.

Однако показатели дисперсности не характеризуют химическую активность кремнеземистого заполнителя и его межзерновую пустотность (до 25...35 %), определяющую расход вяжущего и воды.

Изучены возможности получения неавтоклавных газобетонов средней плотности от 400 до 900  $kg/m^3$  и повышенной прочности при использовании в качестве кремнеземистых заполнителей пылевидных отходов или материалов с высоким содержанием пылевидных и глинистых частиц, что противоречит требованиям, предъявляемым к кремне-

земистым заполнителям. Сырьевые материалы при этом предварительно подвергаются механохимической активации, в процессе которой происходит химическое взаимодействие между глинистыми минералами и гидратными новообразованиями смешанного вяжущего. В результате в условиях пониженной концентрации СаО в жидкой фазе наряду с высокоосновными образуется большее количество низкоосновных гидросиликатов кальция, способствующих увеличению прочностных характеристик ячеистого бетона.

Поэтому для технологии ячеистых бетонов представляют интерес и попутные продукты горения: золы-уноса, получаемые электростатическим или механическим осаждением мелких частиц из топливных газов; шлаки – пористые материалы, получаемые в сухих топках (обычно гидроудалением); котельные шлаки – стекловидный гранулированный материал, получаемый в топках; фосфогипс – продукт обессеривания топливных газов и др.

Ячеистый бетон, содержащий в своем составе кремнеземсодержащий шлак мокрой газоочистки и золу ТЭЦ, характеризуется увеличением трещиностойкости и прочности готового изделия. При совместном введении компонентов в состав смеси формируется плотная структура двухкомпонентного заполнителя – в пустотах между частицами золы располагаются более мелкие частицы кремнезема, что снижает водопотребность масс и увеличивает плотность межпоровых перегородок ячеистого бетона, дополнительному уплотнению которых способствует и химическая активация золы.

#### **Требования, предъявляемые к кремнеземистому компоненту ячеистобетонных масс**

- *Песок*, отвечающий основным требованиям ГОСТ 8736-93 «Песок для строительных работ» [2], при использовании в составе ячеистобетонных масс должен содержать SiO<sub>2</sub> не менее 90 % или свободного кварца не менее 75 %.

- Содержание слюды в песке не более 0,5 %.

- Содержание илистых и глинистых примесей в песке не более 3 %.

- *Зола-унос ТЭС*, отвечающая требованиям ОСТ 2160-84 [44], должна содержать SiO<sub>2</sub> не менее 45 %, СаО – не более 10 %, R<sub>2</sub>O – не более 3 %, SO<sub>3</sub> – не более 3 %.

- *Продукты обогащения руд* должны содержать SiO<sub>2</sub> не менее 60 %.

Удельная поверхность применяемых кремнеземсодержащих материалов принимается в соответствии с технологической документацией в зависимости от требуемой средней плотности ячеистого бетона, условий и режима тепловлажностной обработки и размеров конструкции.

Допускается применять другие кремнеземсодержащие материалы, обеспечивающие получение ячеистого бетона, отвечающего заданным физико-техническим характеристикам, установленным стандартом.

#### **Порообразователи ячеистых бетонов**

В соответствии с требованиями ГОСТ 25485-89 «Бетоны ячеистые» [43] для производства ячеистых бетонов в качестве порообразователей используют:

- газообразователь-алюминиевая пудра марок ПАП-1, ПАП-2 (ГОСТ 5494-71Е) [42];
- пенообразователи на основе:
  - костного клея – по ГОСТ 2067;
  - мездрового клея – по ГОСТ 3252;
  - сосновой канифоли – по ГОСТ 19113;
  - едкого технического натра – по ГОСТ 2263;
  - скрубберной пасты – по ТУ 38 – 107101 и другие виды пенообразователей.

В зависимости от способа поризации и вида порообразователя ячеистые бетоны классифицируют:

- на *газобетоны*: образование макроструктуры ячеистого бетона осуществляется *газопоризацией* – поризация с использованием выделяемого газа при химическом взаимодействии специально вводимого газообразователя с компонентами смеси (газобетоны, газосиликаты и т. д.);

- *пенобетоны*: образование макроструктуры ячеистого бетона осуществляется *пенпоризацией*, что обеспечивается смешиванием поризуемой массы с заранее приготовленной пеной (традиционный способ) или введением в пену тонкодисперсных сухих компонентов ячеистобетонной смеси (сухая минерализация), а также *аэрированием* – поризация ячеистой смеси при совместном интенсивном перемешивании всех компонентов смеси с образованием ячеистой структуры за счет воздухововлечения (пенобетоны, пеносиликаты);

- *пеногазобетоны*: образование макроструктуры ячеистого бетона осуществляется пеногазопоризацией – комбинированный способ поризации раствора, сочетающий метод аэрирования смеси с пенообразователем и газопоризации за счет использования выделяемого газа при химическом взаимодействии специально вводимого газообразователя с компонентами смеси в поризуемую смесь, т. е. на каждой стадии образования ячеистой структуры используются два принципиально различных способа для получения пористой структуры (пеногазобетоны, пеногазосиликаты).

Кроме того, известны и применяются разновидности этих способов, а также совокупные комбинации. К модификациям способов поризации относятся: вспучивание массы газообразованием в вакууме, аэрирование пенобетонной смеси под давлением с последующим снижением до атмосферного давления при формовании изделий или монолитного пенобетонного слоя (баротехнология) и др.

#### **Технические требования, предъявляемые к алюминиевой пудре**

Алюминиевая пудра представляет собой тонкодисперсный порошок алюминия, частицы которого имеют форму лепестков со средним диаметром 20...50 мкм и толщиной 1...3 мкм. Каждая частица алюминия покрыта тонкой пленкой парафина, придающего пудре гидрофобность. Существуют способы эффективного удаления парафиновой пленки непосредственно перед введением пудры в поризуемую массу.

Для поризации газобетонной смеси обычно используется алюминиевая пудра ПАП-1, соответствующая требованиям ГОСТ 5494-71 «Пудра алюминиевая пигментная» [42]. Алюминиевый порошок не содержит видимых инородных примесей. Технические свойства алюминиевой пудры ПАП-1 приведены в табл. 3.1.

Таблица 3.1

*Технические свойства алюминиевой пудры ПАП-1 [42]*

Свойства		Значение
Кроющая способность на воде, см <sup>2</sup> /г		≥ 7000
Всплываемость, %		≥ 80
Остаток на сите № 008, %		1
Содержание жировых добавок, %		≤ 3,8
Содержание влаги, %		≤ 0,2
Содержание примесей, %	Fe	0,5
	Si	0,4
	Cu	0,05
	Mn	0,01

#### **Регуляторы структурообразования, нарастания пластической прочности, ускорители твердения и пластифицирующие добавки ячеистых бетонов**

В качестве специальных добавок при изготовлении ячеистого бетона используются следующие виды сырьевых материалов:

- камень гипсовый и гипсоангидритовый – ГОСТ 4013;
- калий углекислый – ГОСТ 4221;
- кальцинированная техническая сода – ГОСТ 5100;
- стекло жидкое натриевое – ГОСТ 13078;

- триэтаноламин – ТУ 6-09-2448;
- тринатрийфосфат – ГОСТ 201;
- суперпластификатор С-3 – ТУ 6-14-625;
- натр едкий технический – ГОСТ 2263;
- карбоксилметилцеллюлоза – ГОСТ 6-05-386;
- сульфат натрия кристаллизационный – ГОСТ 21458 и другие добавки;
- вода для приготовления бетонов – ГОСТ 23732.

### 3.2.3. Подбор рационального состава ячеистого бетона

Подбор состава ячеистого бетона осуществляется с учетом требований стандартизированной методики и рекомендаций научно-исследовательских институтов, утвержденных в установленном порядке.

При разработке рациональных составов газобетонов основными факторами, влияющими на его прочность, являются: выбор вяжущего и его активность, подвижность ячеистобетонных масс, количество и качество заполнителя.

Применяемые в настоящее время общие правила подбора состава ячеистого бетона основаны на приближенном расчете состава и испытании опытных замесов. Известны несколько методов определения состава ячеистых бетонов: с учетом микрогранулометрии составляющих массу компонентов, условий формования и водотвердого отношения; метод поровых объемов; по СН 277-70 [45] и др. Как правило, все способы расчета и выбора состава ячеистого бетона состоят из следующих этапов:

- выбор вариантов соотношений между кремнеземистым компонентом и вяжущим веществом –  $C$ ;
- определение исходного водотвердого отношения –  $B/T$ ;
- расчет расхода основных сырьевых материалов на один замес массы ячеистого бетона и теоретической средней плотности свежеприготовленной ячеистой массы, соответствующей заданной плотности бетона в сухом состоянии;
- выполнение пробных замесов и приготовление образцов ячеистого бетона;
- тепловлажностная обработка, испытание готовых образцов, корректировка и установление оптимального состава ячеистобетонной массы;
- расчет расхода сырьевых материалов на  $1 \text{ м}^3$  ячеистого бетона.

Существуют противоречивые сведения в литературе относительно характеристики величины  $C$ , по мнению ряда авторов, величина  $C$  характеризует отношение  $\text{CaO}/\text{SiO}_2$ , где  $\text{CaO}$  – содержание оксида кальция в извести, а  $\text{SiO}_2$  – содержание растворимого оксида кремния в кремне-

земистом компоненте, а другие авторы определяют величину  $C$  отношением числа частей по массе кремнеземистого компонента, приходящегося на одну часть по массе вяжущего. Тем не менее предложенные этими авторами расчеты состава ячеистого бетона не имеют принципиальных отличий.

Газобетонная смесь (ГБС) является типичной гетерогенной дисперсной системой, состоящей в исходном состоянии из двух фаз – твердой (Т) и жидкой (Ж) и практически не содержит газовой фазы. Общий объем смеси складывается из объемов твердой и жидкой фаз. Принимая, что при гидратации и твердении вяжущих примерно 10 % воды переходит в химически связанное состояние, то есть в состав твердой фазы, имеем:

$$V_{\text{см}} = V_{\text{т}} + V_{\text{ж}} = \frac{T - 0,1B}{\rho_{\text{и}}} + \frac{B}{\rho_{\text{ж}}}, \quad (3.1)$$

где  $V_{\text{см}}$  – общий объем смеси в исходном состоянии, м<sup>3</sup>;

$V_{\text{т}}$  – объем твердой фазы в смеси, м<sup>3</sup>;

$V_{\text{ж}}$  – объем жидкой фазы в смеси, м<sup>3</sup>;

$\rho_{\text{ж}}$  – плотность жидкой фазы, кг/м<sup>3</sup>;

$T$  – масса твердой фазы, кг, принимаем  $T = 100$  кг;

$B$  – масса жидкой фазы, кг,  $B = T \cdot \frac{B}{T}$ , кг;

$B/T$  – заданное значение водотвердого отношения;

$\rho_{\text{и}}$  – истинная плотность материала твердой фазы, кг/м<sup>3</sup>.

Относительные объемы твердой и жидкой фаз или их объемные концентрации  $K_{\text{т}_1}$ ,  $K_{\text{ж}_1}$  в исходном состоянии определяются:

$$K_{\text{т}_1} = V_{\text{т}} / V_{\text{см}}, \text{ отн. ед.}; K_{\text{ж}_1} = V_{\text{ж}} / V_{\text{см}}, \text{ отн. ед.} \quad (3.2)$$

и для исходного состояния справедливо соотношение:

$$K_{\text{т}_1} + K_{\text{ж}_1} = 1. \quad (3.3)$$

Проектирование состава ГБС с использованием массовых количеств компонентов является достаточно сложной задачей и поэтому для основного метода расчета состава смеси используется метод абсолютных объемов, являющийся частным случаем закона постоянства объемного фазового состава дисперсной системы.

Исходной характеристикой для расчета является объемная масса готового изделия.

Расход вяжущего (цемента) подсчитывают по формуле:

$$P_{\text{ц}} = \frac{\rho_{\text{сух}}}{K \cdot (1 + C)} \cdot V, \text{ кг}, \quad (3.4)$$

где  $\rho_{\text{сух}}$  – заданная плотность ячеистого бетона в сухом состоянии,  $\text{кг}/\text{м}^3$ ;

$K$  – коэффициент, учитывающий увеличение массы сухой смеси при твердении за счет связанной воды, принимаемый равным 1,1;

$V$  – объем замеса,  $\text{м}^3$ ;

$C$  – число частей по массе кремнеземистого компонента, приходящихся на 1 часть по массе вяжущего вещества,  $C = 0,3$ .

Расход кремнеземистого компонента (кварцевого песка):

$$P_{\text{п}} = P_{\text{ц}} \cdot C, \text{ кг.} \quad (3.5)$$

Водотвердое отношение является постоянной величиной и выбирается в зависимости от используемой технологии формования газобетонного изделия, в данном случае  $V/T = 0,65$ .

Общий объем воды для замеса рассчитывается исходя из суммы твердого вещества и водотвердого отношения:

$$T = P_{\text{ц}} + P_{\text{п}}, \text{ кг; } V = V/T \cdot T, \text{ л.} \quad (3.6)$$

Следующим этапом расчета состава смеси является определение объема пор в газобетоне:

$$V_{\text{пор}} = V - (V_{\text{ц}} + V_{\text{п}} + V), \text{ м}^3, \quad (3.7)$$

где  $V$  – объем ячеистого бетона,  $\text{м}^3$ ;

$V_{\text{ц}}$  – объемное содержание цемента в смеси, которое определяется по формуле  $V_{\text{ц}} = \frac{P_{\text{ц}}}{\rho_{\text{ц}}}$ , где  $P_{\text{ц}}$  и  $\rho_{\text{ц}}$  – расход (кг) и истинная плотность ( $\text{кг}/\text{м}^3$ ) цемента соответственно;

$V_{\text{п}}$  – объемное содержание кварцевого компонента (песка) в газобетонной смеси, которое определяется по формуле  $V_{\text{п}} = \frac{P_{\text{п}}}{\rho_{\text{п}}}$ , где  $P_{\text{п}}$  и  $\rho_{\text{п}}$  – расход (кг) и истинная плотность ( $\text{кг}/\text{м}^3$ ) кварцевого песка соответственно;

$V$  – общий объем воды, необходимый для приготовления газобетонной смеси, л.

Теоретический расход газообразователя (алюминиевой пудры) определяется по реакции газовыделения:



По этому уравнению 54 г алюминия выделяют 3 грамм-молекулы (или 6 г) водорода; т. к. объем каждой грамм-молекулы газа при нормальных условиях равен 22,4 л, то весь выделившийся водород займет объем  $22,4 \cdot 3 = 67,2$  л. Следовательно, 1 г алюминиевой пудры выделяет водород в количестве 1,25 л.

Так как температура газобетонной смеси в момент газовыделения находится в пределах 40 °С, то объем водорода, выделяемого 1 г алюминиевой пудры, будет определяться по закону Гей-Люссака:

$$V_T = V_0 \cdot \left( 1 + \frac{1}{273} \cdot t \right). \quad (3.9)$$

Тогда расход алюминиевой пудры будет равен:

$$A_T = \frac{V_{\text{пор}}}{V_T}. \quad (3.10)$$

Практический расход алюминиевой пудры больше теоретического за счет неполного протекания химической реакции между алюминием и гидроксидом кальция, а также частичной потери образовавшегося газа в окружающую среду. Практический расход алюминиевой пудры ( $A_{\text{П}}$ ) подсчитывают по формуле:

$$A_{\text{П}} = \frac{A_T}{K_{\text{И}}}, \quad (3.11)$$

где  $K_{\text{И}}$  – коэффициент использования порообразователя,  $K_{\text{И}} = 0,85$ .

Объединяя формулы (3.10) и (3.11) при  $V_T = 1,42$  л, получаем формулу для определения расхода алюминиевой пудры:

$$A_{\text{П}} = \frac{V_{\text{пор}}}{1,2}. \quad (3.12)$$

При производстве неавтоклавного газобетона в качестве вяжущего используется портландцемент, а известь добавляется в небольших количествах только с целью создания сильной щелочной среды, что является определенным толчком для осуществления процесса поризации. Количество извести также определяется по реакции газообразования, т. е. по абсолютным объемам реагирующих веществ.

Для снятия парафиновой пленки с частичек алюминия при приготовлении алюминиевой суспензии необходимо вводить стеарат натрия (хозяйственное мыло) в количестве 5 % от расхода алюминиевой пудры.

### 3.2.4. Свойства ячеистобетонных масс и их регулирование

Ячеистобетонные массы представляют собой высококонцентрированные суспензии, характеризующиеся свойствами пластично-вязких тел, их реологические свойства (на стадиях гидратации и твердения) описываются уравнением Шведова–Бингама:

$$P = P_T + \eta_{\text{пл}} \frac{dv}{dx}, \quad (3.13)$$

где  $P$  – напряжение сдвига, Па;

$P_T$  – предельное напряжение сдвига (предел текучести), Па;

$\eta_{пл}$  – пластическая вязкость, Па · с.

При малых сдвиговых напряжениях ( $P < P_T$ ) в системе развиваются упругие деформации, а при  $P > P_T$  имеет место пластическая деформация, растущая до бесконечности, т. е. процесс течения.

Для производства ячеистых бетонов высокого качества необходимо обеспечение оптимальных условий кинетики газообразования, а именно, чтобы наиболее интенсивный процесс газообразования совпадал по времени с началом нарастания структурной прочности ячеистых масс.

Это может быть достигнуто варьированием комплекса параметров: оптимизацией водотвердого отношения масс, регулированием температурного режима процесса вспучивания, введением специальных добавок, изменяющих свойства ячеистобетонных масс; соблюдения необходимых условий формования изделий.

*Водотвердое отношение.* В современной отечественной и зарубежной научной литературе при исследовании влияния водотвердого отношения на качество неавтоклавных ячеистых бетонов прослеживается тенденция по снижению количества воды затворения ячеистобетонных масс (уменьшение В/Т от 0,65 до 0,4) различными способами.

Первоначальный выбор В/Т-отношения зависит от вида и качества вяжущего вещества и кремнеземистого заполнителя, а в итоге определяется при изготовлении пробных замесов. Оптимальное водотвердое отношение ячеистобетонной массы традиционного состава (цемент, кварцевый песок с  $S_{уд} = 2500 \text{ см}^2/\text{г}$ , литьевая технология, плотность бетона  $1000 \text{ кг/м}^3$ ), по данным Курносова Э.А., составляет 0,63. Избыток воды в массе снижает вязкость системы и соответственно ее газодерживающую способность, а ее недостаток в составе ячеистобетонной массы повышает вязкость системы и не обеспечивает необходимых условий поризации.

*Температурный режим процесса вспучивания.* Повышение температуры ячеистобетонных масс способствует увеличению их подвижности, равномерному и полному протеканию процессов газообразования и вспучивания и является оптимальным в пределах от 23 до 48 °С в зависимости от вида изделия.

При изучении влияния температуры воды затворения на разогрев и поризацию ячеистобетонных масс выявлено, что при температуре внутри массива 78...85 °С в макроструктуре бетона доминируют мелкие равномерно распределенные поры, а с увеличением температуры до 95...100 °С характер распределения пор и прочность ухудшаются.

Температура массива оказывает влияние и на процессы роста сырьевой прочности ячеистых материалов, неравномерность температуры

по объему массива может вызывать различия в давлении внутри газовых пузырьков и ячеистой массы, что приводит к миграции влаги от участков с более высокой температурой к участкам с меньшей температурой и затруднениям процессов гидратации и твердения портландцемента.

*Влияние добавок.* Регулирование реологических характеристик ячеистобетонных масс с помощью добавок выполняется с целью снижения В/Т-отношения, увеличения пластичности и подвижности на стадии приготовления ячеистых масс, обеспечения необходимой вязкости массы в период ее поризации и пластической прочности при вызревании ячеистого массива, для этого в соответствующем ГОСТе [43] приведен перечень добавок.

*Водорастворимые добавки* КМЦ (карбоксиметилцеллюлоза) и ПВА (поливинилацетатная эмульсия) оказывают *структурирующий эффект* на ячеистые массы, но замедляют процессы гидратации и твердения цемента.

При совместном введении *комплекса добавок* в виде хлорида кальция (0,5...1 %), гипса (0,7 %) и микрокремнезема (3 %) в ячеистобетонную массу авторы оптимизировали значения основных реологических свойств на уровнях, отвечающих необходимым подвижности и пластичности массы условиям эффективного газообразования, стабилизации при вызревании массива, что позволило повысить прочность при сжатии готовых изделий на 20...30 %.

Тонкодисперсные добавки золы (с большим содержанием стеклофазы) не увеличивают водосодержания масс и снижают их вязкость; известняка, шлака снижают предельное напряжение сдвига и вязкость, а добавка гипса повышает вязкость и пластическую прочность ячеистых масс.

Набор сырцової прочности ячеистобетонных массивов обусловлен процессами схватывания и твердения вяжущего компонента в составе ячеистых масс, учитывая медленные сроки схватывания портландцемента (начало не ранее 45 мин), для ускорения процессов упрочнения (стабилизации) массива необходимо введение добавок, структурирующих сформованный (поризованный) массив (полуводный гипс). Замедление процессов схватывания и твердения цемента при использовании пластификаторов компенсируется введением добавок, ускоряющих процессы твердения. Так, при изучении влияния карбоната калия на рост сырцової прочности ячеистых бетонов установлено, что поташ, вступая с вяжущим в обменные реакции, образует труднорастворимые соли, а увеличивая щелочность жидкой фазы, интенсифицирует растворение алита. Таким образом, основное действие добавок – повышение

пластичности и удобоукладываемости и снижение В/Т-ячеисто-бетонных масс.

*Подвижность ячеистобетонных масс* плотностью 400...700 кг/м<sup>3</sup> характеризуется текучестью массы при испытании на приборе Суттарда и имеет следующие показатели (табл. 3.2).

Таблица 3.2

*Изменение подвижности масс в зависимости вида вяжущего*

Материал	Подвижность масс, см	Температура массы, °С
Газобетон на цементе с добавкой извести	22...34	42...48
Газобетон на нефелиновом шламе	26...42	28...31
Газобетон на известково-шлаковом вяжущем	20...26	38...42
Газобетон на сланцезольном вяжущем	20...25	38...42
Газосиликат	19...25	28...31
Пенобетон на цементе с добавкой извести	24...34	33...36

*Условия формования.* Наиболее распространенным способом формования ячеистых изделий является виброформование (литьевой способ и вибрирование), это требует высокого водосодержания ячеистых масс и, соответственно, снижает показатели прочности готовых изделий.

Применение динамических усилий (с определенной интенсивностью, частотой, продолжительностью) при формовании ячеистых бетонов (ударная технология) позволяет уменьшить В/Т-отношение до 0,55...0,57 (на 10...25 %), при этом пластическая вязкость газобетонной смеси увеличивается от 5,1 (в начале приготовления массы) до 7,4 Па·с (через 30 мин от начала поризации), а от 0 до  $2 \cdot 10^{-2}$  МПа изменяется пластическая прочность массива, т. е. обеспечивается снижение времени выдержки сырца до его кантования и резки в 1,5–2 раза, повышение прочности изделий на 25...50 %.

Совместное использование вибровспучивания ячеистых масс и виброукладки массива в формы или вибрационной технологии (виброперемешивание и вибровспучивание) приводит к формированию равномерно пористой структуры изделий и достаточно плотных межпоровых перегородок при снижении В/Т на 20...25 % и увеличению прочности в 1,3 раза при плотности 300...350 кг/м<sup>3</sup>.

### **3.2.5. Физико-химические процессы формирования пористой структуры ячеистого бетона**

Макро- и микроструктуру ячеистого бетона можно представить структурой порового пространства и структурой межпоровых перегородок.

*Поровое пространство* характеризуется формой, размерами, распределением пор в массиве и их общим содержанием.

Формирование пористой структуры ячеистого бетона происходит в результате выделения определенного объема газа, образующегося на поверхности равномерно распределенных микрочастиц газообразователя, например при протекании химической реакции между алюминиевой пудрой и гидроксидом кальция с выделением водорода, согласно уравнению (3.8).

*Газообразование* включает три стадии: зарождение газовых пузырьков на поверхности частиц алюминиевой пудры, увеличение их объема, стабилизацию размеров и локализацию газовых пузырьков – пор. Общая пористость ячеистого бетона изменяется, по данным ряда авторов, от 68,7 до 79,9 %, а объем капиллярных пор радиусом – в пределах 0,01...50 мкм – 361,3...562,5 мм<sup>3</sup>/г и возрастает для материалов с пониженной плотностью за счет увеличения доли переходных пор радиусом 0,1...0,01 мкм. Максимальную прочность имеют образцы газобетона с водопоглощением 30...32 % и объемом переходных пор – 165...225 м<sup>3</sup>/г.

Основными условиями получения качественной ячеистой структуры с порами правильной сферической формы, равномерно распределенными в массе бетона без дефектов поровой структуры, является вид, качество и количество газообразователя, соответствие кинетики газовыделения изменению реологических характеристик вспучиваемой ячеистобетонной массы. Для достижения соответствия скоростей процессов газовыделения и нарастания пластично-вязких свойств вспучиваемой массы, которая в начале процесса газовыделения должна нарастать медленно, а в конце – быстро, используют различные технологические приемы – это регулирование В/Т-отношения, температуры воды затворения ячеистой массы, условий формования и введения добавок.

Особенно эффективным оказывается управление структурообразованием ячеистых масс при введении добавок и механического воздействия при формовании изделий. При вибрационном (ударном) воздействии происходит тиксотропное разжижение ячеистых масс, что позволяет регулировать кинетику ее пластично-вязких свойств с учетом кинетики газовыделения. В этом случае происходит резкое снижение предельного напряжения сдвига и в меньшей степени вязкости, это предотвращает седиментацию дисперсных частиц и коалесценцию газовых пузырьков, что позволяет получить равномерно пористую ячеистую структуру без дефектов межпоровых перегородок. Установлено, что при формировании мелких (менее 0,5...1 мм) пор в бетоне ячеистая структура отличается большей сообщаемостью пор, при

крупнопоровом строении бетона (поры 3...4 мм) структура неоднородна, и это приводит к снижению прочности изделия, а структура с порами 1...3 мм ячеистокапиллярная и однородная способствует увеличению прочности бетона.

*Структура межпоровых перегородок* (микроструктура) определяется минеральным составом, степенью дисперсности и кристаллизации новообразований, плотностью и прочностью материала межпоровой перегородки и зависит от вида, состава сырья и ячеистобетонной массы, В/Т-отношения, условий поризации, формования и твердения ячеистых бетонов.

Основными способами формирования качественной межпоровой перегородки является повышение ее плотности и уменьшение пористости материала межпоровой перегородки, что соответственно приводит к увеличению ее прочности при сжатии и изгибе и достигается снижением водотвердого отношения ячеистых масс и введением специальных добавок, ускоряющих процессы твердения ( $\text{CaCl}_2$ ) и высокодисперсных, структурирующих вспученные массы (полуводный гипс, микрокремнезем), повышающих одновременно степень гидратации и кристаллизации новообразований при твердении цемента.

Получение минимально возможной толщины межпоровых перегородок требует жесткого подхода к дисперсности кремнеземистого заполнителя, а при низких плотностях изделий и к дисперсности цемента – при порах 1...2 мм и плотности  $800 \text{ кг/м}^3$  минимальная толщина перегородки не может быть более 0,3...0,6 мм,  $600 \text{ кг/м}^3$  – 0,17...0,32 мм,  $400 \text{ кг/м}^3$  – 0,1...0,2 мм, т. е. максимальный размер частиц песка и цемента должен быть в 3–5 раз меньше минимальной толщины перегородки. Исследования фракционированных продуктов песка (фракции 2,5; 1,25; 0,63 мм) в качестве заполнителей ячеистых масс показали, что введение их в состав масс нарушает равномерность пористой структуры при снижении усадки, а помол песка до удельной поверхности  $300 \text{ м}^2/\text{кг}$  не влияет на структуру перегородок. Установлен положительный эффект при формировании вариатропных структур ячеистого бетона, т. е. структур с заданным переменным содержанием пор по рабочему сечению изделия, полученных прикатыванием горбушки, послойной заливкой, посыпанием сухими материалами поверхности изделия или введением крупных частиц заполнителя фракции более 2,5 мм, что позволяет повысить прочностные характеристики готовых изделий на 20...25 % (при сжатии) и на 25...30 % (при изгибе), снизить усадку на 10...15 % при вариотропности 0,3...0,4.

И.Б. Удачкиным предложен новый способ поризации ячеистых масс (баротермальный), предусматривающий насыщение массы сжатым воздухом в герметичном смесителе и выгрузку в формы, где в результате перепада давлений воздуха в смеси и атмосферного происходит ее вспучивание.

Таким образом, в зависимости от состава ячеистых масс, качества сырьевых материалов и технологии фактором оптимизации состава и структуры ячеистого бетона является соотношение между толщиной межпоровой перегородки и диаметром пор, которое должно составлять 0,1...1 и свидетельствовать о формировании определенного типа структуры (псевдоячеистая крупнокапиллярная, предпочтительнее формирование ячеистокапиллярной однородной и крупнопоровая неоднородная), что позволяет получать бетоны плотностью 500...1000 кг/м<sup>3</sup> с прочностью 2...10 МПа.

### **3.2.6. Формование ячеистых изделий**

Более распространенным способом формования ячеистых изделий является литьевой способ с вибрированием. Однако при вибрировании ячеистых масс нарушается ориентация частиц в массе, а избыточная влага высвобождается, т. е. отмечается эффект отделения влаги на поверхности изделия. При таком способе формования структурированная концентрированная суспензия вспученной ячеистой массы разжижается из-за частичного разрушения первоначальной структуры, предельное напряжение сдвига структуры снижается, а структурная вязкость остается высокой. После вибрирования ячеистая масса частично восстанавливает первоначальные реологические свойства.

### **3.2.7. Физико-химические процессы твердения неавтоклавногo ячеистого бетона**

*Твердение неавтоклавных ячеистых бетонов* осуществляется при пропаривании в среде насыщенного водяного пара при температурах 80...90 °С и атмосферном давлении по специальным режимам: нагрев (1...2 ч) – изотермическая выдержка при максимальной температуре (6...8 ч) – естественное охлаждение (1,5...3 ч) или реже в естественных условиях при температуре окружающей среды 25 °С и атмосферном давлении. Неавтоклавные ячеистые бетоны изготавливаются в основном при использовании портландцемента и его разновидностей при их повышенном содержании, и именно процессы схватывания и твердения цемента в присутствии компонентов ячеистой массы определяют минеральный состав новообразований и свойства изделий.

Фундаментальные основополагающие теоретические положения о гидратации и твердении портландцементов заложены в работах А. Лешателье, В. Михаэлиса, П.А. Ребиндера, В.Б. Ратинова, Ю.М. Бутта, Л.Н. Рашковича, А.В. Волженского, А.А. Байкова и др.; значительный вклад в развитие механизма процессов гидратации и твердения цемента внесли О.П. Мчедлов-Петросян, А.Ф. Полак, М.М. Сычев, И.П. Выродов и др., формированию структуры и самоармированию цементного камня посвящены избранные труды В.В. Тимашева, обобщенные и современные представления о химии цементов изложены в монографии Х.Ф.У. Тейлора [41].

Портландцемент, состоящий из полиминеральных частиц, активно взаимодействует с водой сразу при соприкосновении с ней. При изготовлении ячеистого бетона портландцемент начинает взаимодействовать с водой на стадии смешения компонентов ячеистобетонной массы, приготовления формовочной смеси, ее поризации, вызревания и выдержки массива перед тепловлажностной обработкой, что происходит при нормальной температуре. За это время, согласно основным стадиям процессов гидратации и твердения цемента, произойдет начало схватывания портландцемента.

Основными стадиями сложных физико-химических процессов схватывания и гидратационного твердения цемента являются: растворение минералов клинкера в воде с образованием пересыщенных растворов, кристаллизация из растворов новых гидратных соединений, их перекристаллизация с образованием стабильных в данных температурно-влажностных условиях соединений и формирование физической структуры цементного камня.

Процессы гидратации портландцемента, изученные с использованием электронной микроскопии при сверхвысокой разрешающей способности, позволяют описать морфологические особенности новых гидратных фаз и исследовать поровый раствор гидратированного цемента, установить последовательность образования новых соединений при твердении цемента. *Известь*, содержащаяся в клинкере, быстро (в первые 2...5 мин) реагирует с водой, образуя гидроксид кальция с размерами частиц 10...20 мкм, возможна реакция извести с щелочными сульфатами калия и натрия с образованием гипса и сингениита (через 5...20 мин), а с алюминатами кальция – этtringита. *Алюминат кальция* быстрее всех реагирует с водой при отсутствии сульфата с образованием гидроалюмината кальция, кристаллы которого создают решетчатую структуру. В присутствии *гипса* образуются кристаллы гидроалюмината кальция размерами  $2 \times 2 \times 0,05$  мкм, а на их поверхности и поверхности других минералов через 2...30 мин – маленькие кристаллы этtringита длиной

100...400 нм и диаметром 50...100 нм, к концу твердения кристаллы этtringита имеют размеры около 2,5 мкм.

В первые два часа гидратации цемента установлено образование твердого раствора моносulfата и гидроалюмината кальция. На поверхности зерен *алита* и *белита* происходит очень медленная их гидратация, а затем скорость реакции алита резко возрастает. Химическая реакция *алита* начинается через 2...3 ч. На поверхности клинкерных фаз образуются отдельные остroконечные C-S-H-фазы, ее кристаллы вырастают в процессе гидратации в направлении пор вначале (через 2 ч и до 1 сут.) до размеров около 600 нм, а затем через 28 сут. имеют длину 1...2 мкм и диаметр 50 нм. Во время гидратации алита образуется плотная оболочка из иглообразных кристаллов C-S-H-фаз на клинкерных зернах. Гидратированный край зерен клинкера состоит преимущественно из C-S-H-фаз, а между ними распределены кристаллы этtringита. Кристаллы портландита, образующегося при гидратации алита, имеют форму гексагональных пластинок, прирастающих к зернам клинкера, и фиксируются в твердеющей системе через 12 ч и до 28 сут.

Особенности химических превращений сырьевой смеси из цемента, извести, кварца, гипса и алюминиевой пудры связаны с первичным образованием в ячеистобетонной массе портландита, водорода, затем этtringита; гидратацией алюмината кальция с образованием  $C_3AH_6$  и трехкальциевого силиката с образованием CSH-геля и  $(CaOH)_2$ .

При тепловлажностной обработке ячеистых изделий насыщенным паром отмечается более высокая степень гидратации алита, ускоряется образование и увеличивается количество CSH-геля, тоберморитовых соединений различной степени кристаллизации.

Введение тонкомолотых ( $10\ 000\ \text{см}^2/\text{г}$ ) добавок (например, известняка) в цементосодержащие системы компенсирует замедление гидратации цемента, вызванное действием суперпластификатора, авторы отмечают более высокую степень гидратации алита в присутствии извести.

### **3.2.8. Особенности физико-химических процессов гидротермального синтеза соединений при получении газо- и пеносиликатов**

Производство ячеистых силикатов с использованием известково-кремнеземистого вяжущего, заполнителя, воды, порообразователя и специальных добавок состоит из следующих этапов:

- подготовки сырьевых компонентов, а иногда и стальной арматуры;
- приготовления силикатной массы (в пластичном состоянии), ее вспучивания или вспенивания при формовании ячеистых изделий;

- гидротермальных процессов синтеза гидратных соединений в известково-песчаных, известково-зольных или известково-шлаковых смесях и процессов гидролиза и гидратации гидравлического вяжущего;
- карбонизации ячеистосиликатных масс;
- охлаждения и высушивания изделий и отделки изделий.

Пластичная силикатная масса, вырабатываемая для получения ячеистых силикатов, представляет собой высококонцентрированную суспензию, образующуюся в результате тщательного перемешивания в специальных мешалках компонентов рационально подобранной смеси, в которую вводят воду, газо- или пенообразующие вещества. Смеси, как правило, должны быть нагреты до 30 °С, исключением являются газосиликатные изделия, содержащие негашеную известь. Иногда смесь затворяют холодной водой при так называемом холодном способе, когда газообразование протекает в результате реакции между алюминиевой пудрой и порообразователем, состоящим из едкого натра, при нормальной температуре. Воду вводят в таком количестве, которое придает массе достаточную текучесть при заполнении форм, а после заполнения – хорошую вспучиваемость (при добавлении газообразователя) или вспениваемость (при добавлении пенообразователя).

Водотвердое отношение силикатных масс на основе известково-кремнеземистого вяжущего характеризуется значениями от 0,23 до 0,7 и зависит от состава смеси, содержания в ней частиц различной дисперсности, объема газа, выделившегося при газообразовании, от способа изготовления ячеистой смеси. При использовании виброгазобетонмешалок или гидродинамических смесителей в сочетании с формованием изделий путем вибрирования, воздействия гидравлических импульсов или эффекта периодического деформирования в процессе вспучивания газосиликатной смеси В/Т-ячеистосиликатной массы значительно меньше, чем при получении массы в обычных газобетонмешалках по литьевой технологии.

Вспучивание ячеистосиликатной массы происходит в результате увеличения объема газа, образующегося на поверхности равномерно распределенных микрочастичек газообразователя в несхватившейся, но имеющей для предотвращения прорывов газа достаточную пластическую вязкость массе. В этот момент протекает химическая реакция между газообразователем и активно действующим на него компонентом с выделением газа; идут процессы расширения образующихся микропор вследствие возникающего давления газа на стенки пор и прилегающую к ним ячеистосиликатную массу (физический) и схватывания ячеистосиликатной массы (физико-химический). Важно, чтобы эти процессы по времени совпадали. Окончание схватывания ранее окончания вспучива-

ния вызывает растрескивание схватившейся массы и свежесформованных изделий, однако к моменту прекращения вспучивания масса должна иметь достаточную пластическую прочность, чтобы не происходило осадки массы в изделии.

Интенсификация газовыделения возможна при добавлении к алюминиевой пудре порошка углеродистых веществ (2...4 % к массе пудры при изготовлении газосиликатной массы и 8...10 % газобетонной). При введении в газосиликатную смесь тонкодисперсного углерода, являющегося твердым проводником с нормальным электродным потенциалом, близким к нулю, в структуре ячеистосиликатной массы возникает система случайно расположенных гальванических микроэлементов. Гальванической парой этих элементов являются частицы алюминия (микрокатод) и углерод (микроанод). В результате возникновения электродвижущей силы происходит электролитическое растворение пленки водорода и существенное увеличение глубины реакции между алюминиевой пудрой и гидроксидом кальция.

Физико-химические процессы гидротермального синтеза новых соединений в ячеистосиликатной массе происходят в автоклаве при высоких температурах (174...205 °С) и давлении (0,8...1,6 МПа) в результате сложных процессов взаимодействия между компонентами сырьевой смеси как в жидкой, так и в твердой фазе, но в присутствии воды и насыщенного водяного пара с образованием гидросиликатных соединений различной основности –  $\text{CSH}$ ,  $\text{C}_2\text{SH}$ ; тоберморита  $\text{C}_4\text{S}_5\text{H}_5$ , ксонотлита  $\text{C}_6\text{S}_6\text{H}$ .

Механизм процессов образования гидросиликатов кальция в смеси  $\text{CaO}$  и  $\text{SiO}_2$  протекает в силикатной смеси: с выносом продуктов гидротермального синтеза через жидкую фазу и без выноса их.

В первом случае – водный раствор извести вследствие различных условий контакта с зернами тонкоизмельченного кремнеземсодержащего компонента и разной концентрацией в нем извести реагирует с кремнеземом в отдельных микрообластях изделия и с неодинаковой интенсивностью, в результате чего образуется богатый известью (т. е. высокоосновный) гидросиликатный гель. Кроме того, в жидкой фазе имеется оставшийся непрореагировавшим гидроксид кальция. Некоторая часть этих соединений в виде ионов или недиссоциированных молекул вследствие разной концентрации, термо- и влагопроводности и других факторов (температура, давление), вызывающих движение жидкой фазы по микропорам, перемещается в диффузионную область, вначале еще не занятую кремнеземистыми частицами и заполненную лишь насыщенным раствором извести. В любой момент процесса и в каждой из субмикроскопических областей изделия достигается

определенное, но различное с соседней, соотношение между концентрацией ионов кальция и кремния, содержанием геля новых фаз и реагирующих с ними тонких зерен кремнезема. При определенных соотношениях создаются условия для образования в некоторой микрообласти жидкой фазы зародышей новой фазы и их кристаллизации, интенсифицирующих взаимодействие извести с кремнеземом.

При вибрации или барботировании силикатной системы жидкая фаза перемещается более интенсивно и процессы гидротермального синтеза активизируются.

С повышением температуры растворимость кварца возрастает, а растворимость оксида кальция уменьшается. В связи с этим в начале автоклавной обработки образуется высокоосновный гидросиликат кальция  $C_2SH_2$  или  $C_2SH$ . Такого вида соединения существуют, пока раствор насыщен известью. После же ее связывания в гидросиликаты кальция концентрация кремнезема в жидкой фазе увеличивается. При достижении концентрации  $CaO$  более 0,12 г/л образуется  $C_2SH$ , при концентрациях от 0,085 до 0,12 г/л образуется  $CSH$ , а при концентрации  $CaO$  ниже 0,085 –  $CSH$ . С ростом концентрации кремнезема до определенного предела в жидкой фазе наблюдается растворение высокоосновного гидросиликата кальция и образование низкоосновного. По данным А.К. Шервинской,  $\beta$ -двухкальциевый гидросиликат легко образуется при 150 °С и находится в равновесии с раствором, содержащим 0,23 г  $CaO$ /л и 0,015 г  $SiO_2$ /л. Кржеминский С.А. установил возможность образования низкоосновных гидросиликатов непосредственно из твердых фаз  $CaO$  и  $SiO_2$  в условиях автоклавной обработки.

Во втором случае – часть образовавшейся поликремниевой кислоты (в результате воздействия водного раствора извести на поверхность зерна кремнезема) не перемещается с поверхностных слоев песчинки, а в силу химической активности к извести взаимодействует с ней и образует также гидросиликаты кальция непосредственно на месте их контакта, т. е. реакция идет топохимическим путем. Так как процесс связывания извести с кремнеземом протекает в диффузионной области через жидкую фазу чрезвычайно медленно, то возникает предположение, что немаловажную роль в гидротермальном синтезе играет и топохимический характер реакций.

Процесс автоклавной обработки ячеистосиликатных изделий протекает в три основные стадии:

1. Период впуска пара в автоклав и подъем давления до постоянного уровня.
2. Период выдержки при постоянном давлении.
3. Период снижения давления и выпуск пара.

При впуске насыщенного пара он омывает сырец и стенки автоклава и смешивается с находящимся в автоклаве воздухом. Сначала происходит только интенсивный прогрев сырца благодаря большой разности температур между ним и паром. Давление же в автоклаве сохраняется на уровне атмосферного до тех пор, пока средняя температура в нем не достигнет 100 °С. Этот период обычно продолжается 0,5...0,75 ч и является периодом пропаривания без давления. Соприкасаясь с холодными поверхностями сырца, пар отдает им свою скрытую теплоту и конденсируется здесь же в воду, которая впитывается сырцом. При этом вода вытесняет из пор сырца некоторое количество находившегося в них воздуха. Сырец нагревается также физическим теплом, содержащимся в конденсате. Этот процесс продолжается до тех пор, пока температуры сырца и пара не сравняются. Таким образом, при прогреве сырца вначале насыщается конденсатом его поверхность, соприкасающаяся с паром, а в дальнейшем влажная зона продвигается внутрь, и в последнюю очередь увлажняется центральная зона сырца. С повышением температуры воды, находящейся в порах наружных зон сырца, до 100 °С предельная концентрация и количество растворенной в ней извести значительно понижаются, вследствие чего часть гидроксида кальция выделяется из пересыщенного раствора в коллоидном виде. Аморфизированная при помолке поверхность зерен кремнезема гидратируется ионами (ОН)<sup>-</sup> и образует на поверхности зерен частицы в виде коллоидной кремнекислоты. Выпавший из раствора вблизи зерен кремнезема в местах контактов с известью коллоидный гидроксид кальция адсорбируется поверхностью зерен кремнезема, уже покрытых кремнекислотой, и образует с ней адсорбционные комплексы, склеивающие зерна кремнеземистого компонента и песчаного заполнителя и придающие первоначальную прочность соответствующим зонам сырца. При дальнейшем повышении температуры наружных зон сырца начинается реакция между SiO<sub>2</sub> и известью в жидкой фазе с образованием гидросиликатов кальция высокой основности.

В период выдержки при постоянном давлении (изотермическая обработка) в первые 1...1,5 ч продолжается интенсивная передача тепла и поступление конденсата от торцов сырца к центральной зоне, вытеснение из нее пор воздуха. После выравнивания температур по объему изделия условия для гидротермального синтеза во всех зонах становятся одинаковыми. В этот период в жидкой фазе (при P = 0,8 МПа) образуются, главным образом, высокоосновные гидросиликаты кальция и одновременно идет перекристаллизация коллоидных адсорбционных комплексов. При израсходовании всей извести начинается растворение

части ранее возникших высокоосновных гидросиликатов кальция, переход их в низкоосновные, придающие повышенную прочность изделию. Выдержка при давлении 8 атм. составляет обычно 6...8 ч.

В период снижения давления в автоклаве до атмосферного и выпуска пара из изделия удаляется практически вся вода, внесенная в сырец конденсатом и формовочной влагой. Температура изделия понижается до 100 °С. При медленном открывании крышек автоклава и выкатке транспортных устройств с изделиями на открытый воздух происходит дальнейшее интенсивное испарение влаги из горячего изделия и снижение его температуры. После автоклавной обработки изделий продолжают процессы карбонизации свободного гидроксида кальция в готовых изделиях.

### **3.2.9. Технические требования к готовым изделиям**

1. Ячеистые бетоны должны соответствовать требованиям ГОСТ 25485-89 «Ячеистые бетоны. Технические требования» [43].

2. Классы бетона по прочности на сжатие и марки бетона по средней плотности должны быть не ниже класса (марки) по прочности В1,5 (М25) и марки по средней плотности не более D1200.

3. Фактическая прочность бетона должна соответствовать требуемой, назначаемой по ГОСТ 18105 в зависимости от нормируемой прочности бетона, указанной в заказе, и от показателей фактической однородности прочности бетона.

4. Фактическая средняя плотность бетона должна соответствовать требуемой, назначаемой по ГОСТ 27005 в зависимости от нормируемой средней плотности, указанной в заказе, и от показателей фактической однородности плотности бетона.

5. Значения усадки при высыхании, а также теплопроводности бетона должны не превышать значений, указанных в ГОСТ 25485-89 [43].

6. Отпускная влажность бетонных блоков не должна превышать (по массе) более: 25 % – на основе песка; 35 % – на основе золы и других отходов производства.

7. Марки бетона по морозостойкости должны быть в зависимости от режима их эксплуатации и расчетных зимних температур наружного воздуха в районах строительства, не менее: F25 – для блоков наружных стен; F15 – для блоков внутренних стен.

8. Соотношение марок бетона по средней плотности с классами бетона по прочности на сжатие приведено в табл. 3.3.

Таблица 3.3

*Соотношение марок бетона по средней плотности с классами бетона по прочности на сжатие*

Марка бетона по средней плотности	D500	D600	D700	D800	D900	D1000	D1100	D1200
Класс бетона по прочности на сжатие, не менее	B3,5	B5	B5	B7,5	B7,5*	B7,5*	B10*	B12,5*
	B2,5	B3,5	B3,5	B5	B5*	B5*	B7,5*	B10*
	B2	B2,5	B2,5	B3,5	B3,5*	–	–	–
	B1,5	B2	B2*	B2,5	B2,5*	–	–	–

\* Показатели класса по прочности на сжатие относятся только к блокам из бетона неавтоклавного твердения.

### **3.3. Лабораторный практикум по теме: «Технология ячеистого бетона»**

*Цель лабораторной работы:* исследование процессов получения и свойств ячеистого бетона (с использованием традиционного и нетрадиционного сырья).

*Методика выполнения работы*

Основные этапы выполнения лабораторной работы:

1. Характеристика свойств и подготовка сырьевых материалов для получения ячеистого бетона.
2. Расчет состава, приготовление, исследование свойств ячеистобетонной массы и формование образцов ячеистого бетона.
3. Тепловлажностная обработка ячеистобетонных образцов-изделий (пропаривание и / или / запаривание).
4. Определение свойств готовых образцов ячеистого бетона.

#### **3.3.1. Характеристика свойств и подготовка сырьевых материалов для получения ячеистого бетона**

На данном этапе работы приводится полная характеристика свойств сырьевых материалов, используемых в работе, с оценкой пригодности их для технологии ячеистого бетона в соответствии с требованиями, предъявляемыми к сырьевым материалам для производства силикатного кирпича.

Сырьевые материалы подвергаются необходимой подготовке в соответствии с их свойствами, приводится полное описание этих процессов с указанием их особенностей и последовательности проведения.

### Приборы и материалы для выполнения лабораторной работы

1. Цемент, известь, кварцевый песок, полуводный гипс (или другие сырьевые материалы).
2. Фарфоровая ступка, пестик.
3. Сито № 0,21.
4. ПСХ-2 (прибор для определения удельной поверхности).
5. Шаровая лабораторная мельница.
6. Технические весы.
7. Сушильный шкаф.

### Проведение испытаний

Сырьевые материалы при необходимости высушиваются в сушильном шкафу до постоянной массы. Известь и песок измельчаются отдельно вручную в фарфоровой ступке или в лабораторной шаровой мельнице. Тонина помола извести –  $S_{уд} = 3500 \dots 4000 \text{ см}^2/\text{г}$  (по ПСХ-2) или полное прохождение через сито № 0,21. Песок измельчается до удельной поверхности, рекомендованной для изготовления ячеистых бетонов различной плотности, табл. 3.4. Подготовленные сырьевые материалы складываются в эксикаторе в отдельных пакетах.

Таблица 3.4

*Зависимость удельной поверхности кремнеземистого компонента от объемной плотности ячеистого бетона*

Объемная плотность ЯБ, кг/м <sup>3</sup>	≥ 800	700	600	≤ 500
Удельная поверхность кремнеземистого компонента, см <sup>2</sup> /г	1200...1500	2000...2300	2300...2700	2700...3000

### 3.3.2. Расчет состава, приготовление, исследование свойств ячеистобетонной массы и формование образцов ячеистого бетона

*Подбор состава ячеистого бетона* складывается из следующих этапов:

- выбор вариантов соотношений между кремнеземистым компонентом и вяжущим веществом;
- определение исходного В/Т;
- расчет расхода сырьевых материалов на один замес массы ячеистого бетона и подсчет теоретической средней плотности свежизготовленной ячеистой смеси и соответствующей заданной плотности бетона в сухом состоянии.

### Выбор соотношения между кремнеземистым компонентом и вяжущим веществом

Количество вяжущего вещества и кремнеземистого компонента оказывает большое влияние на физико-механические характеристики ячеистого бетона – плотность и прочность.

Неправильно выбранное соотношение составляющих может привести к осадке ячеистой массы и снижению прочности изделий.

Соотношение между кремнеземистым компонентом и вяжущим веществом (*C*) при приготовлении замесов выбирают по табл. 3.5.

Таблица 3.5

*Варианты значений «С» для различных видов ячеистого бетона*

Вид ячеистого бетона	Значения <i>C</i>				
	1	2	3	4	5
Автоклавный с применением извести активностью 70 %	2,4	2,7	3,0*	3,3	3,6
То же, с применением портландцемента или известково-шлакового цемента	0,75	1,0*	1,25	1,5	1,75
То же, с применением смешанного вяжущего или нефелинового цемента	1,0	1,25	1,5*	1,75	2,0
Неавтоклавный ЯБ с применением портландцемента или смешанного вяжущего	0,5	0,75*	1,0	1,25	1,5

*Примечание.*

1. Для извести активности *A*, %, варианты *C* находят умножением табличных данных на величину  $A/70$ .
2. Исходную долю извести *n* в смешанном (цементно-известковом) вяжущем принимают для автоклавных бетонов в количестве 10...50 %; то же, для неавтоклавных – 5...25 %.
3. В данной лабораторной работе соотношение цемент : известь принять равным 9 : 1.

\* Предпочтительное значение *C* для каждого вида ячеистого бетона.

При выполнении данной лабораторной работы принять расход сырьевых материалов, рассчитанный при выполнении индивидуального расчетного задания № 1.

### Определение исходного водотвердого отношения

В/Т-отношение исследуемых в лаборатории ячеистобетонных масс определяют исходя из условий получения оптимальной консистенции ячеистой смеси, при которой обеспечивается ее необходимая вязкость.

Повышенная или пониженная вязкость ячеистой смеси против оптимальной приводит к перерасходу порообразователей (разрушение пены, прорыв газов), а в ряде случаев и невозможности получения ячеистого бетона заданной плотности.

Количество воды, необходимое для приготовления ячеистой смеси оптимальной консистенции, зависит от вида вяжущего вещества и кремнеземистого компонента, их тонкости помола и соотношения, вида порообразователя и заданной плотности ячеистого бетона.

За исходное В/Т принимают такую величину, которая соответствует значению текучести ячеистой суспензии из затворенных минеральных веществ, приведенному в табл. 3.6.

Таблица 3.6

*Текучесть песчано-вяжущей суспензии для определения исходного В/Т-отношения*

Средняя плотность ячеистого бетона в сухом состоянии, кг/м <sup>3</sup>	Текучесть суспензии, см	
	пенобетона	газобетона
400	34	34
500	30	30
600	26	26
700	24	22
900	20	15

### Приборы и материалы для выполнения лабораторной работы

1. Цемент, известь, кварцевый песок, полуводный гипс (или другие сырьевые материалы).
2. Чашка и шпатель (ложка) для приготовления ячеистобетонной массы.
3. Технические весы.
4. Аналитические весы.
5. Вискозиметр Суттарда.

### Проведение испытаний

В отдельную чашку (стакан) для приготовления алюминиевой суспензии наливается часть воды (от общего рассчитанного количества воды) и добавляются стеарат натрия (жидкое мыло) и порошок алюминиевой пудры, предварительно взвешенный на аналитических весах, и суспензия тщательно перемешивается.

При подборе состава и изготовлении газобетона с применением в качестве газообразователя алюминиевой пудры следует иметь в виду, что для нормального прохождения процессов газообразования и вспучивания температура ячеистой смеси обеспечивается введением воды затворения, подогретой до температуры 70...80 °С, поэтому при определении оптимальной консистенции смеси следует применять подогретую до этой температуры воду.

Температура раствора для получения газосиликата 30...45 °С. Отношение количества воды, взятой для затворения ячеистой массы, при котором получился требуемый расплав раствора на приборе Суттарда, к массе сухих компонентов есть исходное значение В/Т. В/Т принимают за исходное, если полученная текучесть раствора отклоняется от данных табл. 5 не более чем на ± 3 см.

Упрощенный расчет расхода сырьевых материалов на один замес массы ячеистого бетона. Расход материалов (кг) подсчитывают по следующим формулам.

Вяжущий компонент:

$$P_{ц} = \frac{\rho_{\text{сух}}}{K \cdot (1 + C)} \cdot V. \quad (3.14)$$

В том числе:

$$\text{известь} \quad P_{и} = P_{\text{вяж}} \cdot n; \quad (3.15)$$

$$\text{цемент} \quad P_{ц} = P_{\text{вяж}} - P_{и}. \quad (3.16)$$

Кремнеземистый компонент:

$$P_{к} = P_{\text{вяж}} \cdot C. \quad (3.17)$$

Полуводный гипс:

$$P_{г} = 0,03 \cdot P_{\text{вяж}}. \quad (3.18)$$

Расход воды:

$$B = (P_{\text{вяж}} + P_{к} + P_{г}) \cdot V/T, \quad (3.19)$$

где  $\rho_{\text{сух}}$  – заданная плотность ячеистого бетона в сухом состоянии, кг/дм<sup>3</sup>;

$K$  – коэффициент, учитывающий увеличение массы сухой смеси при твердении за счет связанной воды, принимаемый равным 1,1;

$V$  – объем замеса, дм<sup>3</sup>;

$C$  – число частей по массе кремнеземистого компонента, приходящихся на 1 ч по массе вяжущего вещества;

$n$  – число частей по массе извести, приходящихся на 1 ч по массе вяжущего вещества.

Теоретический расход газообразователя (алюминиевой пудры) при изготовлении газобетона можно определить исходя из реакции газовойделения:



По этому уравнению 54 г алюминия выделяют 3 грамм-молекулы (или 6 г) водорода; так как объем каждой грамм-молекулы газа при нормальном давлении равен 22,4 дм<sup>3</sup>, то весь выделившийся водород займет объем 22,4 · 3 = 67,2 дм<sup>3</sup>. Следовательно, 1 г алюминиевой пудры выделяет водород в количестве 67,2 : 54 = 1,25 дм<sup>3</sup>.

Так как температура газобетонной смеси в момент газовойделения равна примерно 40 °С, то объем водорода, дм<sup>3</sup>, выделяемого 1 г алюминиевой пудры, по закону Гей-Люссака будет:

$$V_t = V_0 \left( 1 + \frac{1}{273} t \right) = 1,25 \left( 1 + \frac{1}{273} 40 \right) = 1,42, \quad (3.21)$$

тогда расход алюминиевой пудры составит:

$$A_T = \frac{V_{\text{пор}}}{V_t}, \quad (3.22)$$

где  $V_{\text{пор}}$  – объем пор в ячеистом бетоне, дм<sup>3</sup>;

$$V_{\text{пор}} = V - (P_{\text{ц}} / \rho_{\text{ц}} + P_{\text{и}} / \rho_{\text{и}} + P_{\text{к}} / \rho_{\text{к}} + B / 1000), \quad (3.23)$$

где  $V$  – объем ячеистого бетона, дм<sup>3</sup>;

$P_{\text{ц}}$ ,  $P_{\text{и}}$ ,  $P_{\text{к}}$  – расход цемента, извести и кремнеземистого компонента на объем  $V$  ячеистого бетона, кг;

$\rho_{\text{ц}}$ ,  $\rho_{\text{и}}$ ,  $\rho_{\text{к}}$  – истинные плотности этих материалов, которые с достаточной для расчетов точностью можно принять равными, кг/дм<sup>3</sup>: для цемента – 3,1; извести – 2,5; песка – 2,6; золы – 2,0;

$B$  – количество воды, необходимой для приготовления заданного объема ячеистого бетона, кг.

Практический расход алюминиевой пудры рассчитывается по формуле:

$$A_{\text{п}} = \frac{A_T}{K_{\text{исп}}}, \quad (3.24)$$

где  $A_T$  – теоретический расход алюминиевой пудры;

$K_{\text{исп}}$  – коэффициент использования алюминиевой пудры,  $K_{\text{исп}} = 0,85$ .

*Сырьевые материалы* в соответствии с проведенными ранее расчетами состава ячеистобетонной массы взвешиваются на технических весах, тщательно перемешиваются всухую, а затем с водой и алюминиевой суспензией в течение 1...2 мин до образования хорошо смешанной сметанообразной массы.

Воду для первого пробного замеса принимают в количестве 50 % для газобетона от массы сухой смеси. Для определения текучести раствора на вискозиметре Суттарда требуется 0,4 кг сухой смеси исходного состава (с заданным соотношением вяжущего вещества и кремнеземистого компонента).

*Определение текучести ячеистобетонной массы.* Текучесть суспензии определяют по ее расплыву (см) на вискозиметре Суттарда. Вискозиметр Суттарда состоит из металлического цилиндра с внутренним диаметром 5 см, высотой 10 см и квадратного листового стекла со стороной 45 см. На стекло или бумагу, подкладываемую под стекло, нанесены через каждые 0,5...1 см концентрические окружности диаметром от 6 до 30 см. Перед испытанием цилиндр и стекло протирают тканью, смоченной чистой водой. Стекло кладут строго горизонтально, а цилиндр устанавливают в центре концентрических окружностей так, чтобы внешний контур цилиндра совпал с окружностью диаметром 6 см.

Испытываемую песчано-вяжущую суспензию наливают в цилиндр доверху, а поверхность ее сравнивают с краями цилиндра ножом или металлической линейкой. Затем цилиндр резким движением поднимают вертикально вверх; при этом суспензия растекается по стеклу в виде лепешки, диаметр которой обуславливает его консистенцию.

Оптимальный расход воды на изготовление ячеистого бетона определяют по результатам испытаний ряда пробных замесов с различными значениями В/Т-отношения. Так, например, при исходном В/Т, равном 0,50, пробные замесы выполняют со следующими значениями В/Т-отношения: 0,46; 0,48; 0,50; 0,52.

#### **Подсчет теоретической плотности свежеизготовленной ячеистой смеси**

Теоретическую плотность свежеизготовленной ячеистой смеси, соответствующую заданной плотности ячеистого бетона в сухом состоянии, подсчитывают по формуле:

$$\rho_{\text{т}} = [\rho_{\text{сух}} (1 + \text{В/Т}) + \text{В}_{\text{п}}] / \text{К}, \quad (3.25)$$

где  $\rho_{\text{т}}$  – теоретическая плотность свежеизготовленной ячеистой смеси, кг/м<sup>3</sup>;

$\rho_{\text{с}}$  – заданная плотность ячеистого бетона в сухом состоянии, кг/м<sup>3</sup>;

В/Т – исходное водотвердое отношение;

В – количество воды, введенной в смесь на 1 м<sup>3</sup> бетона, дм<sup>3</sup>;

К – коэффициент, учитывающий увеличенные массы сухой смеси в результате твердения вяжущего за счет связанной воды, принимается равным 1,1.

Для каждого замеса определяют плотность раствора  $\rho_p$ , кг/дм<sup>3</sup>, контролируют его температуру (для газобетона), а также определяют плотность ячеистой смеси после добавки порообразователя –  $\rho_{я}$ , кг/дм<sup>3</sup>.

По полученным значениям  $\rho_p$  и  $\rho_{я}$  в каждом замесе вычисляют фактическую величину пористости, создаваемую порообразователем, по формуле:

$$V_{пор}^{\phi} = 1 - \frac{\rho_{я} - P_{п}}{\rho_p}, \quad (3.26)$$

где  $P_{п}$  – расход газообразователя для ячеистого бетона, кг/дм<sup>3</sup>.

Для определения оптимальной температуры раствора (при подборе состава газобетона) готовят еще три дополнительных замеса с оптимальным В/Т, изменяя температуру раствора в пределах  $\pm 3$  °С от исходной (40 °С).

Оптимальное соотношение между кремнеземистым компонентом и вяжущим веществом находят изменением числа  $C$  оптимальными значениями В/Т и температуры раствора.

*Формование образцов ячеистого бетона.* Предварительно подсчитанное количество смеси закладывают в подготовленную (смазанную и подогретую до 40 °С) форму и закрывают прозрачной пластинкой. Вспучивание массы происходит в форме до тех пор, пока масса не заполнит весь ее объем. Пластинка предохраняет от образования у образца «горбушки» и гарантирует получение плотности не менее заданной.

Из каждого замеса формируют по 3–6 образцов. Формы для образцов должны быть хорошо очищены и смазаны соляромасляной эмульсией, а для газобетона дополнительно подогреты до температуры 40...45 °С.

Степень заполнения форм газобетонной смесью устанавливают расчетом по массе или объему.

В первом случае определяют массу газобетонной смеси  $P_{см}$ , укладываемой в форму:

$$P_{см} = 1,1(1 - V_{пор})\rho_p V_{\phi}, \quad (3.27)$$

где  $V_{\phi}$  – объем формы, дм<sup>3</sup>.

Во втором случае определяют высоту заливки  $h$  в долях или процентах от высоты формы:

$$h = 1,1(1 - V_{пор}). \quad (3.28)$$

*Приготовление пенобетонной смеси.* Пена готовится в лабораторной пенобетономешалке с объемом пеновзбивателя 15 дм<sup>3</sup>. Количество водного раствора пенообразователя (дм<sup>3</sup>) на один замес пены принимается 5...6 % от объема барабана пеновзбивателя. Время взбивания пены 5...6 мин. Затем взвешивается требуемое по расчету количество пены

5...6 мин. Затем взвешивается требуемое по расчету количество пены и вводится в уже готовый раствор при непрерывном перемешивании. Перемешивание заканчивается по получении однородной массы. Плотность пеномассы –  $\rho_{я}$  – определяется взвешиванием ее в сосуде емкостью 0,5...1 дм<sup>3</sup>.

### 3.3.3. Тепловлажностная обработка ячеистобетонных образцов-изделий

*Тепловлажностная обработка* образцов производится после 4–8-часовой их выдержки при температуре 20...25 °С. Тепловлажностная обработка проводится в лабораторном (заводском) автоклаве при температуре 174 °С, давлении 0,8 МПа по режиму 2–6(8)–2 ч или пропарочной камере при атмосферном давлении и температуре 90 °С по режиму 2–8–2 ч.

### 3.3.4. Определение свойств готовых образцов ячеистого бетона

По полученным результатам испытаний образцов проводят корректирование состава ячеистого бетона.

После тепловлажностной обработки образцы ячеистого бетона вынимаются из форм, высушиваются при температуре 105...110 °С до постоянной массы и определяются их основные свойства: объемная плотность, предел прочности при сжатии, водопоглощение.

На основании анализа свойств ячеистых образцов делается вывод о возможностях корректирования состава и технологических параметров получения ячеистого бетона заданной плотности. Для этого состава подсчитываются новые расходы материалов на 1 м<sup>3</sup> ячеистого бетона.

Результаты экспериментальных данных исследований ячеистого бетона приводятся в сводной таблице (табл. 3.7).

Таблица 3.7

*Сводная таблица экспериментальных данных исследований ячеистого бетона*

Заданная плотность ячеистого бетона, кг/м <sup>3</sup>	Соотношение между кремнеземистым компонентом и вяжущим веществом, С	В/Т	Температура раствора, °С	Плотность ЯБ-раствора, кг/м <sup>3</sup>	Фактическая плотность ячеистого бетона, кг/м <sup>3</sup>	Прочность при сжатии, МПа

### **3.4. Контрольные вопросы по основам технологии легких бетонов**

1. Классификация ячеистых бетонов.
2. Строительно-технические свойства ячеистых бетонов.
3. Назначение сырьевых материалов в составе ячеистобетонных масс.
4. Критерии выбора сырьевых материалов.
5. Технологические стадии и основные процессы технологии ячеистого бетона.
6. Особенности подготовки сырьевых материалов в производстве ячеистого бетона.
7. Приготовление ячеистобетонных масс, реологические свойства, способы их регулирования.
8. Физико-химические процессы поризации ячеистобетонных масс.
9. Процессы и методы формования ячеистого бетона.
10. Химические процессы при тепловлажностной обработке ячеистого бетона.
11. Особенности химических процессов, протекающих при тепловлажностной обработке ячеистых бетонов с использованием техногенных отходов.
12. Качество ячеистых бетонов и факторы, их определяющие.
13. Критерии оценки качества ячеистых бетонов.
14. Взаимосвязь структуры и свойств ячеистого бетона.
15. Технологическая схема производства стеновых материалов из ячеистого бетона.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Хавкин Л.М. Технология силикатного кирпича. – М.: Стройиздат, 1982.
2. ГОСТ 8736-93. «Песок для строительных работ». Технические условия [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.gosthelp.ru/gost/gost4093.html> (дата обращения: 27.11.2014).
3. ОСТ 21-1-80. «Песок для производства силикатных изделий автоклавного твердения». Технические требования.
4. Бутт Ю.М., Сычев М.М., Тимашев В.В. Химическая технология вяжущих материалов: учебник. – М.: Высшая школа, 1980. – 472 с.
5. ГОСТ 9179-77 «Известь строительная». Технические условия [Электронный ресурс]. – URL: <http://vsegost.com/Catalog/33/33528.shtml> (дата обращения: 27.11.2014).
6. Смиренская В.Н., Антипина С.А. Исследование процессов получения и свойств силикатного кирпича. Методические указания к лабораторному практикуму и самостоятельной работе по курсу «Физико-химические основы технологии вяжущих и изделий на их основе» для студентов 5 курса ХТФ специальности 240304 (250800) «Химическая технология тугоплавких неметаллических и силикатных материалов». – Томск: Изд-во ТПУ, 2007. – 32 с.
7. Боженков П.И. Технология автоклавных материалов. – Л.: Стройиздат, 1978.
8. ГОСТ 379-79 «Кирпич и камни силикатные». Технические условия [Электронный ресурс]. – URL: <http://vsegost.com/Catalog/72/7203.shtml> (дата обращения: 27.11.2014).
9. Мамонтов С.Д. Бессилосная технология силикатного кирпича. – М.: Стройиздат, 1975.
10. Вахнин М.П., Анищенко А.А. Производство силикатного кирпича. – М.: Высшая школа, 1989. – 191 с.
11. Бутт Ю.М., Тимашев В.В. Практикум по химической технологии вяжущих материалов. – М.: Стройиздат, 1973.
12. Баженов Ю.М. Технология бетона / Ю.М. Баженов. – М.: Изд-во АСВ, 2011. – 528 с.
13. Бужевич Г.А. Легкие бетоны на пористых заполнителях. – М.: Стройиздат, 1970. – 272 с.
14. Батраков В.Г. Модифицированные бетоны. – М., 1998. – 768 с.

15. Смиренская В.Н. Химическая технология / В.Н. Смиренская, С.А. Антипина, С.Н. Соколова. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2009. – 200 с.
16. ГОСТ 310.3-76 Цементы. Методы определения нормальной плотности, сроков схватывания и равномерности изменения объема [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.vashdom.ru/gost/3103-76/> (дата обращения: 27.11.2014).
17. ГОСТ 30744-2001 Методы испытаний с использованием полифракционного песка [Электронный ресурс]. – URL: <http://vsegost.com/Catalog/38/38013.shtml> (дата обращения: 27.11.2014).
18. ГОСТ 10178-85 Портландцемент и шлакопортландцемент. технические условия [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.vashdom.ru/gost/10178-85/> (дата обращения: 27.11.2014).
19. Сторк Ю. Теория подбора состава бетонной смеси / Ю. Сторк – Л.: Изд-во литературы по строительству, 1971. – 236 с.
20. Шмигальский В.Н. Оптимизация состава цементобетонов / В.Н. Шмигальский. – Кишинев: Штиинца, 1981. – 124 с.
21. Баженов Ю.М. Мелкозернистые бетоны: учебное пособие / Ю.М. Баженов, У.Х. Магдеев, Л.А. Алимов, В.В. Воронин, Л.Б. Гольденберг. – М.: Типография МГСУ, 1998. – 148 с.
22. Ицкович С.М., Чумаков Л.Д., Баженов Ю.М. Технология заполнителей бетона: учебник для строительных вузов. – М.: Высшая школа, 1991.
23. Ерофеев П.С. Оптимизация составов бетонов с применением численного моделирования: дис. ... канд. техн. наук: 05.23.05. – Саранск, 2007. – 167 с.
24. ГОСТ 8267-93 Щебень и гравий из плотных горных пород для строительных работ. Технические условия [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.vashdom.ru/gost/8267-93/> (дата обращения: 27.11.2014).
25. Красный Д.Ю., Красный Ю.М. Обеспечение качества при возведении зданий и сооружений из монолитного железобетона. – Екатеринбург: Центр качества строительства, 2003. – 448 с.
26. Ратинов В.Б. Добавки в бетон / В.Б. Ратинов, Г.И. Розенберг. – М.: Стройиздат, 1989. – 207 с.
27. Тарасова А.Ю. Бетонные смеси высокой подвижности с золой-уноса для транспортного строительства: дис. ... канд. техн. наук: 05.23.05. – Москва, 2009. – 167 с.
28. ГОСТ 23732-2011 Вода для бетонов и строительных растворов. Технические условия (EN 1008:2002, NEQ, EN 206-1:2000, NEQ). – М.: Стандартинформ, 2012.

29. Бутт Ю.М., Рашкович Л.Н. Твердение вяжущих при повышенных температурах. – М.: Стройиздат, 1965.
30. Баженов Ю.М. Технология бетона: учебное пособие для технологических специальностей строительных вузов. – М.: Высшая школа, 1987.
31. ГОСТ 26633-91 Бетоны тяжелые и мелкозернистые. Технические условия [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.vashdom.ru/gost/26633-91/> (дата обращения: 27.11.2014).
32. Баженов Ю.М. Способы определения состава бетона различных видов / Ю.М. Баженов. – М.: Стройиздат, 1975. – 310 с.
33. Баженов Ю.М. Технология бетонных и железобетонных изделий / Ю.М. Баженов, А.Г. Комар. – М.: Стройиздат, 1984. – 672 с.
34. Попов Л.Н. Лабораторный контроль строительных материалов и изделий: справочник / Л.Н. Попов. – М.: Стройиздат, 1986. – 349 с.
35. ГОСТ 10181-2000 Смеси бетонные. Методы испытаний. – М.: Госстрой России, ГУП ЦПП, 2001.
36. Белан В.И. Строительные материалы / В.И. Белан, А.Н. Проталинский. – М.: Изд-во Ассоциации строительных вузов, 1998. – 271 с.
37. Кудяков А.И. Основы технологического проектирования заводов сборного железобетона. Часть 1 / А.И. Кудяков. – Томск: Изд-во Томск. ун-та, 1983. – 262 с.
38. Бурлаков Г.С. Технология изделий из легкого бетона: учеб. пособие для вузов. – 2-е изд., перераб. и доп. / Г.С. Бурлаков – М.: Высш. шк., 1986. – 296 с.
39. Горлов Ю.П. Технология теплоизоляционных и акустических материалов и изделий / Ю.П. Горлов. – М.: Высшая школа, 1989. – 384 с.
40. Гладков Д.И. Новая технология легких бетонов // Строительные материалы. – 1994. – № 4. – С. 16.
41. Горяйнов К.Э., Агафонова Л.А., Липатов П.Е. Ячеистый бетон с применением комплексного порообразователя // Строительные материалы. – 1979. – № 1. – С. 18.
42. ГОСТ 5494-95 Пудра алюминиевая. Технические условия. [Электронный ресурс]. – URL: <http://vsegost.com/Catalog/24/2420.shtml> (дата обращения: 27.11.2014).
43. ГОСТ 25485-89 Бетоны ячеистые. Технические условия.
44. ОСТ 21-60-84 Зола-унос для производства изделий из ячеистого бетона. Технические условия.
45. Инструкция по изготовлению изделий из ячеистого бетона СН 277-80. – М.: Стройиздат, 1981.

Учебное издание

АНТИПИНА Светлана Анатольевна  
МИТИНА Наталия Александровна

# ОСНОВЫ ТЕХНОЛОГИИ СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ ВЯЖУЩИХ ВЕЩЕСТВ

Учебное пособие

Корректурa *В.Ю. Пановица*  
Компьютерная верстка *В.Д. Пяткова*  
Дизайн обложки *Т.В. Буланова*

Подписано к печати 15.12.2014. Формат 60x84/16. Бумага «Снегурочка».  
Печать XEROX. Усл. печ. л. 7,45. Уч.-изд. л. 6,73.  
Заказ 1236-14. Тираж 100 экз.



Национальный исследовательский Томский политехнический университет  
Система менеджмента качества  
Издательства Томского политехнического университета  
сертифицирована в соответствии с требованиями ISO 9001:2008



**ИЗДАТЕЛЬСТВО**  **ТПУ**. 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30  
Тел./факс: 8(3822)56-35-35, [www.tpu.ru](http://www.tpu.ru)