

Л.Д. Шахова

# ТЕХНОЛОГИЯ ПЕНОБЕТОНА

ТЕОРИЯ И ПРАКТИКА



**Л.Д. Шахова**

# **ТЕХНОЛОГИЯ ПЕНОБЕТОНА**

**ТЕОРИЯ И ПРАКТИКА**



Издательство Ассоциации строительных вузов

Москва

2010

**Рецензенты:** заслуженный деятель науки РФ, доктор технических наук, профессор Московского государственного строительного университета *Г.П. Сахаров*; доктор технических наук, профессор Пензенского государственного архитектурно-строительного университета *В.И. Логанина*.

**Шахова Л.Д.**

ТЕХНОЛОГИЯ ПЕНОБЕТОНА. ТЕОРИЯ И ПРАКТИКА. Монография. – М.: Издательство Ассоциации строительных вузов, 2010. – 248 с.

**ISBN 978-5-93093-740-4**

В данном издании рассмотрены основные физико-химические и механические процессы поризации цементных систем и закономерности формирования поризованного цементного композиционного материала – пенобетона. Изложены теоретические основы поведения компонентов, входящих в композицию, на границе раздела фаз, свойства ПАВ и пенообразователей различной природы, поведение их в двух- и трехфазных дисперсных системах. Дана сравнительная оценка как общих, так и специфических свойств отечественных и зарубежных пенообразователей для получения пенобетонов. Рассмотрены технологические особенности получения пенобетонов с применением различных сырьевых материалов и технологий.

Для широкого круга специалистов, занимающихся теоретическими вопросами и промышленным выпуском пенобетонов, разработкой пенообразующих составов для промышленности строительных материалов.

**ISBN 978-5-93093-740-4**

© Шахова Л.Д., 2010

© Издательство АСВ, 2010

# Содержание

<b>Предисловие</b> .....	<b>6</b>
<b>Введение</b> .....	<b>8</b>
<b>1. ОСНОВНЫЕ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА НЕАВТОКЛАВНЫХ ПЕНОБЕТОНОВ</b> .....	<b>10</b>
<b>2. ХАРАКТЕРИСТИКА ПОВЕРХНОСТИ РАЗДЕЛА В ТРЕХФАЗНЫХ СИСТЕМАХ</b> .....	<b>15</b>
2.1. Характеристика поверхностей раздела.....	15
2.1.1. Поверхностные явления в жидкой фазе.....	18
2.1.2. Поверхностные явления на поверхности твердых тел.....	18
2.1.3. Поверхностные явления в системе «вода – klinkерные минералы».....	20
2.1.4. Устойчивость системы «вода – минеральные частицы».....	23
2.1.5. Поверхностные явления в системе «водный раствор – ПАВ».....	28
2.2. Свойства пен.....	29
2.2.1. Механизм получения пен.....	29
2.2.2. Структура пен.....	31
2.2.3. Свойства пенных систем.....	34
2.2.4. Устойчивость пен.....	36
2.3. Поверхностные явления в системе «водный раствор ПАВ – минеральные частицы».....	50
2.4. Поверхностные явления в системе «твердое тело – раствор ПАВ – газ».....	54
2.5. Условия равновесия трехфазных пен.....	57
2.6. Флотационные явления в трехфазных пенах.....	58
<b>3. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О ПЕНООБРАЗУЮЩИХ ПОВЕРХНОСТНО-АКТИВНЫХ ВЕЩЕСТВАХ</b> .....	<b>63</b>
3.1. Классификация ПАВ.....	63
3.1.1. Классификация ПАВ по химической структуре.....	64
3.1.2. Классификация высокомолекулярных ПАВ.....	64
3.1.3. Классификация ПАВ по физико-химическому механизму.....	66

3.2. Строение молекул низкомолекулярных пенообразователей .....	67
3.3. Строение молекул высокомолекулярных пенообразователей .....	69
3.4. Физико-химические свойства ПАВ .....	74
3.4.1. Адсорбционная активность ПАВ .....	74
3.4.2. Поверхностное натяжение ПАВ .....	76
3.4.3. Строение пленок .....	77
3.5. Состояние адсорбированного ПАВ на границе жидкость – твердое тело и в растворах .....	81
3.6. Свойства смесей ПАВ .....	88
3.7. Отличительные свойства низкомолекулярных и высокомолекулярных ПАВ и механизм образования пленок .....	90
3.8. Характеристики пенообразователей для пенобетонов .....	95
3.8.1. История применения пенообразователей в производстве пенобетона .....	95
3.8.2. Классификация пенообразователей для пенобетонов .....	98
3.9. Особенности синтетических пенообразователей .....	101
3.10. Особенности протеиновых пенообразователей .....	103

#### **4. ОСНОВНЫЕ ФАКТОРЫ, ВЛИЯЮЩИЕ НА ФОРМИРОВАНИЕ ОПТИМАЛЬНОЙ ПОРИЗОВАННОЙ СТРУКТУРЫ ЦЕМЕНТНОГО РАСТВОРА..... 104**

4.1. Основные теоретические положения поризованной структуры .....	104
4.2. Исследования процессов формирования пенной структуры .....	110
4.3. Реология пен .....	121
4.4. Влияние минеральных добавок на устойчивость пен .....	129
4.5. Реологические исследования пеноцементных систем .....	136
4.6. Реологические исследования пеноцементо-минеральных систем.....	142
4.7. Влияние вещественного и минералогического составов цемента на физико-механические характеристики пенобетона и принципы подбора вяжущего для пенобетона .....	150
4.8. Выбор оптимальной концентрации пенообразователя .....	163
4.9. Изучение возможности применения технологических добавок в технологии пенобетона .....	164

4.10. Подбор оптимальных составов смесей для получения теплоизоляционного пенобетона с помощью метода математического планирования эксперимента.....	167
4.11. Режимы твердения пенобетона .....	177
<b>5. ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ГИДРАТАЦИИ В ЦЕМЕНТНЫХ ПОРИЗОВАННЫХ СИСТЕМАХ .....</b>	<b>183</b>
<b>6. МОДЕЛИ ОБРАЗОВАНИЯ ПЕНОЦЕМЕНТОМИНЕРАЛЬНЫХ СИСТЕМ .....</b>	<b>202</b>
<b>7. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ СПОСОБЫ ПОЛУЧЕНИЯ ТРЕХФАЗНЫХ ПЕН (ПЕНОЦЕМЕНТНЫХ СМЕСЕЙ) .....</b>	<b>211</b>
7.1. Классификации способов поризации.....	211
7.2. Методы получения пен.....	216
7.3. Анализ существующих технологий пенобетонов .....	221
7.3.1. Классификация технологий получения пенобетонов.....	221
7.3.2. Классический способ.....	222
7.3.3. Способ сухой минерализации .....	226
7.3.4. Баротехнология .....	227
7.3.5. Способ аэрации .....	230
7.3.6. Турбулентно-кавитационный способ под давлением .....	232
7.3.7. Способ «обжатие – релаксация» в непрерывном режиме .....	233
<b>Заключение .....</b>	<b>236</b>
<b>Библиографический список.....</b>	<b>239</b>

## ПРЕДИСЛОВИЕ

---

В условиях структурной перестройки строительного комплекса большую роль играет сокращение доли крупнопанельных домов и увеличение доли монолитных зданий в 1,5 раза, жилья с использованием ячеистых бетонов – в 4,5 раза, зданий смешанных систем – в 1,5 раза. Наиболее эффективно в настоящее время во всех регионах России развивается производство конструкционно-теплоизоляционного и теплоизоляционного пенобетона. Этому способствуют простота технологии, доступность сырьевых материалов, относительно невысокая себестоимость и хорошие теплоизоляционные свойства. Причем из неавтоклавного пенобетона можно изготавливать крупные блоки, а также применять его для монолитного домостроения. Широко известен пример изготовления и использования теплоизоляционного неавтоклавного пенобетона в мировой практике немецкой фирмой «Неопор».

Пенобетон – легкий ячеистый бетон, получаемый в результате твердения раствора, состоящего из цемента, песка, воды и строительной пены. Процесс получения неавтоклавного пенобетона прост: дозирование исходных сырьевых материалов, приготовление пенобетонной смеси и укладка ее в подготовленную форму, твердение изделий. Но при видимой простоте технологии процесс формирования макроструктуры ячеистого бетона трудно поддается управлению и регулированию. Это связано с необходимостью контроля большого количества технологических параметров, поэтому действительные условия структурообразования пенобетонов часто отклоняются от оптимальных, что приводит к возникновению дефектов в его структуре (деформации и объединению пор, трещинообразованию) и колебаниям свойств, снижающих эксплуатационную стойкость некондиционных изделий.

Автором данной работы было установлено, что при неправильном выборе пенообразователя и типа цемента, а также способов получения пены и ее смешения с твердыми компонентами пена часто разрушается до момента схватывания вяжущего, пенобетонная смесь дает усадку, по высоте свежешелюженного массива идут сплошные каналы слияния пузырьков. В результате нарушается структура пенобетона, возрастает плотность готовых изделий, ухудшаются физико-технические свойства. Условием совершенствования технологии пенобетона и оптимизации его конструктивно-технических свойств явля-

ется глубокое понимание физико-химических процессов, протекающих в объеме пеноцементной системы как на макро-, так и на микроуровне с первых минут ее получения.

Длительный опыт промышленного выпуска пенобетонов разной плотности показал, что закономерности, существующие в технологии тяжелых бетонов, не применимы для поризованных бетонов, особенно низкой плотности.

Отсутствие стройной системы знаний, объясняющих способ образования макро- и микроструктуры поризованного композиционного материала, привела к необходимости изучения явлений, происходящих на поверхностях раздела трех фаз, определяющих как технологические, так и строительно-эксплуатационные свойства пенобетона.

В данной работе автор впервые сделал попытку рассмотрения физико-химических закономерностей, которые возникают в процессе создания поризованного материала с применением минеральных вяжущих: взаимосвязи структуры ПАВ и пенообразующей способности, а также влияния природы пенообразователей на некоторые технологические особенности пеноцементной смеси, процессы гидратации цемента в присутствии ПАВ и конечные свойства пенобетонов, влияния некоторых технологических особенностей получения пенобетона на его эксплуатационные характеристики. Дана классификация пенообразователей для пенобетонов, в основе которой лежит механизм формирования пенной пленки с учетом свойств ПАВ как активной основы пенообразователей.

Автор считает своим приятным долгом принести благодарность инженерам, а ныне кандидатам технических наук В.В. Балясникову, В.Н. Тарасенко, Е.С. Черноситовой, участвовавшим в проведении многочисленных экспериментальных работ, а также заслуженному деятелю науки РФ, доктору технических наук, профессору МГСУ Г.П. Сахарову за внимательное прочтение работы и ценные замечания.

Книга рассчитана на научных и инженерно-технических работников промышленности строительных материалов, а также на преподавателей, аспирантов и студентов строительных и химико-технологических вузов.



## ВВЕДЕНИЕ

---

Перед строительным комплексом России возникла необходимость снижения энергозатрат как в производстве строительных материалов и конструкций, так и при эксплуатации зданий. Одним из основных путей решения этой задачи стало существенное (в некоторых странах – до 3 раз) повышение термического сопротивления ограждающих конструкций вновь строящихся и существующих зданий [1].

Разработка вопросов, связанных с созданием экологически оптимальных условий в системе «человек – жилая среда обитания», становится в последнее время одним из важнейших направлений в строительной экологии. Основная задача новой науки аргологии, созданной на стыке архитектуры и экологии, – это формирование здорового экологически чистого жилища. Требования к экологии жилища (жилые и общественные здания) в условиях сближения отечественных и зарубежных нормативов, перехода к рыночной экономике и дифференциации запросов потребителей постоянно возрастают. Переход на многослойные конструкции с использованием пенополистирола, минеральной ваты и других теплоизоляционных материалов не всегда оправдан из-за того, что планируемый срок службы зданий, возводимых с их применением, значительно превышает фактический срок нормальной эксплуатации этих материалов. Расширение использования таких конструкций сдерживается также их недостаточной огнестойкостью, вредным экологическим воздействием на человека и рядом других факторов.

В сложившейся ситуации оптимальным решением проблемы повышения экологичности жилья и теплозащитных свойств ограждающих конструкций зданий, снижения стоимости их возведения может стать использование для их производства теплоизоляционного пенобетона. Этот материал выгодно отличается своими характеристиками от многих традиционных теплоизоляционных материалов. Возможность монолитной заливки на фоне тенденции к увеличению доли монолитно-каркасного домостроения предопределяет рост потребности в этом материале.

Из всех типов стен пенобетонные являются самыми энергосберегающими; их равновесная влажность в 4 раза меньше, чем у

деревянных стен, радиоактивность в 5 раз меньше, чем у кирпичных стен, паропроницаемость в 3 раза выше, чем у дерева, в 5 – чем у кирпича, в 10 – чем у железобетонных трехслойных панелей. Отечественный и зарубежный опыт подтверждает, что пенобетоны являются перспективным материалом конструкционного и теплоизоляционного назначения. Результаты обследования домов с конструкциями из ячеистых бетонов, прослуживших до 60 лет, показали полную сохранность этого материала и пригодность к дальнейшей эксплуатации. По установленной за рубежом градации комфортности проживания человека третье и четвертое места занимают дома из пенобетона. В сравнении с традиционным легким бетоном на пористых заполнителях пенобетон требует меньше капитальных вложений на организацию выпуска, производство менее энерго- и материалоемко, здания из пенобетона более комфортны и гигиеничны, экономичны в эксплуатации.

Изделия из пенобетона применяются в жилищном и гражданском строительстве во многих странах с различными климатическими условиями. Пенобетон активно используют в Швеции, Германии, Финляндии, Норвегии, Польше, ЮАР и в других странах, в качестве конструкционного материала в виде панелей, мелких стеновых блоков, а также как теплоизоляционный материал в монолитном строительстве.

В настоящее время превалирует промышленный выпуск теплоизоляционного пенобетона марки D900, в то время как для повышения эффективности теплозащиты необходим материал более низкой плотности. Часто получаемый пенобетон характеризуется низким уровнем стабильности основных характеристик. Все это обуславливает актуальность расширения номенклатуры, повышения качества и увеличения объемов производства монолитного теплоизоляционного пенобетона.

Опыт производства и применения пенобетона, накопленный в России и за рубежом, показывает, что правильно запроектированный и изготовленный ячеистый бетон – это качественный материал многофункционального назначения, удовлетворяющий высоким требованиям экологичности, долговечности и комфортности.

# 1. ОСНОВНЫЕ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА НЕАВТОКЛАВНЫХ ПЕНОБЕТОНОВ

---

Высокие физико-механические показатели пенобетона предопределили перспективность его применения в строительстве не только как конструкционного, но и как теплоизоляционного материала. Так, при средней плотности  $800 \text{ кг/м}^3$  пенобетон имеет прочность при сжатии до  $7,0 \text{ МПа}$ , при теплопроводности  $0,21 \text{ Вт/(м·К)}$ , что позволяет использовать его в качестве эффективного материала для стеновых конструкций [1].

На Всемирном конгрессе Международного совета по строительству (МСС) показатели стеновых и теплоизоляционных материалов были оценены в баллах, основные из них приведены в *табл. 1.1* [2].

Как видно из данных таблицы, ячеистые бетоны, и в том числе пенобетоны, отличаются высокой экологичностью, хорошими тепло- и звукоизоляционными свойствами.

Пенобетон имеет достаточную механическую прочность наряду с высокими показателями теплоизоляции при широком диапазоне плотности. Одно из достоинств технологии изготовления пенобетонов – это возможность его получения и укладки непосредственно на строительной площадке. Появилась возможность организации производства изделий на мобильных мини-заводах, максимально приближенных к районам застройки, что уменьшает транспортные расходы, позволяет предоставить дополнительные рабочие места, активизировать индивидуальное строительство.

Пенобетон может применяться для устройства стяжек под полы, утепляющих слоев чердачных перекрытий кровель и мансард, наружных и внутренних стен, для заполнения пустот в кирпичной кладке подземных стен, изоляции в пустотелых блоках, теплоизоляции труб бесканальной прокладки. Он широко используется при изготовлении сборных блоков и панелей перегородок, торкретировании куполообразных сооружений, гидроизоляции гидротехнических сооружений, омоноличивании тубинговой отделки.

Требования к основным физико-техническим показателям неавтоклавного пенобетона, согласно ГОСТ 25485-89 «Бетоны ячеистые. Технические условия», приведены в *табл. 1.2*.

**Показатели свойств стеновых и теплоизоляционных  
материалов в баллах**

Показатели свойств	Кирпич	Ячеистые бетоны, в том числе пенобетоны	Бетоны	Минвата	Пенополимеры
Коэффициент конструктивного качества	5–16	0,5–13	4–17	1	1–17
Экологическая чистота в условиях эксплуатации	5	5	5	2	1
Термическое сопротивление стены толщиной 0,5 м ( $Вт/^\circ C$ )	0,6–0,86	0,77–7,14	0,56–1	6,5–10	6,5–11,5
Коэффициент звукопоглощения	0,1–0,2	0,5–0,7	0,1–0,3	0,2–0,8	0,3–0,7
Пожароопасность	5	5	5	3	0
Обрабатываемость, гвоздимось	2	3	2	3	3
Потребность в защите от атмосферных осадков	4	3	5	0	2
<i>Итого</i> баллов	21,7–33,06	17,77–36,84	21,66–35,3	15,7–19,8	13,8–35,2
Морозостойкость (циклы)	15–50	10–75	20–200	0	0–50

Область применения пенобетона в зарубежной строительной практике значительно шире, чем мы используем для устройства монолитной тепло- и звукоизоляции по перекрытиям зданий и производства мелкоштучных стеновых блоков. Возможны и другие направления использования этой технологии и материала в строительстве:

- заполнение траншейных полостей и пустот;
- заполнение пустот при строительстве туннелей;
- формирование подстилающей подложки для автомобильных дорог;
- устройство монолитной канальной теплоизоляции теплопроводов;
- использование в рекультивации земельных участков и противооползневое укрепление грунта;
- устройство монолитных самонесущих межкомнатных перегородок;

– использование в монолитном малоэтажном и индивидуальном строительстве.

Таблица 1.2

**Показатели физико-механических свойств  
неавтоклавных пенобетонов на песке**

Вид бетона	Марка бетона по			Коэффициент теплопроводности, Вт/(м·°С), не более, бетона в сухом состоянии	Коэффициент паропроницаемости, мг(м·ч·Па), не менее	Сорбционная влажность бетона, %, не более, при относительной влажности воздуха		Усадка, мм/м
	средней плотности	прочности на сжатие	морозостойкости			75%	95%	
Теплоизоляционный	D300	–	–	0,08	0,26	8	12	Не нормируется
	D350*	–	–	–	–	–	–	
	D400	В 0,75 В 0,5	Не нормируется	0,10	0,23	8	12	
	D500	В 1 В 0,75	–  –	0,12	0,20	8	12	
Конструктивно-теплоизоляционный	D500	–	–	0,12	0,20	8	12	Не более 3,0
	D600	В 2 В 1	от F15 до F35	0,14	0,17	8	12	
	D700	В 2,5 В 2 В 1,5	от F15 до F50	0,18	0,15	8	12	
	D800	В 3,5 В 2,5 В 2	от F15 до F75	0,21	0,14	10	15	
	D900	В 5 В 3,5 В 2,5	Не нормируется	0,24	0,12	10	15	
Конструкционный	D1000	В 7,5 В 5	от F15 до F50	0,29	0,11	10	15	
	D1100	В 10 В 7,5		0,34	0,10	10	15	
	D1200	В 12,5 В 10		0,38	0,10	10	15	

Благодаря хорошей текучести пенобетонная смесь хорошо заполняет пустоты и не требует виброуплотнения, что дает экономию энергозатрат 15–20% при ее укладке. Транспортировка поризованной смеси может производиться по трубам с помощью сжатого воздуха (пневмоподача) или героторным насосом. Дальность подачи поризованной смеси по горизонтали – 50 м, по вертикали – 15 м.

Сравнительные физико-технические показатели традиционных строительных материалов и неавтоклавного пенобетона приведены в *табл. 1.3*.

*Таблица 1.3*

**Сравнительные характеристики стеновых материалов**

Показатели	Кирпич строительный		Строительные блоки		Пенобетон (неавтоклавный)
	глиняный	силикатный	керамзитобетон	газобетон (автоклавный)	
Плотность, кг/м <sup>3</sup>	1550–1700	1700–1950	900–1200	300–1200	300–1200
Масса одного м <sup>2</sup> стены, кг	1200–1800	1450–2000	500–900	90–900	90–900
Теплопроводность, Вт/(м·К)	0,6–0,95	0,85–1,15	0,75–0,95	0,07–0,38	0,07–0,38
Морозостойкость, цикл	25	25	25	35	35–75
Удельный расход топлива, кг усл. топ. (тыс. шт. усл. кирп.)	246	60–80	35	65	–
Удельный расход электроэнергии, кВт·ч (тыс. шт. усл. кирп.)	80–82	36–38	30–32	35	4,0 <sup>1</sup>
Водопоглощение, % по массе	12	16	18	20	14
Предел прочности при сжатии, МПа	2,5–25	5–30	3,5–7,5	0,15–25	0,10–12,5

В то же время, как показывает практика изготовления пенобетона, строительные-технические свойства конечного продукта в силь-

<sup>1</sup> Установка УМПБ, разработанная АО «Строминноцентр-XXI».

ной степени зависят от качества исходного сырья, метода воздухововлечения, условий твердения бетона и др.

В работе [3] приведены сводные данные по показателям качества пенобетона, полученного по разным технологиям (табл. 1.4). Как показывают результаты, разброс значений по прочности очень велик, что еще раз свидетельствует о влиянии на физико-механические характеристики пенобетона множества факторов, к которым можно отнести характеристики исходного сырья, технологию воздухововлечения. Кроме того, затраты на производство пенобетона в 1,4–1,8 раза ниже, чем ячеистого газобетона [4].

Таблица 1.4

**Физико-механические показатели неавтоклавного пенобетона**

Показатели	Средняя плотность пенобетона, кг/м <sup>3</sup>					
	400	500	600	700	800	900
Класс бетона по прочности на сжатие	B 1 <sup>1</sup> B 0,5 <sup>1</sup>	B 1,5 <sup>1</sup>	B 2,6 <sup>1</sup>	–	–	–
	B 0,75 <sup>2</sup>	B 0,75 <sup>2</sup> B 1 <sup>2</sup>	B 1,5 <sup>2</sup> B 2 <sup>2</sup>	B 1,5 <sup>2</sup> B 2 <sup>2</sup> B 2,5 <sup>2</sup>	B 2 <sup>2</sup> B 3,5 <sup>2</sup>	B 2,5 <sup>2</sup> B 3,5 <sup>2</sup> B 5 <sup>2</sup>
	B 1 <sup>3</sup>	B 1 <sup>3</sup>	B 1,5 <sup>3</sup>	B 2 <sup>3</sup>	B 2,5 <sup>3</sup>	B 3 <sup>3</sup>
Средняя прочность, МПа	1,57 <sup>1</sup>	2,37 <sup>1</sup>	3,64 <sup>1</sup>	–	–	–
	0,7–1,2 <sup>2</sup>	1,1–2 <sup>2</sup>	1,4–2,5 <sup>2</sup>	2,2–3,6 <sup>2</sup>	3–7 <sup>2</sup>	3,5–10 <sup>2</sup>
	1,5 <sup>3</sup>	1,5 <sup>3</sup>	2,2 <sup>3</sup>	–	3,5 <sup>3</sup>	4 <sup>3</sup>
Теплопроводность в сухом состоянии, Вт/(м·°С)	0,12 <sup>1</sup>	0,14 <sup>1</sup>	0,16 <sup>1</sup>	–	–	–
	0,1 <sup>2</sup>	0,12 <sup>2</sup>	0,14 <sup>2</sup>	0,18 <sup>2</sup>	0,21 <sup>2</sup>	0,24 <sup>2</sup>
	0,07 <sup>3</sup>	0,12 <sup>3</sup>	0,14 <sup>3</sup>	0,168 <sup>3</sup>	0,2 <sup>3</sup>	0,24 <sup>3</sup>
Сорбционная влажность, % при φ = 75%	8,4 <sup>1</sup>	8,3 <sup>1</sup>	8,2 <sup>1</sup>	–	–	–
	– 5 <sup>3</sup>	– 4,7 <sup>3</sup>	– 4,4 <sup>3</sup>	– 4,1 <sup>3</sup>	– 3,8 <sup>3</sup>	– 3,5 <sup>3</sup>
Морозостойкость, циклы	–	25 <sup>1</sup>	>35 <sup>1</sup>	–	–	–
Усадка при высыхании, мм/м	–	1,7 <sup>1</sup>	1,8 <sup>1</sup>	–	–	–

Перечисленные достоинства технологии и изделий из пенобетона свидетельствуют о преимуществах использования пенобетона во многих направлениях в качестве дешевого теплоизоляционного, негорючего, экологически чистого материала.

<sup>1</sup>Данные НИИЖБ;

<sup>2</sup>Данные ООО «Строминноцентр»;

<sup>3</sup>Данные МГСЦ.

## 2. ХАРАКТЕРИСТИКА ПОВЕРХНОСТИ РАЗДЕЛА В ТРЕХФАЗНЫХ СИСТЕМАХ

---

### 2.1. Характеристика поверхностей раздела

**Поверхностные явления.** До момента затвердевания пенобетонная смесь является гетерогенной системой, включающей твердую, жидкую и газообразную фазы, которые образуют поверхности раздела: жидкость – газ (Ж–Г), жидкость – твердое тело (Ж–Т) и твердое тело – газ (Т–Г).

Поверхностное натяжение является одним из физических параметров вещества. *Поверхностное натяжение* жидкостей представляет собой работу, необходимую для образования единицы новой поверхности, и *характеризуется силой*, приложенной к единице длины контура, ограничивающего поверхность, и направленной вдоль этой поверхности перпендикулярно к контуру [5]. Поверхностное натяжение зависит от многих факторов и является функцией межмолекулярных сил, геометрии молекул и числа атомов в ней, присутствие в системе другой фазы, химического взаимодействия молекул граничащих фаз.

Элементарную работу  $dW$ , совершаемую системой при изменении ее объема на  $dV$  и площади поверхности раздела на  $dA$ , можно выразить в следующем виде:

$$dW = PdV - \sigma dA, \quad (2.1)$$

где  $P$  – давление;  $\sigma$  – поверхностное (межфазное) натяжение.

Величина поверхностного натяжения, определенная в соответствии с уравнением (2.1) для равновесной системы, может быть только положительной, в противном случае площадь поверхностного разрыва должна была бы самопроизвольно увеличиваться.

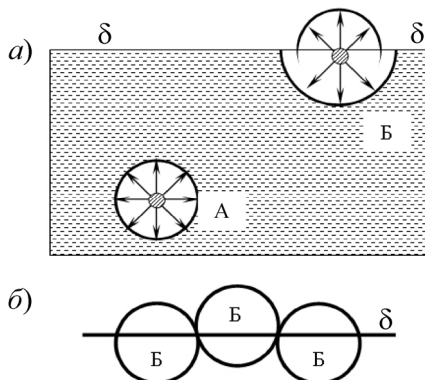
С энергетической точки зрения существование поверхностной энергии легко объяснимо. Свойства молекул на поверхности вещества и в его объеме значительно отличаются друг от друга (*рис. 2.1*).

В объеме молекула окружена со всех сторон такими же молекулами, поэтому результирующая сила их межмолекулярного взаимодействия равна нулю. Перемещаясь внутри жидкости, молекулы не совершают работы. На поверхности молекула взаимодействует с



соседями «сбоку» и «снизу», «сверху» этих молекул нет (см. *рис. 2.1, а*).

В связи с этим силы взаимодействия нескомпенсированы, и равнодействующая сила ( $F$ ) направлена вниз (см. *рис. 2.1, б*).



**Рис. 2.1. Поверхностное натяжение  $\sigma$  в объеме (молекула А) и на поверхности (молекула Б) жидкости (а); схема образования поверхностного натяжения (б)**

Поэтому молекулы, выходящие на поверхность раздела фаз, должны совершить работу против внутреннего давления, при этом кинетическая энергия при выходе молекул на поверхность не изменится. Молекулы жидкости стремятся втянуть внутрь молекулы с поверхности. Именно нескомпенсированное взаимодействие на поверхности и обуславливает наличие поверхностного натяжения. Чем ниже поверхностное натяжение, тем меньшую работу нужно затратить, чтобы из объема жидкости перевести молекулу на поверхность.

Поверхностные явления, возникающие в зоне контакта двух фаз, изменяют состояние и свойства пограничных с ней слоев соседней фазы определенной толщины. Как все неравновесные системы, такая система будет стремиться к равновесному состоянию, отвечающему разделению системы на сплошные фазы с минимальной межфазной поверхностью.

Каждая из поверхностей раздела характеризуется своим значением свободной поверхностной энергии, появление которой обусловлено неодинаковым притяжением молекул поверхностного слоя со стороны соприкасающихся фаз (*рис. 2.2*).

Научное издание

**Любовь Дмитриевна Шахова**

# **ТЕХНОЛОГИЯ ПЕНОБЕТОНА**

**ТЕОРИЯ И ПРАКТИКА**

Редактор: *В.Ш. Мерзлякова*

Дизайн обложки: *Н.С. Романова*

Компьютерная верстка: *Е.М. Лютова*

Лицензия ЛР № 0716188 от 01.04.98.

Подписано к печати 29.03.10. Формат 60х90/16.

Бумага офсетная. Гарнитура Таймс. Печать офсетная.

Усл. 15,5 п.л. Тираж 500 экз. Заказ №

Издательство Ассоциации строительных вузов (АСВ)  
129337, Москва, Ярославское шоссе, 26, отдел реализации – оф. 511  
тел., факс: (499)183-56-83, e-mail: [iasv@mgsu.ru](mailto:iasv@mgsu.ru), <http://www.iasv.ru/>