

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

---

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего профессионального образования  
«Пензенский государственный университет  
архитектуры и строительства»  
(ПГУАС)

# **ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНЫЕ СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ**

Учебно-методическое пособие

Пенза 2014

УДК 699.86  
ББК 38.3  
Э65

*Разработано в рамках проекта по реализации дополнительных программ повышения квалификации, признанных победителями по результатам конкурсного отбора 2014 года (приказ Минобрнауки России от 11 апреля 2014 г. №309), проведенного в рамках Президентской программы повышения квалификации инженерных кадров на 2012–2014 годы*

Рекомендовано Редсоветом университета

Рецензент – доктор технических наук, профессор  
кафедры ТСМиД В.Л. Хвастунов  
(ПГУАС)

Э65 **Энергоэффективные** строительные материалы: учеб.-метод. пособие / В.А. Береговой. – Пенза: ПГУАС, 2014. – 52 с.

Приведены учебно-методические и информационно-справочные материалы для изучения курса «Энергоэффективные строительные материалы». Систематизирована информация о современном уровне и перспективах развития отечественных производств в области строительной теплоизоляции, а также о общемировых тенденциях модернизации существующих технологий. Раскрыты механизмы формирования теплопроводящих и прочностных свойств теплоизоляционных материалов на основе различных видов минерального и растительного сырья.

Учебно-методическое пособие подготовлено на кафедре «Технологии строительных материалов и деревообработки» и предназначено для слушателей курсов повышения квалификации, обучающихся по программе «Энергоэффективные строительные материалы».

© Пензенский государственный университет  
архитектуры и строительства, 2014  
© Береговой В.А., 2014

## ВВЕДЕНИЕ

Повышение энергоэффективности вновь возводимого и реконструируемого жилого фонда при сохранении его ценовой доступности, а также улучшение тепловой защиты теплоэнергетических сооружений требуют разработки новых энергоэффективных строительных материалов. Такие материалы могут быть получены с применением инновационных ресурсосберегающих технологий, использующих в качестве сырьевой базы доступные и широко распространенные минеральные ресурсы.

В настоящее время обжиговые ячеистые материалы составляют одну из наиболее перспективных групп среди минеральных теплоизоляционных материалов. Они производятся преимущественно на основе глин, диатомитов или минеральных расплавов (стекло, шлаков). Благодаря сочетанию ценных эксплуатационных показателей (долговечность, негорючесть, экологичность и др.) и потенциалу совершенствования пенокерамические и пеностеклянные изделия вполне конкурентоспособны по отношению к полимерным аналогам. Главным недостатком обжиговой теплоизоляции является ее высокая стоимость, обусловленная несовершенством традиционных технологий. Процесс получения таких изделий основан на использовании дефицитных корректирующих добавок и пенообразователей, характеризуется большой энергоемкостью и ограниченностью минеральной сырьевой базы.

В связи с этим одной из задач современного строительного материаловедения становится проведение исследований, направленных на разработку составов и ресурсосберегающих технологий изготовления энергоэффективных ячеистых композитов.

# 1. РОЛЬ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНЫХ МАТЕРИАЛОВ В ТЕПЛОВОЙ ЗАЩИТЕ ЗДАНИЙ

## Общие сведения о тепловой защите зданий

На отопление строительных объектов ежегодно расходуется более 240 млн т условного топлива, что составляет около 20 % всех потребляемых энергоресурсов России, или 35 % от произведенной в стране тепловой энергии. В странах ЕС со схожими климатическими условиями аналогичный показатель не превышает 22 %.

Причина перерасхода энергоресурсов кроется в больших потерях тепла через ограждающие конструкции: стены, кровлю, окна и двери, а также вентиляцию. Существенное влияние на величину теплопотерь оказывают тип здания и способ его блокирования с рядом стоящими домами (рис. 1).

Решая задачу экономии энергоресурсов за счет повышения теплозащиты зданий, нужно учитывать затраты энергии на производство теплоизоляционных материалов (ТИМ), используемых в конструкциях. Подсчитано, что применение высокоэффективных ТИМ ( $\lambda \leq 0,06 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot ^\circ\text{C})$ ), экономически оправдано, если энергоёмкость их производства не превышает 10...15 кг условного топлива на 1 м<sup>3</sup>. В этом случае первоначальные затраты полностью возмещаются уже после 5...15 лет эксплуатации здания за счет дополнительной экономии на отоплении.

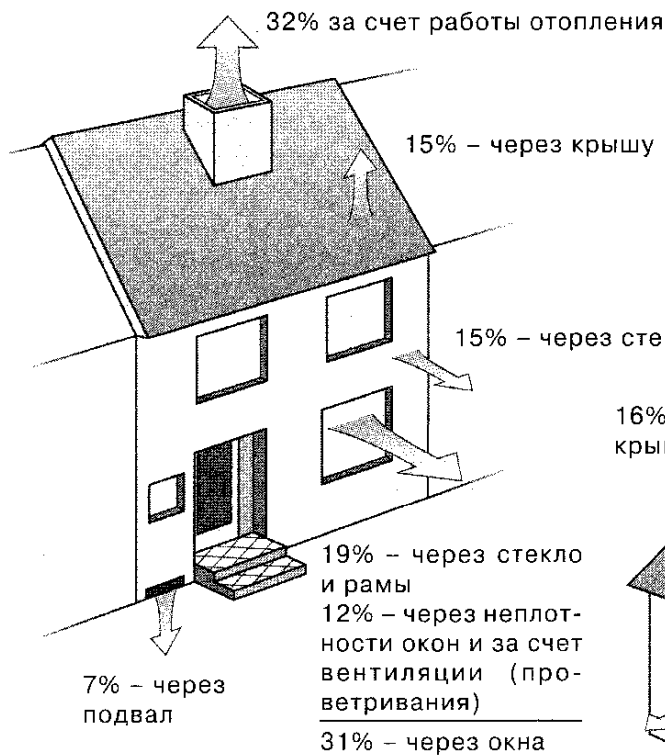
В последние годы проблеме энергосбережения в нашей стране уделяется большое внимание. На федеральном уровне создан нормативно-правовой фундамент энерго- и ресурсосбережения: закон Российской Федерации «Об энергосбережении»; постановление Правительства Российской Федерации «О повышении эффективности использования энергетических ресурсов и воды предприятиями и организациями бюджетной сферы».

На современном этапе развития строительных технологий наиболее перспективное решение проблемы снижения теплопотерь через стены и крышу здания заключается в максимально широком использовании многослойных ограждающих конструкций со средним слоем из высокоэнергоэффективных ТИМ.

## Тепловая изоляция в инженерных системах

Россия обладает самой крупной в мире системой централизованного теплоснабжения, что вызывает необходимость системного подхода к обеспечению эффективности тепловой защиты трубопроводных систем. В настоящее время общие потери тепла через поверхность теплопроводов составляют 15...17 % от отпускаемой потребителям. Преобладающим способом укладки инженерных сетей в России является подземная в непроходных каналах, изолированных минеральной ватой ( $\approx 80$  % от общего объема).

**Рядовая секция дома блокированного типа**



**Отдельностоящий односемейный дом**



**Бунгало угловой тип в плане**

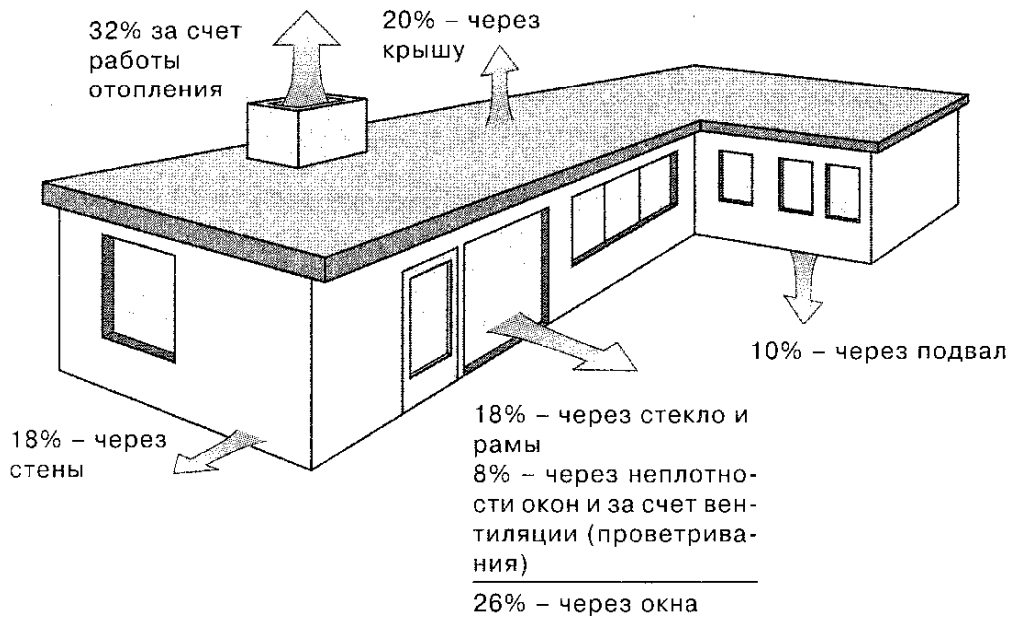


Рис. 1. Распределение относительных потерь тепла малоэтажного жилого дома

Учитывая существенные затраты на устройство теплопроводов, практически реализовать современные строительные нормы можно только при условии использования эффективных теплоизоляционных материалов, имеющих плотность до  $200 \text{ кг/м}^3$ . Результаты исследований теплозащитных свойств, коррозионной стойкости и долговечности изоляции и отдельных элементов подземных трубопроводов позволяют заключить, что наиболее прогрессивным является способ бесканальной прокладки теплосетей, изолированных жестким пенополиуретаном.

Сегодня за рубежом в промышленных масштабах и в России в опытных производствах применяются технологии устройства изоляции из пенополиуретана (ППУ) путем заливки в разъемную форму, а также нанесения или заливки в межтрубное пространство. Быстрое распространение получает также метод прокладки с использованием трехслойных конструкций типа «труба в трубе» с наружной оболочкой из жесткого полиэтилена и внутренним слоем из ППУ.

Реализация энергосберегающих мероприятий требует увеличения общего объема выпускаемых ТИМ до  $50...75 \text{ млн м}^3$ , а также изменения номенклатуры изделий. В настоящее время в России функционируют около 250 специализированных предприятий по производству теплоизоляционных материалов. Их суммарная годовая мощность немногим более  $15 \text{ млн м}^3$ . В групповой структуре современных ТИМ преобладают минераловатные материалы и изделия. Это предопределяется доступностью минерально-сырьевой базы и сравнительно низкими затратами на организацию производства, а также большим числом уже действующих предприятий. Минераловатные изделия характеризуются универсальностью применения, широким диапазоном средней плотности ( $25...400 \text{ кг/м}^3$ ) и температуры эксплуатации ( $-60...+800 \text{ }^\circ\text{C}$ ).

Так, в 2005 году было выпущено,  $\text{млн м}^3$  (% от общего объема): минераловатных изделий – 5,5 (66); стекловолоконистых – 0,64 (8); ячеистых бетонов – 0,24 (3); пенопластов – 1,6 (21); перлитовых и вермикулитовых изделий – 0,03 (1,4); пенидиатомитовых – 0,02 (0,2).

В последние пять лет отечественное производство шлаковаты и минеральной ваты активно развивается. За 2010...2014 гг. объем выпуска шлаковаты и минеральной ваты увеличился более чем в 2,6 раза: с  $7,1 \text{ млн м}^3$  до  $18,4 \text{ млн м}^3$ . Максимальный прирост производства пришёлся на 2010 г. и составил 52,8 % относительно 2009 г.

Крупнейшим регионом по производству минваты является Рязанская область. В 2013 г. в регионе было произведено  $3,8 \text{ млн м}^3$  продукции. За пятилетний период 2009...2013 гг. натуральный объем производства в области увеличился в 3 раза или на  $2,6 \text{ млн м}^3$ . Выпуск шлаковаты и мине-

ральной ваты в Рязанской области обеспечивает почти 21 % суммарного объема производства продукции в России. В 2013 г. крупнейшими регионами-производителями продукции также стали Республика Татарстан и Тамбовская область. Производство в Татарстане составило 3,3 млн м<sup>3</sup> (18 %), в Тамбовской области 2,2 млн м<sup>3</sup> (12 %).

По оценкам BusinesStat, внутреннее производство минваты продолжит активный рост: за период 2014...2018 гг. объем выпуска увеличится на 63,8 % и составит 33,5 млн м<sup>3</sup>.

Анализ технической литературы позволил сделать вывод о том, что перспективные материаловедческие разработки, развивающие технологию тепловой изоляции, сосредоточены в следующих научных областях:

- композитных сырьевых шихт на основе доступных горных пород, обеспечивающих существенное повышение эксплуатационных свойств волокон и ячеистых материалов, формируемых в процессе высокотемпературной обработки;

- нетоксичных связующих для минераловатных плит;

- безотходных технологий производства негорючих, экологически чистых рулонных и плитных изделий из минерального супертонкого волокна;

- суперлегких ячеистых утеплителей на минеральной основе ( $\rho_m \leq 200$  кг/м<sup>3</sup>) для изоляции ограждающих конструкций, эффективно работающих в широком диапазоне температуры и влажности;

- производства высокопористых зернистых материалов на основе стекла, керамики, а также перлита и вермикулита;

- рецептур и технологий заливки пенополиуретанов.

## 2. ТРЕБОВАНИЯ К ОТДЕЛЬНЫМ ГРУППАМ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Материалы для утепления зданий должны отвечать следующим требованиям:

- обеспечение высокого термосопротивления при минимальной толщине и весе конструкции;
- достаточная паропроницаемость материала, исключающая конденсацию влаги в конструкции при эксплуатации;
- низкая средняя плотность, не превышающая  $200 \dots 400 \text{ кг/м}^3$ ;
- достаточность показателя прочности при 10 % деформации в конструкциях утепления крыш и перекрытий – не менее 20 кПа;
- морозостойкость не менее 15 циклов;
- высокая водостойкость и биостойкость при отсутствии эмиссии токсичных веществ.

Исходя из функционального назначения коэффициент теплопроводности  $\lambda$  является главным критерием качества теплоизоляционного материала. По величине  $\lambda$  энергоэффективные материалы делят на три класса: А – малотеплопроводные (менее  $0,06 \text{ Вт/(м}\cdot\text{°C)}$ ), Б – теплопроводные ( $0,06 \dots 0,10 \text{ Вт/(м}\cdot\text{°C)}$ ) и В – повышенной теплопроводности ( $0,10 \dots 0,15 \text{ Вт/(м}\cdot\text{°C)}$ ).

Характерным показателем структуры теплоизоляционных материалов является высокая пористость, поскольку воздух в порах имеет меньшую теплопроводность, чем окружающее его вещество в конденсированном состоянии. При диаметре пор менее 5 мм теплопроводность находящегося в них воздуха равна  $0,025 \text{ Вт/(м}\cdot\text{°C)}$ . Пористость теплоизоляционных материалов составляет до 90 %, а супертонкое стекловолокно имеет пористость до 99,5 %.

Пористость непосредственно связана с величиной средней плотности, определять которую существенно легче. По этому показателю материалы делят на три группы: особо легкие (ОЛ), имеющие марки по средней плотности 15, 25, 35, 50, 75 и 100, легкие (Л) – 125, 150, 175, 200, 225, 300 и 350, тяжелые (Т) – 400, 450, 500 и 600. При средней плотности  $500 \dots 700 \text{ кг/м}^3$  материалы используют с учетом их несущей способности в конструкциях, т.е. в качестве конструкционно-теплоизоляционных.

Теплопроводность материала быстро возрастает при его увлажнении, так как теплопроводность воды составляет  $0,5 \text{ Вт/(м}\cdot\text{°C)}$ , что в 20 раз выше, чем воздуха в мелких порах. При замерзании увлажненного ТИМ происходит дальнейшее увеличение его теплопроводности, поскольку теплопроводность льда составляет  $2,3 \text{ Вт/(м}\cdot\text{°C)}$ .



По способности к сжимаемости под нагрузкой (относительной деформации сжатия) различают энергоэффективные материалы следующих видов: мягкие, имеющие сжимаемость свыше 30 % под удельной нагрузкой 2 кПа, полужесткие – соответственно 6...30 %, жесткие – до 6 % , повышенной жесткости – до 10 % под удельной нагрузкой 4 кПа и твердые – до 10 % под нагрузкой 10 кПа.

Контактная теплопроводность твердого вещества обеспечивается за счет волнового процесса, в основе которого лежит передача теплоты путем ангармонических колебаний отдельных атомов, распространяющих тепловой поток с тем меньшей интенсивностью, чем сложнее строение кристаллической решетки. По этой причине теплопроводность шпинели ( $MgAl_2O_3$ ) меньше, чем оксида магния ( $MgO$ ) и оксида алюминия ( $Al_2O_3$ ) в отдельности. Еще меньшие значения теплопроводности имеют аморфные тела, причем с увеличением температуры их теплопроводность увеличивается.

Теплопроводность пор складывается из собственной теплопроводности газа в порах, конвективной теплопроводности и теплопроводности излучения газа. При температуре 100 °С теплопроводность воздуха повышается до 0,031 Вт/(м·°С), а при 1000 °С – до 0,079 Вт/(м·°С).

Второе слагаемое общей теплопроводности пор – конвекция – в порах меньше 5 мм практически отсутствует и поэтому не учитывается. Но при большей величине пор или их непрерывности конвекция становится заметной.

Третий аддитивный слагаемый теплопроводности – излучение – зависит от черноты стенок пор, формы и размера пор, температуры. Величина излучения имеет большое значение при передаче теплоты в порах, особенно при высоких температурах, так как она пропорциональна температуре. В результате может оказаться, что теплопроводность при высокой температуре высокопористых изделий будет выше, чем менее пористых.

В структуре теплоизоляционных материалов может быть непрерывной как твердая фаза, так и поры при равной величине пористости. Твердая фаза имеет большую теплопроводность и поэтому, когда она является в структуре непрерывной, то теплопроводность материала оказывается в 2,0...2,5 раза выше, чем при непрерывности пор. В волокнистых теплоизоляционных материалах непрерывными в структуре являются как твердые фазы, так и поры, поэтому их теплопроводность значительно зависит от лучистой составляющей теплопроводности.

**Прогнозирование теплопроводности.** Величина коэффициента теплопроводности, являясь важнейшим функциональным показателем качества ТИМ, определяет величину ключевого параметра структуры, задаваемого при проектировании состава материала, – пористости. Поэтому расчет

теплопроводности является одной из главных задач, решаемых в процессе определения оптимальных рецептур сырьевых смесей и структурных параметров.

Энергоэффективные материалы представляют собой многокомпонентные системы, для которых характерна исключительная сложность описания процессов переноса тепла и связанное с этим прогнозирование теплопроводности материала. Теплопроводность и прочность являются структурно-зависимыми свойствами строительных материалов. Величина теплопроводности зависит от множества структурных и иных факторов: плотности, наличия, количества и характера дефектов структуры, фазового и минералогического состава материала межпоровых перегородок, влагосодержания, параметров пористости.

Рядом исследователей поддерживается концепция доминирующего влияния плотности материала  $\gamma$  на его проводящие свойства. На основании этого предположения В.П. Некрасовым, Б.В. Спектором, О.Е. Власовым, Б.Н. Кауфманом и Г.А. Бужевичем были получены следующие расчетные зависимости для определения теплопроводности легких бетонов:

– Некрасовым В.П.:

$$\lambda = 1,16 \cdot \sqrt{0,0196 + 0,22 \cdot \gamma^2} - 0,16;$$

– Спектором Б.В.:

$$\lambda = 0,029 + 2,19 \cdot 10^{-4} \cdot \gamma;$$

– Власовым О.Е.:

$$\lambda = 0,2 \cdot \gamma + 0,05 \cdot \gamma^2;$$

– Кауфманом Б.Н.:

$$\lambda = 0,11 \cdot \gamma^{1,1} + 1,68 \gamma + 0,022;$$

– Бужевичем Г.А.:

$$\lambda = \frac{0,38 \cdot \gamma_6}{1000} - 0,12.$$

Практическая значимость этих зависимостей объясняется тем, что величина средней плотности является легко определяемым показателем, которым удобно пользоваться в расчетах. Вместе с тем результаты вычислений, выполненных по приведенным выше формулам, показывают большой разброс значений теплопроводности материалов при одинаковой плотности. Поэтому их использование в инженерных расчетах предполагает владение информацией, для какого вида материала подходит та или иная зависимость.

Для теоретического расчета теплопроводности неоднородных материалов используют ряд концептуальных подходов. Принцип обобщенной проводимости является одним из наиболее распространенных подходов: он базируется на аналогии между уравнениями стационарного потока тепла, электрического тока, электрической и магнитной индукции. Возможность применения расчетной схемы для исследуемого материала определяется полученными на ее основе расчетными формулами и общими требованиями к физической модели:

- адекватность модели и реальной схемы переноса тепла;
- возможность получения физически правильных результатов в предельных случаях;
- отсутствие внутренних противоречий в теоретической схеме;
- удовлетворительное соответствие результатов расчета экспериментальным данным в широком диапазоне изменения определяющих факторов.

Данный подход позволяет использовать для расчета тепловой проводимости системы основные соотношения электростатики и электродинамики. Для расчета теплопроводности гетерогенных материалов разработан ряд расчетных зависимостей (табл. 1).

Т а б л и ц а 1

Расчетные зависимости теплопроводности

Источник	Расчетные зависимости
В.И. Одолевский	$\lambda_{\sigma} = \lambda_{\text{м}} \left[ 1 - \frac{P}{\frac{\beta}{\beta-1} - \frac{1-m}{3}} \right]$
В.Г. Довжик	$\lambda_{\sigma} = \lambda_{\text{м}} \left[ \frac{2\lambda_{\text{м}} + \lambda_{\text{в}} - 2P(\lambda_{\text{м}} - \lambda_{\text{в}})}{2\lambda_{\text{м}} + \lambda_{\text{в}} + P(\lambda_{\text{м}} - \lambda_{\text{в}})} \right]$
А. Миснар	$\lambda_{\sigma} = \lambda_{\text{м}} \left[ 1 + P \frac{1-\beta}{1 - \sqrt[3]{P}(1-\beta)} \right]$
П.Г. Комохов и В.С. Грызлов	$\lambda_{\sigma} = \lambda_{\text{м}} P_{\text{м}}^2 + \lambda_{\text{в}} P_{\text{в}}^2 + \frac{4\lambda_{\text{м}}\lambda_{\text{в}}}{\lambda_{\text{м}} + \lambda_{\text{в}}} P_{\text{м}} P_{\text{в}}$

Пр и м е ч а н и я :  $P$ ,  $P_{\text{м}}$  и  $P_{\text{в}}$  – относительный объем, занятый соответственно наполнителем, материалом межпоровых перегородок и воздухом;  $\beta = \frac{\lambda_{\text{н}}}{\lambda_{\text{м}}}$ , где  $\lambda_{\sigma}$ ,  $\lambda_{\text{н}}$ ,  $\lambda_{\text{в}}$  и  $\lambda_{\text{м}}$  – теплопроводность соответственно бетона, наполнителя, воздуха и материала межпоровых перегородок.

Анализ результатов расчетов по формулам, приведенным в табл. 1, показал, что значения теплопроводности практически совпадают. Однако расхождение с экспериментальными данными составляет 30...40 %, что объясняется стохастическим характером распределения частиц заполнителя (пор) в матрице реального материала.

С целью более точного описания процесса переноса тепла по материалу ряд авторов предлагают учитывать взаимное расположение зерен заполнителя и другие параметры. Например, в уравнении Ляликова дополнительно введены коэффициенты, учитывающие коэффициент формы заполнителя ( $e$ ), а также толщину слоя газа на границе «твердое тело – газ» ( $\delta_0$ ):

$$\lambda = \frac{6(1-\rho)\lambda_2}{e} \left( \frac{1}{e} \ln \frac{1 + \frac{\delta_0}{r}}{1 + \frac{\delta_0}{r} - e} - 1 \right).$$

Анализ приведенных зависимостей позволяет сделать вывод, что, несмотря на большое количество расчетных зависимостей, полученных для различных материалов, в настоящее время отсутствуют общие методы расчета теплопроводности энергоэффективных материалов бетонов. Необходимым условием повышения точности оценки теплопроводности пористых строительных материалов является учет важнейших эксплуатационных воздействий (влаги, тепла и др.).

**Расчетная оценка прочности.** Общая пористость современных энергоэффективных материалов существенно превышает 90 %. Это обуславливает существенную роль параметров пористой структуры и механических показателей материала межпоровых перегородок в формировании комплекса важнейших эксплуатационных показателей изделий. Важнейшими параметрами пористой структуры являются средний размер и количественное распределение пор и пустот в объеме материала, степень их замкнутости, вытянутости, черноты, гладкость внутренней поверхности.

При создании теплоэффективных материалов стремятся максимально увеличить величину их пористости и получить мелкопористую структуру с равномерным распределением замкнутых ячеек. В свою очередь, параметры структуры, реологические свойства сырьевой смеси, вид и количество используемого порообразователя и другие особенности материала влияют на выбор способа поризации.

Для определения параметров макроструктуры разработаны расчетные зависимости, учитывающие их взаимосвязь с плотностью изделия:

$$\delta = D_{\text{эв}} \cdot \left( \sqrt[3]{\frac{\varphi}{V_{\text{эв}}}} - 1 \right),$$

где  $D_{\text{эв}}$ ,  $V_{\text{эв}}$  – средний эквивалентный диаметр и объем включений;  
 $\varphi$  – коэффициент плотности упаковки, равный 0,71;

$$\delta = D \cdot \left( \frac{1}{\sqrt[3]{1 - \frac{\gamma}{\gamma_0}}} - 1 \right),$$

где  $D$  – диаметр ячейки;

$\gamma, \gamma_0$  – истинная плотность вяжущего компонента и средняя плотность ячеистого материала.

Общая пористость складывается из макропор, а также системы капиллярных, контракционных и гелевых пор, формируемой в процессе твердения вяжущей части. Макропоры создаются способом газообразования, пенообразования, воздухововлечения или их комбинированием. Капиллярные поры образуются в результате испарения избыточной воды, введённой по технологическим соображениям при приготовлении смеси. Контракционные поры формируются при твердении вследствие уменьшения абсолютного объёма системы гидравлического вяжущего. Гелевые поры расположены в агрегатах частиц геля и имеют наименьший размер по сравнению с другими порами цементного камня.

Капиллярная пористость определяет отношение материала к воде (водопоглощение, капиллярное всасывание и сорбционное увлажнение), морозостойкость и коррозионную стойкость. Контракционная и гелевая пористость в меньшей мере влияет на физико-технические свойства материала. Общеизвестно, что чем равномернее распределены поры в материале и меньше их средний диаметр, тем лучше физико-механические свойства изделий.

Параметры структуры материала определяют вид зависимости функции  $R_{сж} = f(\rho_m)$ . Для ТИМ получены расчётные зависимости, связывающие параметры макроструктуры с механическими показателями.

Кац С.М. рекомендует использовать при расчёте прочности  $\sigma$  пористых материалов с ячейками одинакового размера следующие зависимости:

$$\sigma = \sigma_0 \cdot 3,59 \cdot (\Pi^{-\frac{1}{3}} - 1)^2 \left[ 1 + 1,78 \cdot \left( \Pi^{-\frac{1}{3}} - 1 \right)^2 \right]^{-\frac{1}{2}};$$

$$\sigma = 1,66\sigma_0 \cdot (1 - \Pi)^{3,85},$$

где  $\sigma_0$  – прочность плотного материала;

$\Pi$  – общая пористость материала.

Безверхим А.А. получена зависимость для расчета прочности пористых композиционных материалов:

$$R_{\text{пор}} = R_0 \cdot e^{-\beta \cdot \left(\frac{\Pi}{1-\Pi}\right)},$$

где  $R_0$  – прочность матрицы;

$\beta$  – коэффициент хрупкости ячеистого материала, равный:

$$\beta = \frac{1}{\varepsilon_m \cdot Y_\varepsilon},$$

где  $\varepsilon_m$  – предельное значение линейной деформации материала;

$Y_\varepsilon$  – коэффициент, зависящий от хода кривой в координатах « $\sigma - \varepsilon$ » и определяемый по уравнению

$$Y_\varepsilon = \frac{1}{(b+1)},$$

где  $b$  – показатель степени уравнения  $\sigma = a \cdot \varepsilon^b$ ;

$a$  – константа.

Ицковичем С.М. для искусственных пористых заполнителей предложена следующая зависимость:

$$R_{\text{сж}} = A \cdot d^n,$$

где  $R_{\text{сж}}$  – предел прочности при сжатии пористого материала;

$A$  – конструктивный параметр данного материала, равный  $\frac{R_1}{\gamma_1^n}$

( $R_1$  – прочность данного материала при плотности  $\gamma_1$ );

$d$  – относительная плотность материала; показатель  $n$  для пористых плитных материалов принимается равным 2, а для материалов зернистой и переходной структур значение  $n$  находится в диапазоне от 3 до 4.

Для легких бетонов также известны зависимости вида  $R_{\text{сж}} = f(\rho_m)$ , полученные:

– Баженовым Ю.М.:

$$R_{\text{сж}} = A \cdot d^n,$$

где  $R_{\text{сж}}$  – предел прочности при сжатии пористого материала;

$A$  – конструктивный коэффициент, величина которого зависит от рецептурно-технологических свойств;

$d$  – относительная плотность материала;

– Левицким Б.:

$$R_{сж} = a \cdot d + b \cdot \sigma,$$

где  $a$  и  $b$  – постоянные величины, зависящие от пористости бетона;

$\sigma$  – среднеквадратичное отклонение от средней плотности;

– Пинскером В.А.:

$$R_{сж} = R_M \cdot (1 - 1,1\sqrt[3]{\Pi}),$$

где  $R_M$  – прочность испытуемого материала без пор.

Рыбьев И.А. разработал теорию искусственных строительных конгломератов, основанную на трех общих законах оптимальных структур: законе створа, законе конгруэнции и законе прочности. Закон прочности ИКС определяет общую взаимосвязь между показателями структуры и структурно-зависимыми свойствами материала. Он устанавливает, что произведение числовых показателей свойств конгломератов на степенную функцию фазового отношения его вяжущего вещества есть величина постоянная:

$$R_{иск} = \frac{R^*}{\sqrt{\left(\frac{c/\phi}{c^*/\phi}\right)^n \cdot \left(\frac{100}{c+\phi}\right)^m}},$$

где  $c + \phi$  – содержание вяжущего вещества в конгломерате;

$c^*/\phi$  – фазовое отношение вяжущего вещества оптимальной структуры;

$R^*$  – прочность ИСК оптимальной структуры.

Имеются и другие эмпирические формулы, выражающие зависимость между прочностью и средней плотностью ТИМ. Однако ни одна из них не является универсальной и не отражает механизма разрушения пористых строительных материалов.

Рассмотрение приведенных формул показывает, что основными факторами, влияющими на прочностные свойства материала, являются прочность материала-основы и параметры поровой структуры. При этом влияние характера пористости на механические показатели материала более значительно. Важнейшее значение оказывает количественное распределение между макро- и микропористостью (при этом негативное влияние микропор более существенно). Поэтому при разработке составов необходимо стремиться к уменьшению содержания капиллярной и гелевой пористости (за счет некоторого увеличения макропор), учитывая при этом, что чрезмерное увеличение среднего размера воздушных пор негативно сказывается на теплопроводящих свойствах. Помимо пористости, на прочность материала оказывают влияние специфические факторы: совместимость

компонентов, прочность матрицы вяжущего и физико-механические свойства заполнителя.

Используя методологический подход, разработанный в теории искусственных строительных конгломератов и предусматривающий доминирующее влияние свойств вяжущего на качество получаемого на его основе энергоэффективного ячеистого материала, взаимосвязь параметров микро- и макроструктуры и прочности можно представить в виде графиков, приведенных на рис. 2.

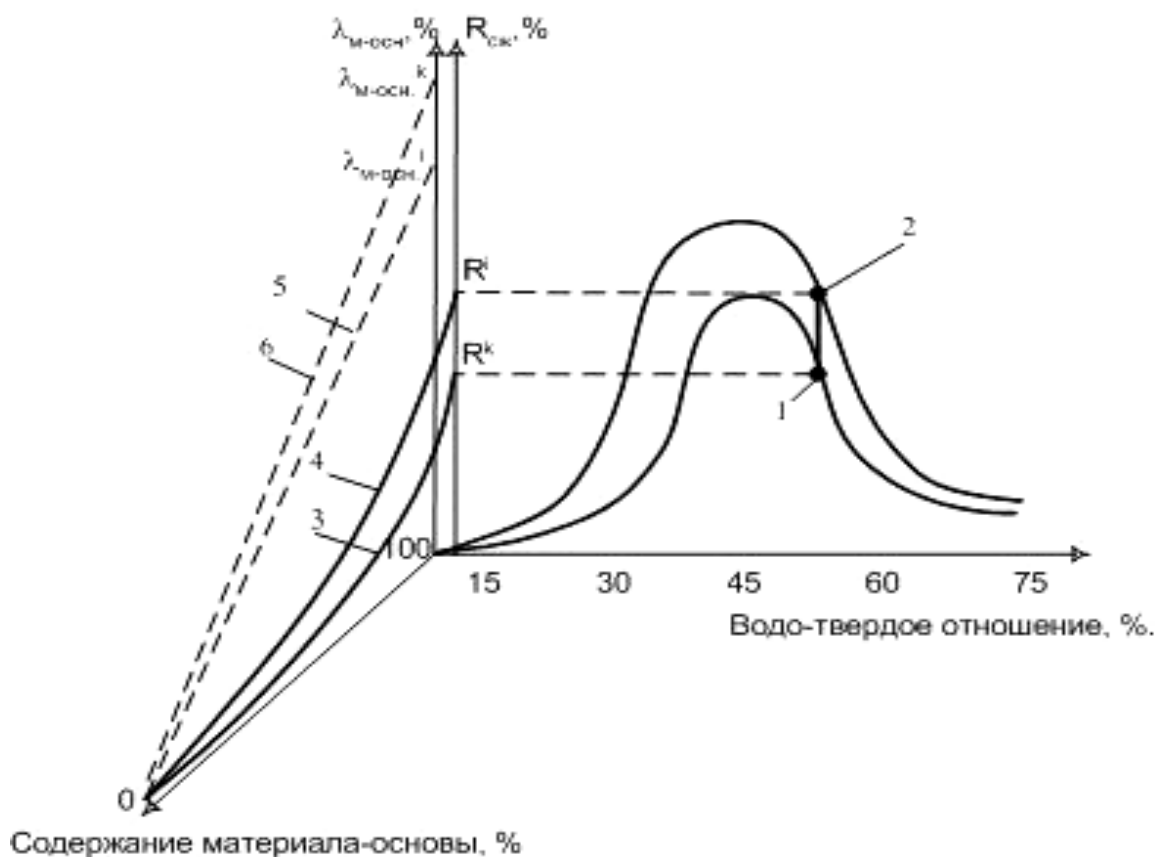


Рис. 2. Влияние управляющих рецептурно-технологических факторов на прочность и теплопроводность материала:

- 1, 2 – прочность материала-основы контрольного состава и с добавкой модификатора; 3, 4 – прочность ячеистого материала соответственно на материале-основе контрольного состава и с добавкой модификатора; 5, 6 – теплопроводность ячеистого материала соответственно на материале-основе контрольного состава и с добавкой модификатора

### Классификационные признаки энергоэффективных материалов

Энергоэффективные теплоизоляционные материалы классифицируют по следующим признакам:

- виду матрицы;
- структуре;



- форме;
- возгораемости (горючести);
- содержанию связующего вещества.

По виду матрицы все ТИМ подразделяют на две большие группы: неорганические и органические.

К неорганическим относят минеральную и стеклянную вату, пеностекло, ячеистые бетоны, вспученные перлит и вермикулит, теплоизоляционную керамику, асбестосодержащие теплоизоляционные массы и изделия.

К органическим материалам относят материалы на основе древесины, бумаги, различных стеблей растений (торфа, льна, камыша, соломы), а также вспененные пластмассы.

Существует группа материалов, изготавливаемых из смеси органического и неорганического сырья, например фибролит, получаемый из древесной шерсти и цемента, изделия из минеральной ваты на синтетическом связующем, высокопористые пластмассы, наполненные вспученным перлитом или особо легким керамзитом. Смеси из неорганических и органических материалов относятся к неорганическим, если количество последних в смеси превышает 50 % по массе.

По структуре теплоизоляционные материалы подразделяют на:

- волокнистые;
- ячеистые;
- зернистые.

По форме ТИМ бывают:

- рыхлые (вата, перлит и др.);
- плоские (плиты, маты, войлок и др.);
- фасонные (блоки, кирпич, сегменты, полуцилиндры и цилиндры);
- шнуровые (шнуры, жгуты).

По возгораемости (горючести) материалы и изделия подразделяются на:

- несгораемые;
- трудносгораемые;
- сгораемые.

По содержанию связующего:

- содержащие связующее (плиты из минеральной ваты на связующем);
- не содержащие связующего вещества (минеральная вата).

Теплопроводность ТИМ указывают в стандартах или технических условиях на конкретные виды материалов в зависимости от предельной температуры  $T$  их эксплуатации:

- при  $T = 25$  °С для материалов и изделий, применяемых при  $T$  менее 200° С;
- при  $T = 125$  °С для материалов, применяемых при  $T$  до 500 °С;
- при  $T = 300$  °С для материалов и изделий, применяемых при  $T$  свыше 500 °С.

Область применения ТИМ во многом ограничивается диапазоном рабочих температур и характером пористости.

Предельная температура применения – это максимальная температура, при которой материал сохраняет свое функциональное назначение. Указанная температура, как правило, ниже теплостойкости материала, так как при ее назначении учитывают влияние деструктивных процессов, происходящих в материалах при длительном воздействии высоких температур.

Так, в стеклообразных материалах (минеральной и стеклянной вате, ячеистом стекле и др.) в условиях длительного воздействия повышенных температур происходит образование и рост кристаллов, что приводит к резкому возрастанию внутренних напряжений в стекле вплоть до его разрушения.

В полимерных материалах происходит температурная деструкция высокомолекулярных соединений (обрыв цепей, образование поперечных связей), в результате чего прочность и эластичность связующего резко ухудшаются. В материалах на гидравлических вяжущих, а также в асбесто-содержащих материалах при длительном воздействии повышенных температур происходит дегидратация минерального вяжущего и асбеста, что приводит к сбросу прочности и повышению хрупкости изделий.

Основные виды теплоизоляционных материалов характеризуются следующими значениями предельной температуры:

- керамические волокна – до 1300 °С;
- вспученный вермикулит – до 1100 °С;
- диатомитовая теплоизоляция – до 900 °С;
- базальтовая вата – до 900 °С;
- минеральная вата – до 700 °С;
- пеностекло – до 700 °С;
- стеклянная вата – до 400 °С;
- минераловатные изделия на различных связующих – до 60...400 °С (в зависимости от вида и содержания связующего);
- газонаполненные пластмассы – до 60...180 °С.

С учетом физических факторов, влияющих на общую или эффективную теплопроводность в гетерогенных пористых телах, на практике и в теории были разработаны разнообразные способы получения энергоэффективных теплоизоляционных материалов.

### 3. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ПРОЦЕССОВ СТРУКТУРООБРАЗОВАНИЯ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНЫХ МАТЕРИАЛОВ

С целью снижения плотности ТИМ используют разнообразные способы формования пустот в процессе прессования или способы повышения пористости материала-основы (введение выгорающих добавок, использование пено- и газообразователей и т.д.). Выбор способа поризации структуры производится на этапе создания материала и определяется составом его вяжущей части.

В технологии пористой керамики большое распространение получил способ введения выгорающих добавок, в качестве которых используют отходы угледобычи, электродного производства, опилки, нафталин, мазут, антрацен, коксовую пыль, тростниковый жом, полистирол. Зарубежные изготовители пористых строительных керамических блоков (ФРГ, США, Франция, Швеция и др.) в качестве выгорающей добавки наиболее широко используют вспененный полистирол, при этом пористость изделий достигает 80...85 %. Материал, полученный с использованием мелкозернистого пенополистирола и выпускаемый европейскими производителями под торговой маркой «Poroton», обладает высокими эксплуатационными показателями (средняя плотность составляет 600...700 кг/м<sup>3</sup>, прочность при сжатии – до 10 МПа). Эти изделия вследствие особой структуры обладают низкой теплопроводностью и пригодны в качестве эффективной теплоизоляции.

Способ газообразования основан на вспучивании сырьевой массы газом, который выделяется при химических реакциях взаимодействия или разложения присутствующих или специально введённых добавок. Применяемые газообразующие добавки должны обеспечивать большой объём образующихся газов, равномерное выделение газа в нужном температурном интервале, а также не должны быть токсичными.

Известно, что основным газообразователем, применяемым для производства газобетона, является алюминиевая пудра. Управление процессами вспучивания и структурообразования газобетонных смесей заключается в совмещении скоростей этих процессов, причём в начале газовыделения вязкость массы должна возрастать медленно, а в конце – резко. Благодаря этому можно получить газобетон с пористой ненарушенной структурой. Однако из-за полидисперсности пудры, длительности газообразования и высокой чувствительности к изменению температуры, щёлочности и химического состава среды, а также по причине изменения реологических свойств смеси эти процессы практически невозможно успешно сбалансировать.

На процесс газовыделения можно воздействовать, вводя в поризуемую смесь поверхностно-активные вещества, способные дезагрегировать алю-

миниевую пудру, а также регулировать скорость и длительность газовыделения и тем самым управлять процессом формирования пористой структуры газобетонов.

Недостатками газовых способов являются их относительная сложность, низкая прочность сырца, длительная и трудоёмкая сушка, высокие требования, предъявляемые к исходным материалам, чувствительность процессов порообразования и их зависимость от многочисленных технологических параметров, которые зачастую затруднительно соблюдать. Вследствие этого газобетону свойственны неоднородность распределения пор и микротрещины, что обуславливает повышенные значения гигроскопичности, капиллярного подсоса, водопоглощения и усадочных деформаций.

**Способ пенообразования.** По технологическим особенностям различают трехстадийное пенообразование, аэрирование и способ сухой минерализации пены.

**Трехстадийное пенообразование** предусматривает отдельное приготовление пены, жидкотекучего раствора вяжущего и наполнителя и их смешивание. До перемешивания пена представляет собой сформировавшуюся дисперсную систему с определённой структурой и механической устойчивостью. Вследствие этого процесс пенообразования менее чувствителен к изменению свойств вяжущего, заполнителя, температуры среды, её физических и химических характеристик по сравнению с процессом газообразования.

Мелкопористая пеноструктура (размер пор до 3 мм) отличается высокой стабильностью и однородностью. Она менее подвержена деформациям, чем крупнопористая, и позволяет формировать сравнительно однородные изделия.

Этим способом получают изделия с пористостью 80...85 %, характеризующиеся относительно большой прочностью и низкой теплопроводностью, что позволяет широко использовать их для теплоизоляции и теплозащиты.

**Аэрирование** (воздухововлечение) основывается на процессе вовлечения пузырьков воздуха в раствор. Основное различие между технологиями аэрирования и пенообразования заключается в том, что поризованная структура аэрированных бетонов создаётся во время перемешивания всех компонентов смеси совместно с ПАВ, способствующим удерживанию воздуха, в то время как по технологии пенообразования пену необходимо готовить отдельно.

Путём изменения интенсивности поризации (скорости и времени аэрации, температуры среды, концентрации и вида ПАВ, типа перемешивающего аппарата) можно создавать поры разного размера и изменять степень поризации, т.е. управлять процессом образования пены на протяжении всего цикла приготовления смеси.

По способу аэрирования минеральные сырьевые компоненты распускают в воде, вводят добавку разжижителя и пенообразователя, а затем полученную смесь взбивают до заданного объема.

**Способ сухой минерализации пены** основан на приготовлении пены и её смешивании с тонкодисперсными твёрдыми частицами исходной композиции. Этот способ включает две основные технологические операции: приготовление пены заданной кратности из водного раствора пенообразователя и минерализацию её сухими компонентами сырьевой смеси. Данную технологию отличает более простая конструкция используемого оборудования, возможность быстрой регулировки средней плотности производимого ячеистого материала в диапазоне 300 ... 900 кг/м<sup>3</sup> и работы на различных видах гидравлических и воздушных вяжущих, использование в качестве пенообразователя отечественных синтетических ПАВ.

Для получения высокопористых керамических материалов с применением технологии вспенивания шликерной массы используют высокоскоростное перемешивание, а закрепление ячеистой структуры сырца осуществляется введением добавки минерального вяжущего. Пористая структура пенокерамики формируется в очень короткий промежуток времени за счет организованной диссипации в пенемассе механической энергии, подводимой от силового устройства пеномешалки. Полученная ячеистая масса заливается в формы, в которых она выдерживается до момента формирования начальной коагуляционно-конденсационной микроструктуры материала межпоровых перегородок, обуславливающей его схватывание. После завершения периода твердения ячеистый сырец освобождают из форм и обжигают. В качестве минерального вяжущего, выполняющего роль стабилизирующей добавки, на большинстве заводов по производству пористой керамики используется гипс. Быстрое твердение гипса способствует стабилизации ячеистой структуры и ускорению набора распалубочной прочности.

С целью создания высокой степени поризации при производстве легко-весных материалов возможно также применение комбинированных способов. Одним из них является газопенный способ, который основывается на сочетании аэрирования смеси путём введения ПАВ с последующим вспучиванием в формовочной оснастке газообразующими веществами.

Вследствие пластифицирующего действия ПАВ улучшаются технологические характеристики и снижается водопотребность смесей. Этим устраняется «кипение» и оседание ячеистой смеси, повышается газодерживающая способность и улучшается однородность пористости.

Изменяя количество газообразователя и ПАВ, а также параметры приготовления ячеистой смеси, можно получить заданное соотношение пор по размерам и необходимую общую пористость.

## 4. НЕОРГАНИЧЕСКИЕ ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ

На неорганические теплоизоляционные материалы приходится более 80 % от общего объема производства строительных материалов для тепловой изоляции. Номенклатура групп и виды ТИМ на неорганической основе приведены в табл. 2.

Т а б л и ц а 2

Неорганические теплоизоляционные материалы

Наименование группы		Виды изделий
Материалы с волокнистым каркасом	сыпучие	– рыхлая минеральная и стеклянная вата – смеси на основе распушенного асбеста и минерального волокна
	мягкие	– минераловатные и стекловатные маты – асбестовые шнуры
	жесткие	– минераловатные и стекловатные плиты – вулканитовые и совелитовые плиты
Вспученные материалы	сыпучие	– керамзит, аглопорит, вермикулит, термолит и др. – гранулы ячеистого стекла
	жесткие	– газобетон, ячеистое стекло
Вспененные материалы		– пенобетон, пеностекло, пенокерамика
Материалы с пористым наполнителем		– перлитовые, вермикулитовые, керамзитовые, аглопоритовые и др.
Материалы с выгорающим каркасом		– трепельные, диатомитовые

В промышленно развитых странах (Финляндия, Швеция, Дания) доля минеральных ТИМ, производимых в виде волокнистых изделий, достигает 70 % от общего объема этой группы. В этой связи очевидно, что рассмотрение основных энергоэффективных ТИМ обоснованно начинать именно с этой группы.

### **Теплоизоляционные материалы на основе искусственного минерального волокна из каменных и силикатных расплавов**

В зависимости от способа производства, искусственное минеральное волокно можно подразделить на следующие разновидности:

- высокотемпературостойкое и огнеупорное с температурой применения, соответственно, до 1000 и свыше 1000 °С;
- волокно базальтовое – более 600 °С;
- рядовое – до 700 °С;
- волокно стеклянное – до 400 °С.

В зависимости от химического состава исходных силикатных расплавов различают минеральную или стеклянную вату (стеклянная вата характеризуется более высоким содержанием кремнезема и щелочей).

*Минеральная вата* – рыхлый материал, состоящий из тонких (1...15 мкм) волокон стекловидной структуры. Нежелательной примесью являются капли затвердевшего расплава – «корольки».

Технология производства минеральной ваты включает подготовку сырья, плавление сырья и получение силикатного расплава, переработку расплава в волокно, формирование минераловатного ковра, сворачивание в рулон.

Основным видом сырья для изготовления минеральной ваты являются доменные шлаки. Они представляют собой расплавы (жидкие и охлажденные), в которых кристаллизуются силикаты и алюмосиликаты.

В зависимости от содержания составляющих их оксидов шлаки подразделяют по модулю основности на основные ( $M > 1$ ), кислые ( $M < 1$ ) и нейтральные ( $M = 1$ ):

$$M_o = \frac{CaO + MgO}{SiO_2 + Al_2O_3}.$$

Горные породы в технологии минеральной ваты применяются в чистом виде или в качестве компонента шихты. Габбро-базальтовые горные породы (диабазы, базальты, габбро), их метаморфические аналоги (амфиболиты, известковистые сланцы), а также мергели являются оптимальным сырьем для минераловатного производства. Получаемая из них вата характеризуется повышенный эксплуатационной стойкостью.

Подготовка сырья включает операции дробления, сортировки и дозирования. Плавление сырья осуществляется в при температуре 1300...1500 °С в шахтных печах – вагранках ( $d$  до 1,5 м и  $h$  до 20 м) или ваннных печах ( $S$  до 70 м<sup>2</sup>).

Операция переработки расплава в волокно является основной операцией при производстве минеральной ваты. В настоящее время используются три основных способа переработки, отличающихся воздействием энергоносителя на струю расплава, стекающего из плавильного агрегата, – дутьевой, центробежный и комбинированный.

*Дутьевой* способ основан на воздействии энергоносителя (пара, горячих газов), движущегося со скоростью 400...800 м/с, на струю расплава. Струя при этом расщепляется, а образовавшиеся части вытягиваются в волокна (рис. 3).

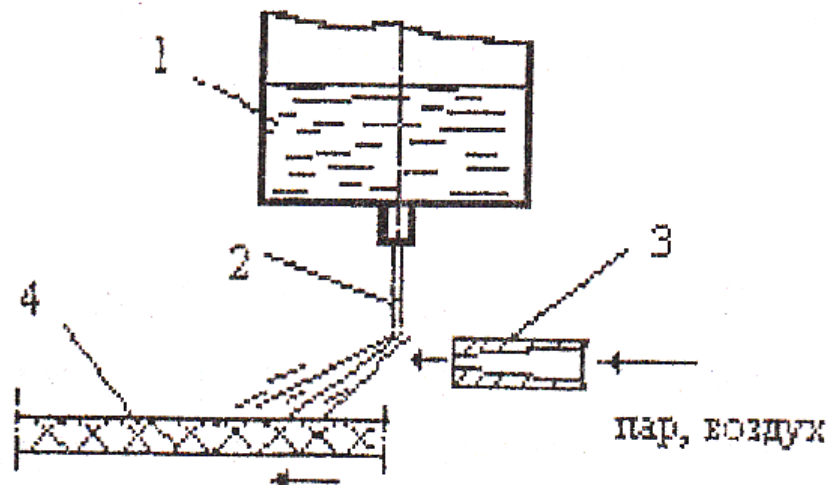


Рис. 3. Схема дутьевого способа:  
1 – печь с расплавом, 2 – струя, 3 – сопло, 4 – осажденные волокна

*Центробежный* способ основан на использовании центробежной силы вращающихся элементов центрифуг, на которые подается расплав (рис. 4). При производстве минеральной ваты используют центробежные установки различных конструкций, отличающиеся количеством вращающихся органов, их формой и расположением в пространстве.

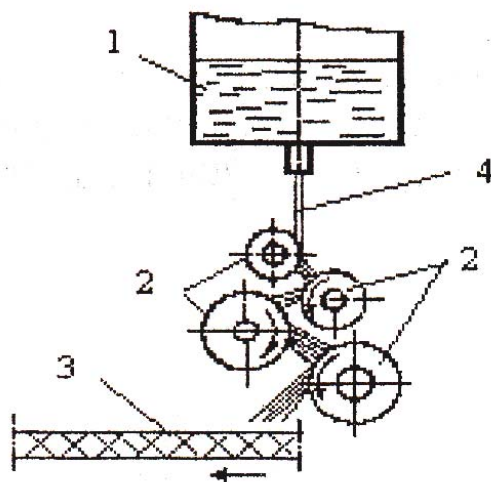


Рис. 4. Схема центробежного способа:  
1 – печь с расплавом; 2 – валки; 3 – охлажденные волокна; 4 – струя расплава

Наиболее широкое применение получили центробежно-дутьевой и центробежно-фильерно-дутьевой (струя расплава перед расщеплением на волокна проходит через насадку с мелкими отверстиями – фильеру) способы. Осаждение волокна производится в камере волокноосаждения (вертикальной или горизонтальной) на сетчатый конвейер. На конвейере волокно уплотняется и формируется ковер.



Минвату в зависимости от диаметра волокна подразделяют на три вида:

- ВМСТ – вата из супертонкого волокна диаметром от 0,5 до 3 мкм;
- ВМТ – вата из тонкого волокна диаметром от 3 до 6 мкм;
- ВМ – вата минеральная диаметром волокна от 6 до 12 мкм.

Вату вида ВМ в зависимости от значения модуля кислотности подразделяют на три типа:

- А – с модулем кислотности св. 1,6;
- Б – с модулем кислотности св. 1,4...1,6;
- В – с модулем кислотности 1,2...1,4.

Вата видов ВМСТ и ВМТ относится к типу А. Минеральная вата не горит, эффективно препятствует распространению пламени и часто применяется в качестве противопожарной изоляции. Она имеет малую усадку (в том числе термическую) и способна сохранять первоначальные геометрические размеры в течение длительного периода эксплуатации. Теплопроводность ваты – не более 0,05 Вт/(м·°С).

К недостаткам минеральной ваты следует отнести повышенную паропроницаемость. Диффундирующий сквозь минераловатный утеплитель пар часто конденсируется в его толще. Поэтому утепляемая конструкция должна быть спроектирована таким образом, чтобы минимизировать прохождение паров влаги и возможность ее переувлажнения. Минераловатный утеплитель должен быть защищен с одной стороны пароизоляционным барьером. Снаружи, напротив, должны быть созданы благоприятные условия для свободного выхода пара (высыхания утеплителя).

*Базальтовая (каменная) вата* – разновидность минеральной ваты, получаемая только из горных пород габбро-базальтовой группы. Процесс получения базальтовой ваты заключается в плавлении породы в электропечах при температуре 1500 °С для получения волокон. Волокнообразование производится аналогично минеральной вате. В зависимости от диаметра волокна базальтовую вату подразделяют на три вида:

БСТВ – вата базальтовая из супертонкого волокна диаметром от 0,5 до 3 мкм;

БТВ – вата базальтовая из тонкого волокна диаметром от 3 до 6 мкм.

По сравнению с минеральной ватой, базальтовая вата отличается большей виброустойчивостью, температурным диапазоном применения (до 900 °С) и долговечностью. Плотность рыхлой базальтовой ваты – до 80 кг/м<sup>3</sup>, теплопроводность – 0,035...0,038 Вт/(м·°С).

Материалы из базальтовой ваты хорошо выдерживают нагрузку, устойчивы к влиянию климатических условий, не горючи и не оказывают вредного воздействия на окружающую среду. Имея открытую пористую

структуру, изделия на основе базальтового волокна обладают высокими звукопоглощающими характеристиками.

*Стекловата* – энергоэффективный материал на основе стекловолокна. Стекловолокно представляет собой минеральное волокно, которое по технологии получения и свойствам имеет много общего с минеральной ватой. Для производства стеклянного волокна (стекловаты) применяют следующее основное сырье: песок, глинозем, борную кислоту, соду  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ , сульфат натрия  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ , поташ  $\text{K}_2\text{CO}_3$ , известняк, мел, доломит. Качество выше у волокон, изготовленных из борсодержащих стекол. Но бораты дороги и дефицитны, поэтому волокно преимущественно производят из щелочных составов.

Для производства стекловаты часто используют стеклобой. В Финляндии на предприятиях «Saint-Gobain Isover» используется до 80 % боя бутылочного стекла. Для получения расплава применяют ванны. Стекольный расплав перерабатывается в текстильное и штапельное стекловолокно. Для производства энергоэффективных материалов использует штапельное волокно. Переработка стекольных расплавов в штапельное волокно осуществляется, в основном, фильерно-дутьевым и фильерно-центробежно-дутьевым способами. Получаемое стекловолокно имеет диаметр от 1 до 10 мкм и более.

По толщине стекловолокно подразделяется на следующие виды:

- ультратонкое диаметром менее 1 мкм;
- супертонкое, диаметром 1...3 мкм;
- тонкое (текстильное), диаметром 4...12 мкм;
- утолщенное (изоляционное), диаметром 12...25 мкм ;
- толстое, диаметром более 25 мкм.

Для производства ТИМ используется утолщенное, тонкое и супертонкое волокно. На основе стекловолокна выпускают плиты, маты, трубную изоляцию, а также тканые материалы, например теплоизоляционные ленты и ткани, используемые при изоляции трубопроводов.

Супертонкие волокна (СТВ), в отличие от обычных, обладают особыми свойствами, что позволяет применять их без связующего в виде матов, где скрепление волокон между собой происходит за счет сил естественного сцепления. Стекловолокно характеризуется высокой прочностью, вибростойкостью, биостойкостью, химической устойчивостью. Отличие стекловолокна от минеральной ваты – в большей длине волокон: средняя длина стекловолокна составляет 5 см, в то время как средняя длина волокна минеральной ваты – 1,5 см. Это обуславливает одно из главных преимуществ стекловаты – повышенную упругость и способность после значительного сжатия восстанавливать свой объем и форму. Повышенная упругость изде-

лий из стеклянного волокна позволяет транспортировать материал (спрессованный по сравнению с первоначальным объемом в 4 раза) в виде рулонов и упаковок. В развернутом виде материал быстро восстанавливает свой первоначальный объем и форму непосредственно после разворачивания.

**Ячеистое стекло** по совокупности потребительских качеств является одним из наиболее совершенных теплоизоляционных материалов в современном строительстве. Поэтому остановимся подробнее на достоинствах, а также на недостатках этой группы энергоэффективных изделий, что поможет сформулировать подходы к совершенствованию технологии их получения и применения.

*Пеностекло* (ячеистое стекло) – высокопористый теплоизоляционный материал ячеистой структуры с плотностью от 120 до 200 кг/м<sup>3</sup>, в котором равномерно распределенные поры разделены тонкими перегородками из стекловидного вещества. Пеностекло обладает исключительно высокой водонепроницаемостью, что позволяет успешно использовать его при теплоизоляции труб, резервуаров и технологического оборудования.

*История развития.* Первое сообщение о пеностекле как о строительном изоляционном материале было сделано советским ученым проф. И.И. Китайгородским на Всесоюзной конференции по стандартизации и производству новых строительных материалов в Москве в 1932 г. В этом же году впервые в СССР было предложено производство пеностекла и намечены области его применения. В основу производства была положена технология, разработанная в Московском химико-технологическом институте И.И. Китайгородским и Л.М. Буттом.

Спустя четыре года на Втором международном конгрессе по стеклу в Лондоне (1936 г.) Б. Лонг доложил о проводимых исследованиях по пеностеклу, где одновременно демонстрировал первые опытные образцы. С современной точки зрения образцы пеностекла, которые удалось получить Б. Лонгу, были невысокого качества: средняя плотность – 400...500 кг/м<sup>3</sup>, прочность на сжатие – 4,1...4,5 МПа, водопоглощение по объему – 2...5 %, средний диаметр ячеек – 1...2 мм.

К 30-м годам относятся также патенты на производство пеностекла во Франции, США, Англии и Германии. Согласно указанным патентам, предусматривалось получение пеноматериалов с объемной массой 350...500 кг/м<sup>3</sup> путем нагревания порошковой смеси стекла, содержащего 0,3...0,4 % SO<sub>3</sub>, с восстановителями в закрытых огнеупорных формах при температуре 800...900 °С. В качестве восстановителей использовались углерод или карбид кремния. Таким образом, пеностекло, полученное по запатентованной технологии указанных выше стран, незначительно отличалось от образцов пеностекла, полученных Б. Лонгом, и значительно уступало по своему ка-

честву, особенно по объемной массе, пеностеклу, полученному И.И. Китайгородским и Л.М. Буттом. Следует, однако, отметить, что все предложенные в этих странах способы производства пеностекла до Великой Отечественной войны не были внедрены. С 1941 г. исследования в области пеностекла в Советском Союзе и большинстве других стран были прерваны. В это же время большое развитие получили исследовательские работы по производству пеностекла в США.

Первая большая работа о производстве пеностекла в США была опубликована Э.Л. Крейдлем в 1943 г., в ней был дан обстоятельный обзор возможных способов производства пеностекла по данным имевшихся в то время патентов. В более поздних работах автор на основании собственных наблюдений приводит интересные данные, относящиеся к процессам вспенивания порошкообразных смесей на основе стекла, рассматривает вопросы формирования ячеистой структуры пеностекла, а также детально описывает технологию производства пеностекла фирмы «Корнинг». Из этих работ следует, что производство пеностекла в США было начато в 1943 г. для нужд военно-морского флота.

Вспенивание пенообразующей смеси производилось в жаростойких металлических формах, изнутри покрытых тонким слоем огнеупорного материала для предотвращения прилипания блока пеностекла к стенкам формы. Собственно вспенивание производилось в туннельных печах с роликовым транспортером и обогреваемых природным газом. Средняя плотность полученного по этой технологии пеностекла находилась в пределах 130...180 кг/м<sup>3</sup>. По своей структуре оно состояло из мелких, герметически запаянных ячеек, равномерно распределенных по всей массе блока, было устойчивым против кислот, непроницаемо для воды и газов. Максимальная температура применения такого пеностекла составляла 535 °С.

Для получения современного пеностекла используют кварцевый песок, известняк, соду или сульфат кальция. С этой целью применяют отходы обычного стекла или легко спекающиеся горные породы с повышенным содержанием щелочей – трахит, сиенит, нефелин, обсидиан, вулканический туф. В качестве газообразователей используют каменноугольный кокс, антрацит, известняк, мрамор, пирролизит. Углеродсодержащие газообразователи создают в пеностекле замкнутые поры, а карбонаты – сообщающиеся. Температура разложения газообразователя должна быть на 50...70 °С выше температуры размягчения стеклянного порошка.

Технология производства пеностекла состоит в следующем: кварцевый песок и измельченный известняк сушат, размалывают в порошок, смешивают с содой и в ваннах печах получают стекломассу, которую подают в бассейн с водой для грануляции. Полученный гранулят размалывают в

смеси с газообразователем (1...5 %) в тонкий порошок и загружают в формы из жароупорного материала с меловой обмазкой. Формы на вагонетках или по роликовому конвейеру подают в туннельную печь.

Температура обжига составляет 600...1000 °С в зависимости от вида сырья. Температура обжига поднимается за 2...3 часа, затем медленно охлаждается в течение 20 ч. Под действием высокой температуры происходит размягчение частиц стеклянного порошка и его спекание. Газы, выделяющиеся при сгорании или разложении газообразователя, вспучивают вязкую стекломассу. При охлаждении образуется материал с ячеистой структурой. Медленное охлаждение (отжиг) способствует равномерному остыванию изделий по всему объёму. Поэтому в них не возникают внутренние напряжения и не образуется трещин. Охлаждённые изделия распиливают и оправляют на циркульных пилах. При использовании в качестве сырья стеклянного боя или стекловидных горных пород в технологии производства пеностекла отсутствуют варка стекломассы и грануляция.

Пористость различных видов пеностекла колеблется от 80 до 95 %, размеры пор могут быть от 0,1 до 5 мм. Пеностекло выпускают в виде плит (блоков) размерами (мм): длина 200...500; ширина 280...500; толщина 80, 100, 120. На российском рынке представлено пеностекло FOOMGLASS (Бельгия) и ГомельГЛАСС (Белоруссия).

К наиболее распространенным видам пеностекла можно отнести следующие:

- изоляционно-строительное, используемое для утепления ограждающих конструкций зданий;
- изоляционно-монтажное, применяемое в промышленном оборудовании и теплопроводах с рабочей температурой до 400 °С;
- влагозащитное, характеризующееся водопоглощением за 360 суток не более 1,8 % по объёму;
- специального назначения (бесщелочное и высококремнеземистое), применяющееся для тепло- и электроизоляции приборов и аппаратов и характеризующееся высокой прочностью, термостойкостью, радиопрозрачностью (температура применения – до 600 °С для бесщелочного пеностекла и до 1200 °С – для высококремнеземистого);
- декоративно-акустическое (звукопоглощающее);
- фильтрующее, характеризующееся мелкой сообщающейся пористостью.

Показатели свойств основных типов пеностекла приведены в табл. 3.

Т а б л и ц а 3

## Характеристика теплоизоляционного пеностекла

Показатели	Пеностекло				
	изоляци- онно- строи- тельное	изоляци- онно- монтаж- ное	влаго- защитное	легкое	гранулиро- ванное (зерна 5...40 мм)
Средняя плотность, кг/м <sup>3</sup>	160...250	130...160	140...180	100...130	100...140
Теплопроводность, Вт/(м·°С)	0,07... 0,086	0,058... 0,07	0,06... 0,07	0,042... 0,055	0,04... 0,055
Объемное водопоглощение, %	5...15	2...5	1...2	15	8
Прочность, МПа: на сжатие на изгиб	0,8...2,0 0,8...1,0	0,5...0,8 0,3...0,4	1,0...1,5 0,6...0,7	0,25...0,6	0,1...0,3
Предельная температура при- менения, °С	до +500	От -180 до +400			

Известно несколько способов получения ячеистой структуры пено-  
стекла:

- введение в состав шихты веществ, обильно выделяющих газообраз-  
ные продукты в процессе варки стекла;
- продувание стекольного расплава воздухом или парами;
- вспучивание размягченного стекла под вакуумом в результате рас-  
ширения воздуха, содержащегося в стекломассе;
- смешивание тонкодисперсного стекольного порошка с технической  
пенной и последующее закрепление пористой структуры спеканием;
- спекание смеси, состоящей из порошкообразного стекла и газообра-  
зователя (порошковый способ).

Сравнительный анализ показателей свойств пеностекла и пенокерами-  
ки, в том числе с учетом перспективных разработок, показан в табл. 4.

Т а б л и ц а 4

## Сравнительные показатели свойств пеностекла и пенокерамики

Наименование показателя	Перспективные раз- работки -патенты		Промышленные материалы*			Требуе- мый уровень
	RU 2291845	EP 104643	ПД-400	Gomel- glass	ПБ-300	
1	2	3	4	5	6	7
Средняя плот- ность, кг/м <sup>3</sup>	270...790	300...380	400	140...180	300	140...400
Прочность при сжатию, МПа	2,5...7,1	нд	не менее 0,8	0,7...1,2	0,5...0,75	0,8...2,5

Окончание табл. 4

1	2	3	4	5	6	7
Сорбционная влажность, % (при $\varphi = 97\%$ )	нд	нд	7,5	0,1...0,5	8...12	0,2...0,5
Теплопроводность, Вт/(м·°С)	нд	нд	0,082	0,060	0,085	0,06...0,085
Критическая температура, °С	600...625	нд	900	550	250	670
Водопоглощение, %	1...3	0,5...1,5	более 10	2,0...5,0	более 10	2,0...5,0
Стоимость, руб/м <sup>3</sup>	нд	нд	8500	6800	3500	До 3500

\*ПБ – пенобетон неавтоклавный (ГОСТ 25485–89), ПД – пенодиатомит производства «Инзенский диатомитовый комбинат» (РФ), GomeIglass – пеностекло производства ОАО «Гомельстекло» (РБ).

## 5. ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНЫЕ КЕРАМИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ

Группа энергоэффективных керамических материалов включает ряд разновидностей высокопористой керамики: диатомитовые (трепельные) и перлитокерамические огнеупорные (шамотные, динасовые, высокоглиноземистые).

Высокопористое строение этих изделий обеспечивается различными способами. Однако закрепление высокой пористости и придание изделиям прочности во всех случаях достигаются только в процессе их обжига. Основным сырьем для производства диатомитовых керамических изделий служат диатомиты и трепелы.

Диатомит – природный материал, аморфный опаловый кремнезём, представляющий собой окаменелые остатки древних диатомитовых водорослей (диатомей). Это пористая порода, на 90 % заполненная воздухом, что предопределяет её высокие теплоизоляционные характеристики. Трепел – порода более раннего происхождения и более плотная, по существу, диатомиты и трепелы являются разновидностями одной горной породы и имеют одинаковый химический состав. Их химический состав в чистом виде можно выразить формулой  $m\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ .

На территории Пензенской области выявлено два крупных месторождения диатомитов (Ахматовское и Халеневское) с запасами сырья 3,5 и 1,3 млн м<sup>3</sup>. Предварительно оцененные общие запасы диатомитов Пензенской области составляют 5...10 млн м<sup>3</sup>. В настоящее время прорабатывается инвестиционная целесообразность разработки новых залежей диатомитов («Овраг Вязовой», Халенёвское месторождение, Серманский участок). На 2011...2012 гг. год было запланировано проведение поисково-оценочных работ на участке Коржевка – Старая Селя в Никольском районе, где ожидается увеличение ресурсов разведанного диатомитового сырья до 15 млн м<sup>3</sup>. Средняя мощность слоев диатомита в Никольском районе, оцененная по обнажениям, составила 7...20 м, а протяженность выхода от 35...300 до 1500...2000 м.

До настоящего времени диатомиты из месторождений, расположенных на территории Пензенской области, широко не использовались. Имеются немногочисленные примеры организации мини-производств на базе отдельных участков цехов по выпуску строительных изделий в виде блоков из диатомита.

ООО «Диатомитовый комбинат» (г. Инза, Ульяновская область) – единственное отечественное предприятие по выпуску пенодиатомитовых изделий. Пенодиатомитовый кирпич получают формованием смеси диатомита с пенообразующей добавкой с последующей сушкой пористого сырца



и его обжигом. Основу пенообразователей составляют белковые или растительные вещества, позволяющие получать пену с высокой устойчивостью. Обычно используют клееканифольный и смолосапониновый пенообразователи, а также пенообразователь на основе гидролизной крови – ГК. В настоящее время завод выпускает изделия марок ПД-350 и ПД-400 двух типоразмеров: 250×123×65 мм (К1) и 230×112×65 мм (К2). Изделия предназначены для использования в жилищном и теплоэнергетическом строительстве для тепловой изоляции горячих поверхностей при температурах эксплуатации не более 900°С. Технические характеристики выпускаемых пенодиатомитовых изделий приведены в табл. 5.

Т а б л и ц а 5

Показатели основных свойств пенодиатомитового кирпича

Наименование показателя	Значения для марок	
	ПД-350	ПД-400
Средняя плотность, кг/м <sup>3</sup> , не более	375	450
Теплопроводность, Вт/(м·°С), не более	0,072	0,082
Прочность при сжатии, МПа, не менее	0,6	0,8
Линейная усадка при 900 °С, %, не более	2	2
Температура изолируемой поверхности, °С, не более	900	

Из анализа данных табл. 5 видно, что диатомитовые изделия обладают рядом положительных свойств, однако высокая стоимость таких изделий значительно ограничивает применение этого материала в строительстве.

Из диатомита выпускают мелкий заполнитель в виде обожжённой пенодиатомитовой крошки (табл. 6). Она предназначена для изготовления лёгких жаростойких бетонов, а также засыпной теплоизоляции гражданских и промышленных объектов, тепловых печей и теплогенерирующего технологического оборудования.

Т а б л и ц а 6

Показатели основных свойств пенодиатомитовой крошки

Наименование показателя	Значения для марок		
	А	Б	В
Насыпная плотность, кг/м <sup>3</sup> , не более	400	375	350
Теплопроводность, Вт/(м·°С), не более	0,111	0,105	0,1
Содержание зёрен крупнее 20 мм, % по массе, не более	0,2	2,0	20,0
Влажность, %, не более	5		
Температура изолируемой поверхности, °С, не более	900		

### **Перспективные направления развития технологии пенокерамики**

Исследованиями, проведенными Ивановым Н.К., установлено, что на основе опаловидного сырья можно изготавливать ячеистые материалы, которые после обжига при температуре 700 °С приобретают следующий комплекс свойств: предел прочности при сжатии – 12,1 МПа, плотность – 870 кг/м<sup>3</sup>, водопоглощение – 2,27 %. Рабочий состав содержал стеклопорошок (61,2 %), диатомит (26,2 %), NaOH (5,0 %) и воду (7,6 %). При замене стеклопорошка порошком силикат-глыбы при той же температуре обжига удалось снизить плотность изделий до 392 кг/м<sup>3</sup>, сохранив достаточно высокую прочность (3,35 МПа) и водопоглощение (не более 6 % по массе).

На основе смеси жидкого стекла с диатомитом месторождений Тюменской и Свердловской областей Н.К. Ивановым получено ячеистое стекло с плотностью 280...500 кг/м<sup>3</sup>, пределом прочности при сжатии 0,5...4 МПа и водопоглощением 2...2,25 %. Установлено, что наиболее оптимальным температурным интервалом обжига материала является 725...800 °С.

Гусевым М.С. разработаны составы и технология получения лёгкого заполнителя на основе трепельного сырья, проведены комплексные исследования физико-механических свойств и установлены технологические режимы и параметры получения лёгкого заполнителя в заводских условиях.

Христофоровым А.И. и Е.В. Лазаревым был получен пеноалюмосиликат на основе трепела и растворимого стекла. В качестве газообразователей использовались органические вещества, карбонатные породы и технический углерод. Вспенивание композиций на основе трепела позволило получить пористый материал с плотностью 160...500 кг/м<sup>3</sup>, при прочности на сжатие не ниже, чем у промышленного пеностекла.

Для изготовления пенокерамики в качестве сырьевых компонентов зарубежные производители используют, как правило, глины с низкой чувствительностью к сушке, а также отошающие добавки, разжижители и пенообразователи. Обжиг отформованного сырца производят, как правило, при температурах 900...1100 °С, после которого изделия калибруют с целью придания правильной геометрической формы. Размеры выпускаемых за рубежом лёгких керамических плит достаточно велики и составляют 600×600×80 мм или 600×400×80 мм.

Изготавливаемая во Франции строительная пенокерамика имеет среднюю плотность 600...1000 кг/м<sup>3</sup>, открытую пористость до 60...80 %, коэффициент линейного термического расширения  $5 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ , теплопроводность 0,19...0,23 Вт/(м·°С). Во Франции изготавливают также армированную пенокерамику, получаемую из шихты на основе молотой глины и шамота с добавкой стекловолокна длиной до 500 и диаметром до 13 мкм (со-

держание армирующих волокон 0,12...0,6 %). После заливки в формы изделия сушат в течение 11...23 часов, а затем распалубливают и обжигают при максимальной температуре 1050 °С. Изделия имеют среднюю плотность 800 кг/м<sup>3</sup>, прочность при сжатии 4,0 МПа, водопоглощение по объему 40...45 %.

В Польше получена пенокерамика со средней плотностью 800 кг/м<sup>3</sup>, прочностью при сжатии и при изгибе, соответственно, 4,0 МПа и 1,63 МПа, водопоглощением 42 % и теплопроводностью 0,2 Вт/(м·°С).

С начала 50-х годов прошлого столетия на предприятиях керамической отрасли США в производстве облегченных крупноразмерных и облицовочных плит широко применяется метод аэрации. Сырьевая смесь состоит из глины, шамота, разжижителя (жидкое стекло в количестве от 0,5 до 1,5 %) и синтетического пенообразователя (1 %). С целью получения более прочного сырца в вспененный шликер добавляют до 15 % гипса. Изделия сушат в течение 60 часов, а затем обжигают в течение 24 часов. Максимальная температура обжига составляет 1100 °С. Получаемые изделия характеризуются следующими свойствами: средняя плотность 860...930 кг/м<sup>3</sup>, прочность при сжатии 5,6...10,3 МПа, водопоглощение (по массе) 35...50 %.

В Германии изготавливают пено- и газокерамические изделия под торговой маркой «Siporiton». Ячеистая структура материала формируется в результате термической обработки и частичного спекания отдельных компонентов вспучивающейся сырьевой массы. При средней плотности 300...800 кг/м<sup>3</sup> изделия «Siporiton» характеризуются прочностью при сжатии 2,5...10,5 МПа, коэффициентом теплопроводности 0,11...0,2 Вт/(м·°С), высокой атмосферо- и огнестойкостью.

В Японии для пенокерамики используют смесь, состоящую из 70 % шамота и 30 % глины с добавлением 15 % уретановой смолы (от суммы минеральных компонентов). Недостаток используемых составов заключается в высокой плотности пенокерамобетона и использовании дорогостоящего полимерного стабилизатора.

В Великобритании разработан способ изготовления пенокерамики путем предварительной пропитки пористого органического материала шликером из сильно измельченной глинистой массы. Пористый органический материал содержит пенообразователь, который и формирует ячеистую структуру.

В институте ВНИИстром им. П.П. Будникова совместно с МГСУ разработана технология производства методом пенообразования пенокерамических стеновых и теплоизоляционных изделий со средней плотностью 400...700 кг/м<sup>3</sup> на основе легкоплавких глин. Предел прочности при сжатии пенокерамических изделий составляет 2,5...7,5 МПа, теплопроводность 0,11...0,16 Вт/(м·°С), морозостойкость – не менее 50 циклов. Отличительной особенностью разработанной технологии является формирова-

ние устойчивой сырцовой структуры за счёт регулирования процессов коагуляции глинистой составляющей в поризованной керамической массе.

Горбуновым Г.И. были получены пенокерамические материалы для устройства теплоизоляционных слоев, а также для изготовления несущих и самонесущих стеновых конструкций в малоэтажном строительстве со следующими физико-техническими характеристиками: общая линейная усадка 10 %, средняя плотность 450...850 кг/м<sup>3</sup>, общая пористость 65...80 %, теплопроводность 0,13...0,17 Вт/(м·°С), предел прочности при сжатии 3,3...8,5 МПа, морозостойкость свыше 50 циклов.

В Пензенском ГУАС были разработаны составы жаростойких пенокерамобетонов. В качестве исходных компонентов использовались высокоглинозёмистый цемент, монтмориллонитовые глины, шамотный или диатомовый наполнители, пенообразователь и полимерные добавки.

Перегудов В.В. поризовал глиняный шликер путем воздухововлечения в раствор, содержащий в качестве пенообразователя ССБ. В шликер сначала подавали глину, затем отощитель (30...40 %) и строительный гипс (8...10 %). Отформованные изделия через 20...30 минут распалубливали и после сушки обжигали в туннельной печи в течение 36 часов при максимальной температуре 1000...1050 °С. Изделия имели среднюю плотность 800...1100 кг/м<sup>3</sup>, прочность при сжатии 4...10 МПа, водопоглощение по объёму 25...40 %, воздушную усадку 8...10 %.

В Киевском НИИ строительной керамики пенокерамические изделия получали путем смешивания легкоплавкой глины и опилок (3:1 по объёму) с раствором пенообразователя. В конце вспенивания вводили добавку строительного гипса в количестве 15...20 %. Полученная пенокерамика характеризовалась следующими свойствами: средняя плотность – 700...800 кг/м<sup>3</sup>, прочность при сжатии – 2,5...5,6 МПа, водопоглощение – 40...50 %.

На основе сырьевой смеси, состоящей из лесса, глины и пенообразующей добавки с добавлением Na<sub>2</sub>SiF<sub>6</sub> и фосфогипса, была получена эффективная пористая керамика плотностью 600...1100 кг/м<sup>3</sup>, прочностью при сжатии 4,0...12 МПа, коэффициентом теплопроводности в сухом состоянии 0,25...0,5 Вт/(м·°С). Также с добавлением строительного гипса в качестве минеральной стабилизирующей добавки были получены материалы на основе суглинков с добавлением ССБ и смолы древесной омыленной (СДО). После сушки их обжигали при температуре 1050...1100 °С.

Несмотря на то, что в России имеются положительные результаты исследовательских работ в технологии пористых керамических изделий (пенокералит, керамоперлит, виброкерамические и термолитовые блоки, пено- и газокерамика), их внедрение, как правило, ограничилось экспериментальным или опытно-промышленным производством. По мнению ряда

экспертов, промышленное производство отечественных пенокерамических теплоизоляционных изделий освоено лишь на единичных предприятиях, использующих морально устаревшие технологии.

Обобщая изложенное, можно констатировать, что, несмотря на положительные результаты исследований и имеющиеся разработки, производство пористой строительной керамики с использованием способа пенообразования не получило широкого распространения в отечественной практике. Это связано со сложностью решения технологических задач, следствием чего является вариация показателей основных свойств и большое количество брака.

Кроме того, для существующих строительных пенокерамических изделий характерны высокая сорбционная способность и водопоглощение, которые ухудшают их теплоизоляционные свойства. Поэтому значительная часть производимой в стране пенокерамики используется в специальных конструкциях, где теплоизоляционный слой не подвергается увлажнению в процессе эксплуатации. К таким материалам можно отнести пенодиатомит и пеношамот, применяемые в конструкциях печей, а также специальную пенокерамику для военной и аэрокосмической отраслей.

Необходимо отметить, что в последнее время появляются единичные примеры успешного освоения промышленного производства пористых керамических изделий, достигнутые за счет использования зарубежных технологий, влекущих за собой широкое применение импортных сырьевых компонентов и оборудования.

### **Исследование тенденций в развитии технологий энергоэффективных стеклокерамических материалов**

Анализ тенденций развития рынка пористых стеклокерамических материалов позволяет обозначить перспективные направления совершенствования технологии выпускаемой продукции. Прогностический потенциал патентной информации определяется двумя основными факторами. Первый из этих факторов – это опережающий характер патентной информации. Он выражается в том, что информация об изобретениях и других объектах промышленной собственности становится доступной раньше появления на рынке материалов, изготовленных с использованием этих изобретений. Это позволяет предвидеть ситуацию на рынке продукции на основе анализа патентной информации с некоторым временным лагом. Второй фактор заключается в том, что существует прямая связь между интенсивностью патентования изобретений, связанных с совершенствованием продукции, и интересом потенциальных заказчиков продукции. Отсюда появляется возможность анализировать тенденции развития конкретной продукции не только по динамике объемов продаж этой продукции в течение определенного периода времени, но и по динамике патентования изобретений, связанных с совершенствованием материала из определенной группы.

Для систематизации информации были построены зависимости патентования стеклокерамических материалов в виде динамических рядов с нарастающим итогом (рис. 5).

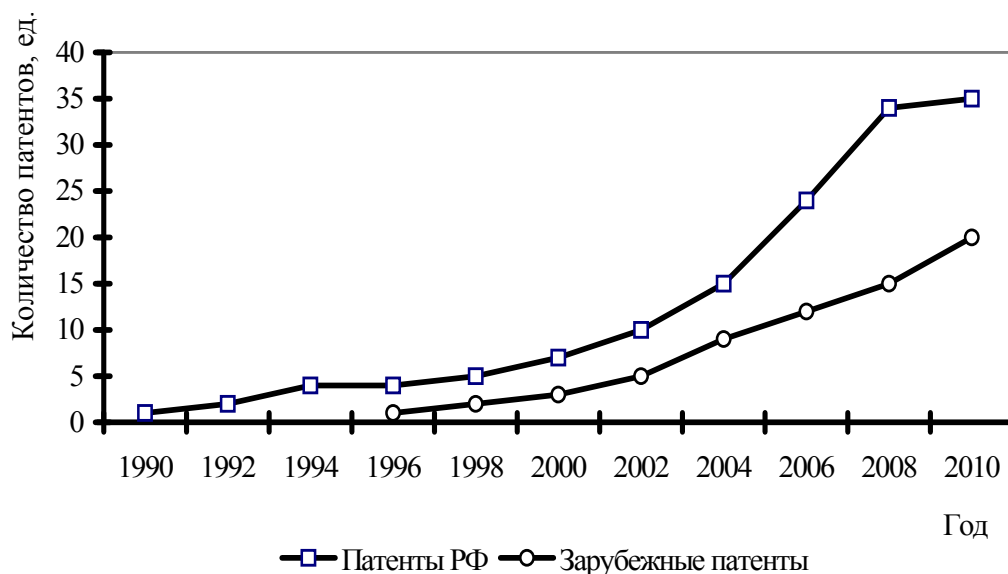


Рис. 5. Кумулятивный динамический ряд патентования

Восходящий характер кривых на рис. 5 свидетельствует о наличии интереса к данной проблематике как в РФ, так и в зарубежных странах. При этом следует отметить, что требования к конкретным технико-экономическим показателям (ТЭП) исследуемого объекта сильно отличаются по конкретным странам.

Анализ описаний изобретений позволил выявить национальные особенности патентования в исследуемой области (рис. 6 и 7).

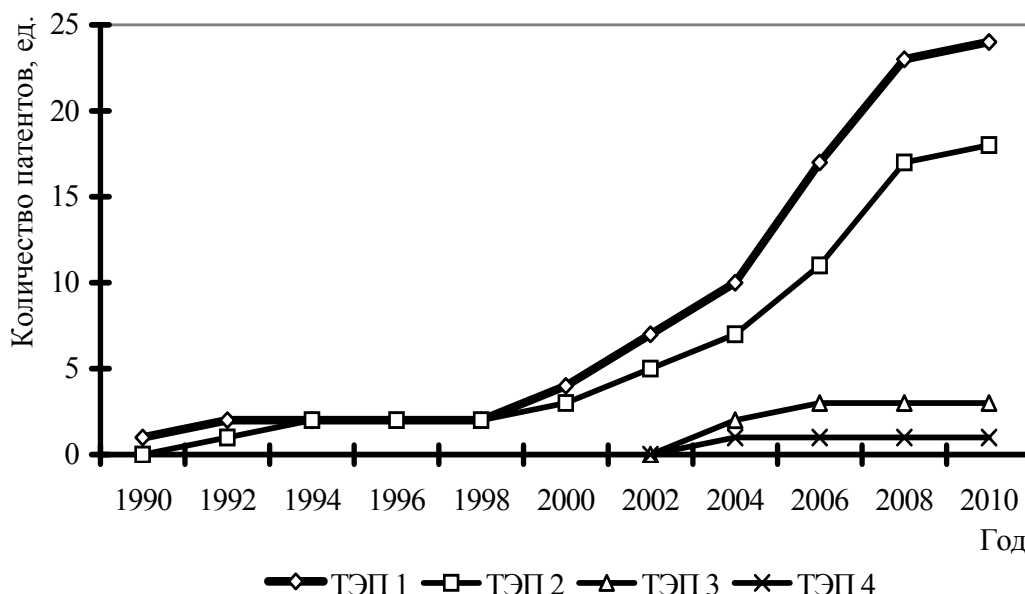


Рис. 6. Динамика патентования в РФ стеклокерамики по улучшаемым ТЭП

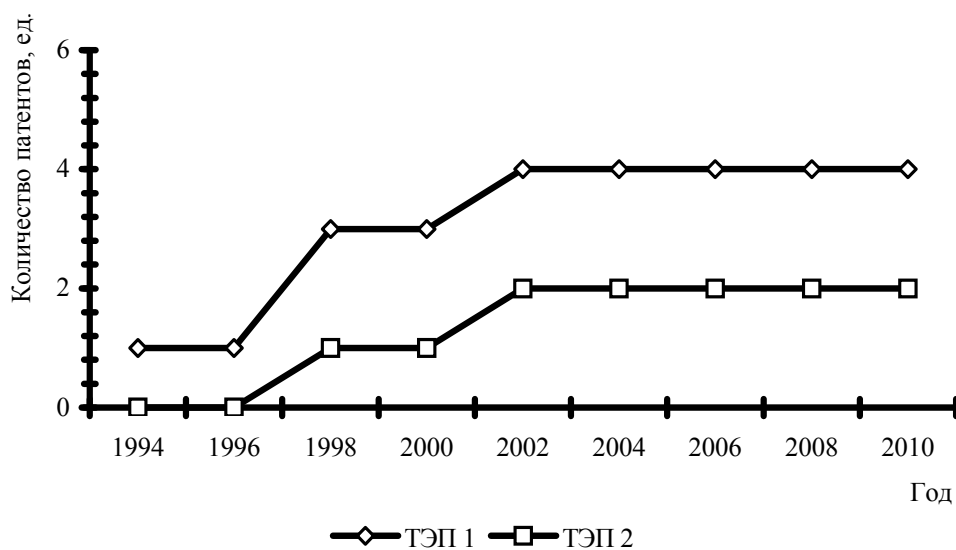


Рис. 7. Динамика патентования в ЕС стеклокерамики по улучшаемым ТЭП

Анализ патентных источников позволил сделать вывод, что улучшение физико-механических и технологических показателей стеклокерамики наиболее часто указывается отечественными изобретателями в качестве улучшаемого технико-экономического показателя. В зарубежных странах наблюдаются существенные различия в выборе приоритетного технико-экономического показателя стеклокерамики. Так, например, в ЕС, как и в России, это улучшение физико-механических и технологических показателей; в КНР – улучшение показателей безопасности и эстетики; в Японии – улучшение эстетических показателей.

Рынок применения теплоизоляционных материалов диктует необходимость существенного улучшения потребительских свойств выпускаемых материалов за счет снижения теплопроводности, плотности, водопоглощения, сорбционной способности и стоимости при сохранении достаточной прочности. По потенциалу технических и эксплуатационных характеристик теплоизоляция на основе пеностекла и пеностеклокерамики существенно превосходит традиционные строительные материалы аналогичного назначения. Изделия из пеностеклокерамики могут быть использованы для эффективной тепло- и звукоизоляции горизонтальных и вертикальных поверхностей, в том числе с высокими температурами нагрева, в качестве эффективного теплоизоляционного слоя строительных конструкций, а также для теплоизоляции грунта, дорожной одежды, технологического оборудования, инженерных коммуникаций и других объектов. Учитывая объем потребления автоклавного газобетона (наиболее близкого аналога по соотношению цена/качество), потенциальная емкость национального

рынка в теплоизоляционной пеностеклокерамике составляет 2...3 млн м<sup>3</sup> в год.

Вместе с тем, несмотря на положительные результаты исследований и имеющиеся технические разработки, производство пористых теплоизоляционных изделий из керамики, стекла или стеклокерамики с использованием способа пенообразования не получило широкого распространения в отечественной практике. Это связано со сложностью решения технологических задач, следствием чего является вариация показателей основных свойств и большое количество брака. Существенным сдерживающим фактором производства пенокерамики или пеностекла является многообразие существующих технологий и высокая стоимость процесса изготовления, которая негативно отражается на технико-экономических показателях материала в сравнении с другими теплоизоляционными минеральными материалами (пенобетон, газосиликат и др.).

Таким образом, расширение сырьевой базы для получения эффективных пеностеклокерамических изделий за счет вовлечения в производство «непластичного керамического сырья» будет способствовать повышению их конкурентоспособности в современных экономических условиях.



## 6. ТЕПЛОЭФФЕКТИВНЫЕ МАТЕРИАЛЫ НА ОСНОВЕ РАСТИТЕЛЬНОГО СЫРЬЯ И ОРГАНИЧЕСКИХ ВОЛОКОН

### Древесноволокнистые плиты

Древесноволокнистые плиты (ДВП) – это крупноразмерные листы, получаемые из древесного волокна. Для получения ДВП древесина измельчается и перерабатывается в древесное волокно, из которого получают гидромассу. Свою прочность они получают благодаря процессу переплетения волокон, проводимому с добавлением специально подготовленного клея. Их свойства регулируются с учетом назначения с помощью давления и температуры прессования, добавления специальных веществ или обработки поверхности. Волокнистые плиты классифицируют по величине средней плотности на пористые (изоляционные, мягкие), средней плотности (MDF) и твердые (HDF) виды.

В соответствии с европейским стандартом, устанавливающим требования к мягким ДВП, различают пять марок этого плитного материала: SB – общего назначения, SB.H – общего назначения влагостойкие, SB.E – общего назначения атмосферостойкие, SB.LS – конструкционные, SB.HLS – конструкционные влагостойкие. Сведения о требованиях к физико-механическим свойствам мягких ДВП представлены в табл. 7.

Т а б л и ц а 7

Показатели свойств мягких древесноволокнистых плит

Марка плиты	Толщина плиты, мм					
	Набухание за 24 ч, %			Прочность при изгибе, МПа		
	менее 10	10...19	более 19	менее 10	10...19	более 19
SB	10	10	10	0,9	0,8	0,8
SB.H	7	7	7	1,1	1,0	0,8
SB.E	6	6	6	1,2	1,1	0,9
SB.LS	8	8	8	1,2	1,1	0,9
SB.HLS	6	6	6	1,3	1,2	1,0

В России мягкие ДВП выпускает Княжпогостский завод ДВП. На рынке представлены импортные изоляционные ДВП от компании Glunz (Германия), мягкие древесно-волокнистые плиты «Софтборд» от компании Woodway Group, а также изоляционные экологические плиты Vital из древесных волокон с использованием вискозы, которые изготавливает финская компания Vital Finland.

Мягкие и твердые ДВП изготавливают «мокрым» способом. Исходное сырье – крупные кусковые отходы деревообработки, неделовые лесоматериалы – в рубительных машинах превращается в технологическую щепу длиной 20...60 мм. Далее щепа моется и сортируется для удаления посторонних включений, затем поступает в установку горячего размола. Там сырье прогревается паром с температурой до 180 °С, при которой наступает плавление лигнина, и прочность древесины, особенно поперек волокон, значительно снижается. Затем прогретая щепа подается в дефибратор, где древесина размалывается на волокна и пучки волокон. Для получения качественных плит часто требуется и вторая стадия измельчения в рафинаторах, где происходит дополнительное истирание древесины и разрушение пучков на отдельные волокна. В результате получается волокнистая масса с частицами, длина которых примерно в 100 раз больше толщины. Такое соотношение размеров порождает основное свойство волокнистой массы – способность к самостоятельному переплетению волокон, что позволяет в производстве волокнистых плит обходиться без использования связующих.

Далее волокнистая масса поступает в бассейн, в котором смешивается с водой (в пропорции примерно 1:100) и различными добавками. Из бассейна смесь поступает на отливную машину, где волокнистая масса обезвоживается за счет свободной фильтрации через сетку. При фильтрации взвешенные частицы сближаются и переплетаются, возникают силы сцепления волокон друг с другом. После фильтрации концентрация массы увеличивается до 8...10 %. Воду из массы продолжают удалять с помощью вакуумных отсосов и механического отжима, что приводит к повышению концентрации до 30...35 % (то есть до влажности 65...70 %).

После формирования волокнистого «ковра» и его резки на плиты нужного размера заготовки отправляются по разным адресам, ведь технологии изготовления твердых и мягких плит существенно различаются. Твердые плиты (толщиной 3,2 мм) получают в горячем многоэтажном прессе, где проводится отжим влаги из «ковра», сушка древесных волокон и собственно прессование на сетчатых поддонах.

Мягкие плиты не требуют прессования. Сырые заготовки сразу подаются в проходную сушилку. Используются трехзонные многоэтажные роликовые сушилки непрерывного действия, работающие по принципу противотока с рециркуляцией теплоносителя. Длина роликовых сушилок может колебаться от 30 до 90 м. Продолжительность сушки при температуре теплоносителя 130...160 °С составляет 3 ч. В конце процесса сушки предусмотрена операция охлаждения. Конечная влажность продукции составляет 8...12 %. В результате получают легкие плиты, обладающие прочностью, достаточной для выполнения всех дальнейших операций.

Производство ДВП достаточно энергоемко: на одну тонну плит затрачивается 550...650 кВт·ч электроэнергии, 4...4,5 т пара и около 110 кг условного топлива. Энергоемкость процессов объясняется большими затратами электроэнергии на размол древесины, тепловую обработку сырья и сушку волокнистого «ковра».

Изготовленные из натуральной древесины изоляционные ДВП сочетают эффективные тепло-, термо- и звукоизоляционные свойства с высокими параметрами экологической безопасности, удобны и просты в монтаже, практичны в эксплуатации и имеют широкую сферу применения. Они могут быть использованы:

- для наружной обшивки стен (плиты, которые между собой соединяются системой «паз – гребень», выступают в качестве основы для последующей отделки «дышащими» штукатурками или сайдингом, при этом плиты представляют собой прекрасную ветрозащиту);

- в качестве дополнительной теплоизоляции и инсталляционного уровня для обшивки внутренней стороны стен;

- для устройства кровли, где важны такие свойства изоляционных ДВП, как прочность, влагостойкость, высокая теплоустойчивость, способность аккумулировать тепло, малый вес.

Выпускаются и плиты для устройства «плавающих полов», когда на уложенный плитный материал настилают финишное покрытие разного рода, вплоть до керамической плитки.

Изоляционные плиты из ДВП изготавливают без использования формальдегида и других синтетических добавок, поэтому они абсолютно безопасны для человека и не наносят вред окружающей среде.

Одно из важных достоинств мягких ДВП – умение впитывать и отдавать влагу. У необработанной древесины в зависимости от климатических условий устанавливается сбалансированный уровень влажности (равновесная влажность): при температуре 23 °С и относительной влажности воздуха 50 % влагосодержание составляет 8...10 %. Благодаря высоким показателям диффузии пара изоляционные плиты способны впитывать влагу до 20 % от своего объема и потом отдавать ее, не теряя при этом изоляционных свойств. При низкой влажности в помещении накопленная плитой влага возвращается в помещение. Таким образом обеспечивается благоприятный климат в помещении, а на плитах не бывает конденсата.

Вследствие высокой пористости эти плиты по показателю теплопроводности относятся к классу «А» – классу высокоэффективных теплоизоляционных материалов с сообщающимися открытыми порами, теплопроводность которых менее 0,06 Вт/(м·°С). Изоляционная плита из ДВП сдерживает и минимизирует шум внутри помещения и не пропускает в него

шум снаружи, эффективно решает вопросы воздушной и ударной звукоизоляции.

Т а б л и ц а 8

Показатели эксплуатационных свойств мягких ДВП

Наименование показателя	Толщина, мм			
	5,5	12	16	20
Длина× ширина, мм	590×790		1200×2700	
Средняя плотность, кг/м <sup>3</sup>	330		180...240	
Теплопроводность, Вт/(м·°С)	0,046		0,038...0,044	
Паропроницаемость, мг/(м·ч·Па)	0,1		0,17	
Индекс изоляции воздушного шума, дБ	21		23...25	
			25...27	
			27...29	

Фибролит – плитный материал, изготавливаемый из смеси специально подготовленного древесного волокна (древесной шерсти) и неорганического вяжущего вещества. Древесную шерсть получают на рубительных станках в виде тонких и узких лент. В качестве вяжущего используют портландцемент или магнезиальное вяжущее. Перед использованием поверхность древесного заполнителя минерализуют раствором  $\text{CaCl}_2$ ,  $\text{Na}_2\text{SiO}_3 \cdot n\text{H}_2\text{O}$  или  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$  с целью нейтрализации вредного воздействия продуктов распада составляющих целлюлозы на процессы гидратации вяжущего.

Плиты формируют под давлением 0,5 МПа и направляют для твердения в пропарочные камеры. Затвердевшие плиты сушат до влажности не более 20 %.

Магнезиальный фибролит изготавливают без предварительной минерализации, поскольку каустический магнезит при твердении затворяется водными растворами солей магния (как правило  $\text{MgCl}_2$ ), которые способны связывать содержащиеся в древесине водорастворимые вещества.

Плиты имеют длину 240 и 300 см, ширину 60 и 120 см, толщину 3...15 см. По плотности плиты делят на марки Ф-300 (теплоизоляционный фибролит), Ф-400 и Ф-500 (теплоизоляционно-конструкционный фибролит) с пределом прочности при изгибе, соответственно, не менее 0,35; 0,6 и 1,0 МПа и теплопроводностью 0,08...0,1 Вт/(м·°С). Фибролит относится к трудногоряемым материалам, легко обрабатывается. Теплоизоляционный фибролит применяют для утепления стен и покрытий; конструкционный – для перегородок, каркасных стен и перекрытий в сухих условиях.

Целлюлозная вата или эковата – рыхлый, очень легкий теплоизоляционный материал, состоящий на 80 % из обработанной целлюлозы, на 12 % –

из антипирена (борной кислоты) и на 7 % – из антисептика (буры). Основным сырьем для ее изготовления является макулатура. Бумажная макулатура подвергается 2-стадийному измельчению (грубому и тонкому), при этом к волокнам примешивают точно определенное количество добавок.

Прогрессивным методом укладки эковаты в промышленных условиях и при больших объемах работ является метод напыления с использованием компрессорной установки производительностью до 600 кг/ч.

*Пробковая теплоизоляция* производится на основе коры пробкового дуба. Это натуральный природный нестареющий материал. В качестве тепловой изоляции в основном применяются плиты размером 1000×500 при толщине до 25...50 мм, а также фасонные изделия.

Средняя плотность – 150...200 кг/м<sup>3</sup>, теплопроводность – 0,04...0,05 Вт/(м·°С). Максимальная температура эксплуатации – до 120 °С. Относится к группе трудносгораемых. Выпускают теплоизоляционные пробковые плиты на основе пробковой крошки с органическим связующим, а также плиты «Агломерат» и «Экспанзит», в которых объединение пробковой крошки происходит в результате выделения лигнина, содержащегося в коре, при температуре прессования около 300 °С.

## 7. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ РАСТИТЕЛЬНЫХ КОМПОНЕНТОВ В ТЕХНОЛОГИИ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНЫХ КОМПОЗИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Легкие бетоны составляют одну из основных и наиболее доступных групп теплоизоляционных материалов, получаемых на неорганических вяжущих. Существует большое разнообразие легких бетонов – бетоны на пористых заполнителях, крупнопористые бетоны, ячеистые бетоны и т.д. Разновидность легкого бетона, получаемого из смеси заполнителя растительного происхождения и минерального вяжущего, известна под названием арболит или арболитовый бетон. В роли вяжущего в арболитовом бетоне, как правило, выступает портландцемент или гипс, гораздо реже – шлакощелочное вяжущее, жидкое стекло, гидравлическая известь, магнезиальный цемент.

В отличие от фибролита, состоящего из цементного вяжущего и волокон древесины, арболит изготавливается с использованием растительных органических заполнителей самого различного вида. Известны арболитовые композиции с заполнителями из скопа, стеблей хлопчатника, рисовой соломы, дробленки камыша, рисовой и подсолнечной лузги, костры конопли и других материалов. Важной положительной особенностью растительных заполнителей является их ежегодная воспроизводимость. Наличие во многих районах страны подходящего сырья позволяет развивать производство арболита для нужд местного малоэтажного строительства при минимальных первоначальных затратах.

Несмотря на потенциально разнообразную сырьевую базу, в практике строительного производства наибольшее распространение получили арболитовые бетоны, получаемые из смеси отходов деревообработки и цемента. За рубежом материалы с таким составом известны под фирменными названиями «вудстоун» (США), «дюризол» (Швейцария), «пилинобетон» (Чехия), «чентери-боад» (Япония), «велокс» (Австрия) и др. В нашей стране результаты научных разработок и практического опыта применения арболита были обобщены в технических условиях на производство арболита.

Применение в арболите разнообразных растительных заполнителей не только расширяет сырьевую базу, но и позволяет решать задачу по защите окружающей среды от загрязнения отходами сельскохозяйственного и деревообрабатывающего производства. Согласно опубликованным данным в стране ежегодно образуется более 90 млн м<sup>3</sup> отходов деревообработки, около 1 млн т рисовой соломы и 0,9 млн т конопли. Вместе с тем при правильном применении трубчатые и полые растительные отходы являются легкими заполнителями с самыми высокими теплоизолирующими показателями (табл. 9).

Т а б л и ц а 9

Сравнение показателей теплоизоляционных строительных материалов

Наименование материала	Средняя плотность, кг/м <sup>3</sup>	Пористость, %	Коэффициент теплопроводности, Вт/(м·°С), при объемной влажности, %		
			0	5	10
Костра	200	88	0,047	0,063	0,077
Солома	150	89	0,058	0,077	0,095
Камыш	200	84	0,070	0,089	0,105
Опилки	250	82	0,098	0,107	0,145
Пенополистирол:					
ПСБ	25	98	0,036	–	–
ППС	50	94	0,041	–	–
Минераловатная плита «Ursa»	20	–	0,040	–	–
	60	–	0,037	–	–

Сравнение данных, приведенных в табл. 9, показывает, что в растительных заполнителях низкая теплопроводность сочетается с их высокой естественной пористостью, превышающей 82 %.

К недостаткам растительного сырья, ограничивающим их применение в производстве строительных материалов, относится значительная влажностная деформация, низкая адгезия к минеральным вяжущим, горючесть, поражение грызунами и древесными грибами и др. Значительное негативное воздействие на цементирующий материал оказывают легкогидролизуемые производные сахарозы. Данные вещества легко вымываются из растительного заполнителя в процессе гидратации минерального вяжущего и увеличивают время твердения арболита. Это происходит вследствие образования на поверхности цемента пленки из органосодержащих соединений, существенно замедляющей скорость гидратации наиболее реакционно-способных минералов клинкера портландцемента. Количество полисахаридов значительно варьируется в зависимости от вида растительных заполнителя (табл. 10).

Т а б л и ц а 10

Содержание легкорастворимых полисахаридов в растительном сырье

Вид заполнителя	Количество полисахаридов, % от массы
Рисовая лузга	18,1
Подсолнечная лузга	21,5
Хлопковая шелуха	26,4
Сосна	17,8
Бук	23,5
Береза	26,5

С целью уменьшения негативного влияния растительного заполнителя его поверхность обрабатывают растворами минерализаторов, в качестве которых используют жидкое стекло, хлористый кальций, дисперсию поливинилацетатной эмульсии, карбамидную смолу, латексы и др.

При наличии выбора растительного сырья предпочтение отдается компонентам, в составе которых меньше вредных растворимых веществ. Например, для изготовления арболита рекомендуется в качестве сырья использовать отходы хвойных пород дерева (ель, сосна, пихта), при этом отмечается повышение прочности и долговечности арболитовых изделий.

Арболит представляет собой искусственный строительный конгломерат, получаемый путем рационального совмещения нескольких различных по структуре и свойствам компонентов. В результате твердения цементирующей части арболитовой смеси образуется несущая матрица, которая обеспечивает совместную работу всех компонентов. Минеральная матрица выполняет функцию защиты заполнителя (наиболее слабого компонента арболитовой смеси) от непосредственного влияния внешних факторов (атмосферных осадков, огня, перепада температур и др.).

Исследование свойств арболитовых бетонов проведено с использованием методологических подходов, разработанных в полиструктурной теории композиционных материалов и теории искусственных строительных конгломератов. Согласно теории композиционных материалов в зависимости от вида использованного заполнителя структуру арболита можно определить, как волокнистую или дисперсно-упрочненную. При этом вяжущая часть формирует несущий каркас материала, а целлюлозный заполнитель, являясь прерывистым компонентом, выполняет функцию армирующего вещества. В зависимости от вяжущего компонента сырьевой смеси арболит представляет собой цементный, магнезиальный, шлакощелочной, жидкостекольный, гипсовый или какой-либо другой композиционный строительный материал.

Кроме древесных отходов, для производства арболита используют растительные компоненты в форме гранул (скоп, лузга), стержневых элементов (солома, бамбук), волокон (конопля, отходы льна и др.), дисперсного порошка (дробленка камыша). К показателям, определяющим пригодность органических пористых заполнителей для производства арболита, относят их поверхностные характеристики (смачиваемость, шероховатость, адгезия и др.) и объемные свойства (плотность упаковки, прочность, модуль упругости, водо- и химостойкость).

Исходя из функционального назначения, основным показателем качества легких арболитовых бетонов является теплопроводность. Гетерогенный тип структуры арболита характеризуется сложностью описания процесса переноса тепла и прогнозирования величины теплопроводности материала. Теплопроводность, являясь структурно-чувствительной характе-



ристикой арболита, интегрально зависит от множества факторов: плотности, дефектов структуры, фазового и минералогического составов вяжущего и заполнителей, гранулометрического состава, влагосодержания, пористости. Значения теплопроводности арболитовых бетонов различных марок приведены в табл. 11.

Т а б л и ц а 11

Теплопроводность арболита (Вт/м·°С)

Вид арболита	Средняя плотность, кг/м <sup>3</sup>				
	150	300	400	500	600
На основе жидкого стекла и соломы	0,044	0,056			
На основе костры конопли	–	–	0,078	0,084	0,094
«Дюризол» (Швейцария)	–	–	–	0,093	0,12
Пилинобетон (Чехия)	–	–	0,115	0,13	0,16

Зависимость теплопроводности арболита от величины средней плотности описывается уравнением:

$$\lambda = k \cdot (a + b \cdot \rho_{\text{ср}}),$$

где  $k$  – коэффициент пропорциональности, зависящий от объемного веса и соотношения заполнителя и вяжущего (табл. 12);

$a$  и  $b$  – коэффициенты, определяемые из системы двух уравнений, составленных по экспериментальным данным: они принимаются равными соответственно  $2,286 \cdot 10^{-2}$  и  $1,05 \cdot 10^{-4}$ ;

$\rho_{\text{ср}}$  – средняя плотность высушенного до постоянного веса арболита, кг/м<sup>3</sup>.

Т а б л и ц а 12

Значение коэффициента  $k$

Заполнитель	Соотношение заполнитель/вяжущее (по массе)	$k$
Сечка из камыша с песком	0,6	1,16
То же, без песка	0,6	1,12
Дробленая древесина	0,6	1,04
То же	0,7	1,00
То же	0,8	0,8

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Рахимов, Р.З. Современные теплоизоляционные материалы [Текст]: учеб. пособие / Р.З. Рахимов, Н.С. Шелихов. – Казань: КГАСУ, 2006. – 392 с.
2. Блази, В. Справочник проектировщика. Строительная физика [Текст]: пер. с нем. / В. Блази. – М.: Техносфера, 2004. – 480 с.
3. Береговой, В.А. Эффективные пенокерамобетоны для жилищного и специального строительства [Текст] / В.А. Береговой // Строительные материалы. – 2008. – №9. – С. 93–96.
4. Комохов, П.Г. Структурная механика и теплофизика легкого бетона. [Текст] / П.Г. Комохов, В.С. Грызлов. – Вологда: Вологодский научный центр, 1992. – 313 с.
5. Прошин, А.П. Пенобетон. Состав, свойства, применение [Текст] / А.П. Прошин, В.А. Береговой, А.А. Краснощеков, А.М. Береговой. – Пенза: ПГУАС, 2005. – 164 с.
6. Рыбьев, И.А. Материаловедение в строительстве [Текст] / И.А. Рыбьев, Е.П. Казеннова. – М.: Академия, 2008. – 528 с.

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ .....	3
1. РОЛЬ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНЫХ МАТЕРИАЛОВ В ТЕПЛОВОЙ ЗАЩИТЕ ЗДАНИЙ .....	4
Общие сведения о тепловой защите зданий .....	4
Тепловая изоляция в инженерных системах .....	4
2. ТРЕБОВАНИЯ К ОТДЕЛЬНЫМ ГРУППАМ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНЫХ МАТЕРИАЛОВ.....	8
3. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ПРОЦЕССОВ СТРУКТУРООБРАЗОВАНИЯ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНЫХ МАТЕРИАЛОВ .....	19
4. НЕОРГАНИЧЕСКИЕ ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ.....	22
5. ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНЫЕ КЕРАМИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ .....	32
6. ТЕПЛОЭФФЕКТИВНЫЕ МАТЕРИАЛЫ НА ОСНОВЕ РАСТИТЕЛЬНОГО СЫРЬЯ И ОРГАНИЧЕСКИХ ВОЛОКОН.....	41
7. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ РАСТИТЕЛЬНЫХ КОМПОНЕНТОВ В ТЕХНОЛОГИИ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНЫХ КОМПОЗИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ .....	46
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК .....	50

Учебное издание

Береговой Виталий Александрович

## ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНЫЕ СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Учебно-методическое пособие

Редактор Н.Ю. Шалимова

Верстка Т.А. Лильп

---

Подписано в печать 10.11.14. Формат 60×84/16.

Бумага офисная «Снегурочка». Печать на ризографе.

Усл.печ.л. 3,02. Уч.-изд.л. 3,25. Тираж 80 экз.

Заказ №437.

---

Издательство ПГУАС.  
440028, г. Пенза, ул. Германа Титова, 28.