

УДК 666.189.3

# СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ПРОИЗВОДСТВА СТЕКЛОВИДНЫХ ВСПЕНЕННЫХ ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Канд. техн. наук И. М. ТЕРЕЩЕНКО, д-р техн. наук О. Б. ДОРМЕШКИН, канд. техн. наук А. П. КРАВЧУК, Б. П. ЖИХ (e-mail: [zhih.bp1992@gmail.com](mailto:zhih.bp1992@gmail.com))

Учреждение образования «Белорусский государственный технологический университет» (Беларусь, г. Минск)

*Изложены преимущества и недостатки теплоизоляционных материалов, предлагаемых на строительном рынке СНГ. Отмечено, что по совокупности характеристик пеностекло превосходит известные утеплители, обладая, однако, высокой стоимостью, обусловленной энергозатратностью производства, что делает его неконкурентоспособным. Рассмотрено новое перспективное направление - низкотемпературный синтез стекловидных вспененных теплоизоляционных материалов на основе отходов производства по переработке фосфатных руд. Разработанный технологический процесс обеспечивает получение вспененного материала с высокими технико-эксплуатационными свойствами и характеризуется отсутствием энергозатратных стадий. Температура вспенивания составляет 250 - 300 °С*

**Ключевые слова:** теплоизоляционные материалы, пеностекло, теплопроводность, плотность, водостойкость, энергозатратная технология, аморфное кремнеземистое сырье, отходы производства, низкотемпературный синтез, мелкогранулированный продукт

Повышение требований к теплозащите строительных конструкций и рост цен на энергоносители вызывают необходимость наращивания объемов производства теплоизоляционных материалов. При выборе утеплителя прежде всего учитывают его коэффициент теплопроводности: чем меньше этот показатель, тем более тонкий слой утеплителя требуется. Не менее значимое свойство утеплителя - его способность отталкивать влагу. К тому же утеплитель, как и все остальные элементы конструкции здания, должен быть долговечным и огнестойким. К важным качественным характеристикам теплоизоляционных материалов также относятся легкость, экологическая безопасность и удобство в работе с ними. И, конечно, преимуществом любого товара является разумное соотношение качества и цены.

Сегодня на строительном рынке Республики Беларусь имеется широкий ассортимент теплоизоляционных материалов различных ценовых категорий, которые в соответствии с существующей классификацией разделяются на три класса: газонаполненные ячеистые полимерные материалы, волокнистые неорганические плиты и маты, неорганические теплоизоляционные материалы - керамзит, пеностекло, ячеистые вспененные материалы.

Следует заметить, что весьма значительными преимуществами органополимерных утеплителей являются относительная простота процесса производства, низкие температуры синтеза, сравнительно невысокая стоимость при отличных теплоизоляционных характеристиках, что обеспечивает им широкое распространение в строительной отрасли. Например, в Республике Беларусь около 50 % производимых и импортируемых пенопластов используется в строительстве.

В то же время общеизвестно, что по химической устойчивости и долговечности органополимеры существенно уступают неорганическим утеплителям. Недолговечность, связанная с известной деструкцией органополимеров, не является их единственным недостатком. Вторая проблема - пожароопасность, поскольку все пенопласты относятся к классу «Г», т.е. представляют собой горючий материал в соответствии с классификацией материалов по пожарной безопасности. И, наконец, третья проблема - экологическая опасность, связанная с неизбежной окислительной деструкцией полимеров в ходе эксплуатации и выделения газообразных продуктов, не полезных для здоровья.

Поэтому следует надеяться, что данная тенденция - ориентация строительной отрасли на широкое использование пенопластов не будет долго-

вечной, тем более что в мировой практике замена органополимерных утеплителей на неорганические пеноматериалы в строительстве успешно притворяется в жизнь.

Определенные сдвиги произошли в производстве волокнистых неорганических теплоизоляторов, используемых для теплоизоляции ограждающих конструкций. На ряде предприятий освоена технология получения изделий из стекловолокна (рулонов и плит) по новейшей TEL-технологии, предусматривающей двухстадийное формование волокон и в связи с этим более высокое качество продукции. Особое значение приобрели жесткие плиты, используемые для утепления вертикальных ограждений зданий и сооружений [1]. Впрочем, области применения волокнистых материалов ограничиваются их большим водопоглощением и связанным с этим ухудшением теплоизолирующих свойств.

До недавнего времени керамзитовый гравий не мог конкурировать с другими видами современных теплоизоляторов по теплофизическим характеристикам, имея относительно высокую насыпную плотность, которая редко опускалась ниже  $400 \text{ кг/м}^3$ , соответственно сравнительно высоким был коэффициент теплопроводности ( $\lambda > 0,12 \text{ Вт/(мК)}$ ). Однако в последнее время ситуация за рубежом изменилась, что связано с вводом в действие модернизированных керамзитовых производств. В настоящее время в массовом порядке производится керамзитовый гравий с насыпной плотностью  $200 - 250 \text{ кг/м}^3$ , что соответствует  $\lambda = 0,065 - 0,075 \text{ Вт/(мК)}$  при прочности на сжатие более  $0,7 \text{ МПа}$ . Эти показатели уже близки к таковым для лучшего неорганического теплоизолятора - пеностекла, в то время как стоимость керамзита существенно ниже (в 1,4 - 1,6 раза меньше, чем у гранулированного пеностекла) [2].

А что же пеностекло? По комплексу характеристик, таких как: теплопроводность ( $\lambda = 0,04 - 0,09 \text{ Вт/(мК)}$ ), механическая прочность ( $0,5 - 1,0 \text{ МПа}$ ) при низкой плотности ( $150 - 200 \text{ кг/м}^3$ ), химической и биологической стойкости, негорючести, экологической безопасности, практически неограниченному сроку службы, температуре эксплуатации (от  $-200$  до  $+600 \text{ }^\circ\text{C}$ ), пеностеклу нет равных, его можно назвать эталоном среди теплоизоляторов горячего вспенивания [3]. Тем не менее на данном этапе можно утверждать, что пеностекло, полученное как по классической порошковой технологии, так и гранулированное, не может претендовать на то, чтобы стать материалом широкого потребления. Мало того, по порошковой техноло-

гии пеностекло практически уже не производится на территории СНГ.

Основные недостатки порошковой технологии: жесткая привязка к сырью - стеклу определенного химического состава; необходимость тонкого измельчения стекла; использование форм из жаростойкой стали; вспенивание порошка с низкой теплопроводностью при температуре  $800 - 840 \text{ }^\circ\text{C}$  весьма затратно, кроме того, необходимость борьбы с градиентом температуры по толщине блоков; весьма сложный и длительный режим отжига.

В итоге цена за  $1 \text{ м}^3$  блочного пеностекла достигала 300 дол. США, что не сравнимо с ценой пенополистирольной плиты толщиной  $60 \text{ мм}$  - 60 дол. США за  $1 \text{ м}^3$ . Вот почему на внутренних рынках стран СНГ доминируют пенополимеры - низкая стоимость и практически полное отсутствие конкурентоспособных неорганических утеплителей.

Идея ухода от порошковой технологии получения пеностекла была реализована путем перехода к производству гранулированного продукта, более простого в технологическом и маркетинговом отношении в сравнении с блочным. При этом термообработке подвергается не порошковая шихта, а предварительно гранулированный полуфабрикат, что позволяет:

- снизить энергетические затраты за счет упрощения технологии вспенивания (отказ от металлических форм) и отсутствия необходимости отжига;
- существенно снизить чувствительность технологии к качеству сырья, что обеспечивает возможность использования несортного боя или низкосортного стекла;
- использовать получаемый продукт для производства как блоков, так и щебня и даже гравия.

В Беларуси гранулированное пеностекло не выпускается в отличие от России, где четыре предприятия его производят, правда, в небольших объемах. Причины те же: издержки технологии и неспособность конкурировать на рынке с другими типами теплоизоляторов при объективно существующих ценах.

Одним из важнейших технологических решений в производстве гранулированного стекла стал переход от механизма сульфатного вспенивания к гидратному, что позволило в значительной мере снизить требования к сырью. С этой целью к стеклобоя обычно добавляют жидкое стекло, усиливая его газообразующее действие углеродсодержащим компонентом. Однако жидкое стекло является дорогостоящим сырьем. Еще одной технологической издержкой является необходимость тонкого помола смеси, что приводит к энергозатратам около  $105 -$

115 кВт/м<sup>3</sup>. К тому же энергопотребление при вспенивании при 800 °С достигает 100 кВт/м<sup>3</sup>. В итоге себестоимость гранулированного пеностекла составляет около 100 - ПО дол./м<sup>3</sup>. Это существенно ниже цены блочного пеностекла, но недостаточно, чтобы конкурировать, например, с органополимерами или керамзитом.

Так что же, и гранулированное пеностекло обречено на вымирание на строительном рынке? Не совсем. Пример немецкой фирмы Poraver говорит об обратном. В настоящее время это практически единственный производитель мелкогранулированного пеностекла фракции до 4 мм [4]. Этот продукт находит применение в тех сегментах рынка, где у него нет конкурентов, в частности это сфера производства теплых штукатурок, строительных растворов и сухих смесей. Стоимость подобной продукции на рынке не менее 350 евро/м<sup>3</sup>, т.е. запредельная. Однако продукт востребован, поскольку известные технологии производства вспененных продуктов на основе стекла и его боя не могут обеспечить получение мелкофракционированной продукции.

Тем не менее при анализе ситуации, сложившейся в производстве пеностекла, напрашивается принципиальный вывод о бесперспективности использования боя промышленного стекла для декларируемых целей. Такая технология не может относиться к la technologie avancee в силу ее иррациональности: стекло вначале получают при высокой температуре, удаляя большие объемы газов, после чего его измельчают, вводят газообразователи и вновь нагревают. Кроме того, стекломой практически полностью рециркулируется в современных технологиях производства стеклоизделий, в отдельных странах уровень рециклинга достигает 85 %. В связи с этим рассчитывать на стекломой как на основное сырье для получения пеностекла, вероятно, нецелесообразно.

Как же сохранить стекло как основу производства теплоизоляторов, чтобы обеспечить материалу с его помощью комплекс перечисленных ценных свойств? Разработки по технологии золь-гель процесса, а также работы Г. С. Мелконяна [5] и Р. Г. Мелконяна [6] по получению стекол химическим синтезом в автоклаве из суспензий показали, что стеклообразование может протекать уже при температуре 750 - 800 °С вместо традиционных для промышленного стекловарения 1450 - 1560 °С при условии использования аморфных кремнеземистых пород. При этом температурные области стеклообразования и газовой выделения в синтезируемом стекле могут налагаться друг на друга, что создает предпосылки для получения вспененного стекла в ходе одной термической обработки.

Эта идея проверена на практике. В России и на Украине создано несколько производств, исполь-

зующих природное кремнеземистое сырье - трепелы и диатомиты для получения ячеистых стекловидных материалов [7, 8]. Основное отличие от предыдущих технологий заключается в предварительном синтезе полуфабриката из силикатной породы и гидроксида натрия - гранулированных гидросиликатов натрия с последующей однократной термообработкой, в ходе которой осуществляется стеклообразование и одновременно вспенивание продукта.

Основными технологическими стадиями являются: подготовка, сушка и измельчение трепела, пропитка сухого трепела раствором каустика, вновь сушка с получением сырцовых гранул силиката после дробления, а затем вспенивание во вращающейся печи. Особенность технологии и одновременно ее недостаток - обязательная просушка сырья, требующая около 80 кВт/ч. Это обстоятельство, а также необходимость измельчения и довольно высокая температура вспенивания обеспечивают значительную стоимость подобных материалов (100 - ПО дол. США/м<sup>3</sup>). В данном случае снижение затрат на сырье компенсируется высокими энергозатратами (измельчение сырья, двойная сушка сырья и шихты, термообработка при 780 °С).

Тем не менее важен сам факт реализации низкотемпературного синтеза стекловидного материала. А нельзя ли еще больше снизить температуру синтеза стекла и усовершенствовать технологический процесс, исключив из него энергозатратные стадии? Оказывается, можно, что доказано работами, проводимыми на кафедре технологии стекла и керамики БГТУ. Здесь разработан промышленный вариант материало- и энергосберегающей технологии производства вспененных стекловидных материалов на основе промышленных отходов.

При выборе силикатного сырья для прямого синтеза силикатов натрия руководствовались следующими принципами: сырье должно иметь высокое содержание аморфного кремнезема; быть дисперсным, чтобы избежать затрат на его измельчение; иметь микропористую структуру для устранения проблем при взаимодействии с NaOH; материал не должен подвергаться сушке независимо от количества содержащейся в нем влаги.

Отход производства переработки фосфатов, так называемый кремнегель, в полной мере отвечает первым трем условиям. Оставалось решить вопрос с влагой, содержание которой в исходном материале достигает 60 %. Удаление влаги в разработанном технологическом процессе не осуществляется, поскольку найдена возможность ее отделения и использования в качестве среды при синтезе промежуточного продукта - гидратированных полисиликатов натрия в ходе химического взаимодействия кремнегеля с каустической содой.

Центральным звеном технологии является синтез гидратированных полисиликатов натрия из водных суспензий с ограниченной влажностью, что существенно упрощает процесс, который осуществляется в одну стадию продолжительностью до 35 - 40 мин. Речь идет о высокомодульной части ( $M = 5,0 - 7,5$ ) системы  $Na_2O-SiO_2-H_2O$ , что обеспечивает водостойкость конечного продукта - одно из основных требований к теплоизоляционным материалам. Особое значение имеют условия синтеза гидрогеля, содержание воды в системе, условия старения и др. Следует отметить, что традиционно синтез полисиликатов осуществляют из золь (разбавленных дисперсий кремнезема) в ходе многостадийного и весьма сложного технологического процесса.

### Основные характеристики вспененного продукта, полученного по разработанной технологии

Размеры гранул, мм:	
минимальный	0,1
максимальный	20
Горючесть	Негорюч (НГ)
Пористость, %	92 - 93
Коэффициент теплопроводности $\lambda$ , Вт/(м·К)	0,055 - 0,065
Удельная теплоемкость, кДж/(кг·К)	0,84
Паропроницаемость, мг/(мчПа)	0,11 - 0,12
Сорбционная влажность, %	3 - 4
Уровень звукоизоляции и шумопоглощения, дБ	49 - 51
Температура эксплуатации, °С	-200... +700
Сжимаемость	Несжимаем
Прочность при сжатии в цилиндре, МПа	0,7 - 1,5
Морозостойкость, цикл	Более 35
Водостойкость (потери массы при кипячении в течение 1 ч), %	3 - 4
Эмиссия вредных веществ	Отсутствует
Стоимость, дол. США	65 - 70

Особенностью синтезируемых промежуточных продуктов является их способность переходить в пиропластическое состояние при чрезвычайно низких температурах (от 120 °С), оптимальные же свойства материала достигаются при температурах термообработки 250 - 400 °С, что существенно ниже, чем у всех известных на сегодняшний день технологий.

Технологический процесс обеспечивает получение мелко- и узкогранулированных продуктов (размер гранул от 0,2 до 20 мм), поскольку полученный после синтеза затвердевший остеклован-

ный продукт гранулируется путем механического измельчения с последующим фракционированием. Это позволяет существенно расширить ассортимент выпускаемой продукции, производить мелкогранулированный продукт (0,5 - 4 мм), особенно востребованный на рынке.

### Область применения вспененного продукта - теплоизоляция и звукоизоляция:

- производство теплых штукатурок для стен из ячеистых бетонов;
- звуко- и теплоизоляционные межэтажные перекрытия, сэндвич-панели;
- звуко- и теплоизоляция монолитных перекрытий каркасных зданий;
- воздухопроницаемые стеновые конструкции;
- адсорбция нефтепродуктов;
- производство пеностеклобетонных панелей и блоков.

Однако изделия из данного материала не могут применяться в несущих конструкциях.

Отсутствие энергозатратных технологических стадий (измельчение, удаление влаги, а также низкие температуры вспенивания) определяет стоимость продукта на уровне 50 - 60 дол. США/м<sup>3</sup> в зависимости от granulometрии, что обеспечивает его высокую конкурентоспособность на рынке строительных материалов.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Кетов А. А., Толмачев А. В.* Пеностекло - технологические реалии и рынок // Строительные материалы. 2015. № 1. С. 17-23.
2. *Ясин Ю. Д., Ясин В. Ю., Ли А. В.* Пенополистирол. Ресурс и старение материала. Долговечность конструкций // Строительные материалы. 2002. № 5. С. 33 - 35.
1. *Бобров Ю. Л., Овчаренко Е. Г., Шойхет Б. М., Петухова Е. Ю.* Теплоизоляционные материалы и конструкции. М: Инфра-М, 2003. 268 с.
2. *Роговой М. И.* Технология искусственных пористых заполнителей и керамики. М.: Стройиздат, 1974. 320 с.
3. *Демидович Б. К.* Пеностекло. Минск: Наука и техника, 1975. 248 с.
7. *Лотов В. А.* Перспективные теплоизоляционные материалы жесткой // Строительные материалы. 2004. № 11. С. 8 - 10.
4. *Бубенков О.А., Кетов А.А., Кетов П.А. и др.* Синтез мелкогранулированного пеностеклянного материала из природного аморфного оксида кремния с наноразмерной пористостью // Нанотехнологии в строительстве. 2010. № 4. С. 19-26.
5. *Мелкоян Г. С.* Гидротермальный способ приготовления комплексного стекольного сырья «Каназит» на основе горных пород и продуктов их переработки. Ереван: Айастан, 1977. 240 с.
6. *Мелкоян Р. Г.* Аморфные горные породы и стекловарение. М.: НИИ - Природа, 2002. 266 с.
7. *Маляевский Н. И.* Щелочносиликатные утеплители. Свойства и химические основы производства // Журнал Рос. хим. об-ва им. Д. И. Менделеева. 2003. Т. XLVII. № 4. С. 39 - 45.
- Эйне И. А., Хвастухин Ю. И.* Кремнезит - новый энерго- и ресурсосберегающий строительный материал // Экотехнологии и ресурсосбережение. 2000. № 5. С. 13 - 18.