

## СТРОИТЕЛЬСТВО. АРХИТЕКТУРА

УДК 691.618

*Д. В. Михальков, В. С. Михальков*

### ПОЛУЧЕНИЕ ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ ТРЕПЕЛА ДЛЯ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНЫХ ОГРАЖДАЮЩИХ КОНСТРУКЦИЙ

UDC 691.618

*D. V. Mikhalkov, V. S. Mikhalkov*

### PRODUCTION OF THERMAL INSULATION BERGMEAL-BASED MATERIALS FOR ENERGY-EFFICIENT BUILDING STRUCTURES

#### **Аннотация**

Создание энергоэффективных и недорогих конструкций для строительства энергоэффективных жилых домов, в которых низкое потребление энергии сочетается с хорошим микроклиматом, является одной из задач строительной отрасли Беларуси. В статье исследуется белорусский трепел как основа для получения теплоизоляционных материалов. Дана краткая характеристика месторождения, минерального и химического составов, исследованы физико-механические свойства. Рассмотрены основные характеристики полученной пеностеклокерамики и варианты применения в строительстве.

#### **Ключевые слова:**

пеностеклокерамика, трепел.

#### **Abstract**

Production of energy-efficient and inexpensive building structures is one of the tasks of the construction industry of Belarus aimed at building energy-efficient homes, in which low power consumption is combined with a good microclimate. The paper investigates Belarusian bergmeal as a basis for producing thermal insulation materials. A brief description of the field and its mineral and chemical composition are given, physical and mechanical properties of bergmeal are studied. The main characteristics of the obtained foam glass ceramics and its application in construction are considered.

#### **Key words:**

foam glass ceramics, bergmeal.

Одним из направлений деятельности ученых России по новым строительным технологиям является разработка и использование энергоэффективных ограждающих конструкций для малоэтажного и крупнопанельного домостроения высокой заводской готовности. В ЦНИИСК (г. Москва, Россия)

разработана и запатентована технологическая линия производства пеностеклокерамики, строительного и теплоизоляционного назначения на основе доступного, имеющегося почти во всех регионах России кремнесодержащего сырья (трепела, диатомита и др.). Посредством использования пеностеклокерамики

© Михальков Д. В., Михальков В. С., 2017



возможно решить проблему создания массового производства материалов и конструкций нового поколения, таких как и особо легкие конструкционно-теплоизоляционные бетоны, теплоизоляционные бетоны на вяжущих гидравлических или воздушного твердения, эффективный засыпной утеплитель, высокоэффективный наполнитель в тампонаж-

ных растворах для нефтяной и газовой промышленности, для изготовления особо легких теплоизоляционных, штукатурных смесей и облегченных выравнивающих смесей для пола и др. Схема технологической линии производства гранулированной пеностеклокерамики представлена на рис. 1.

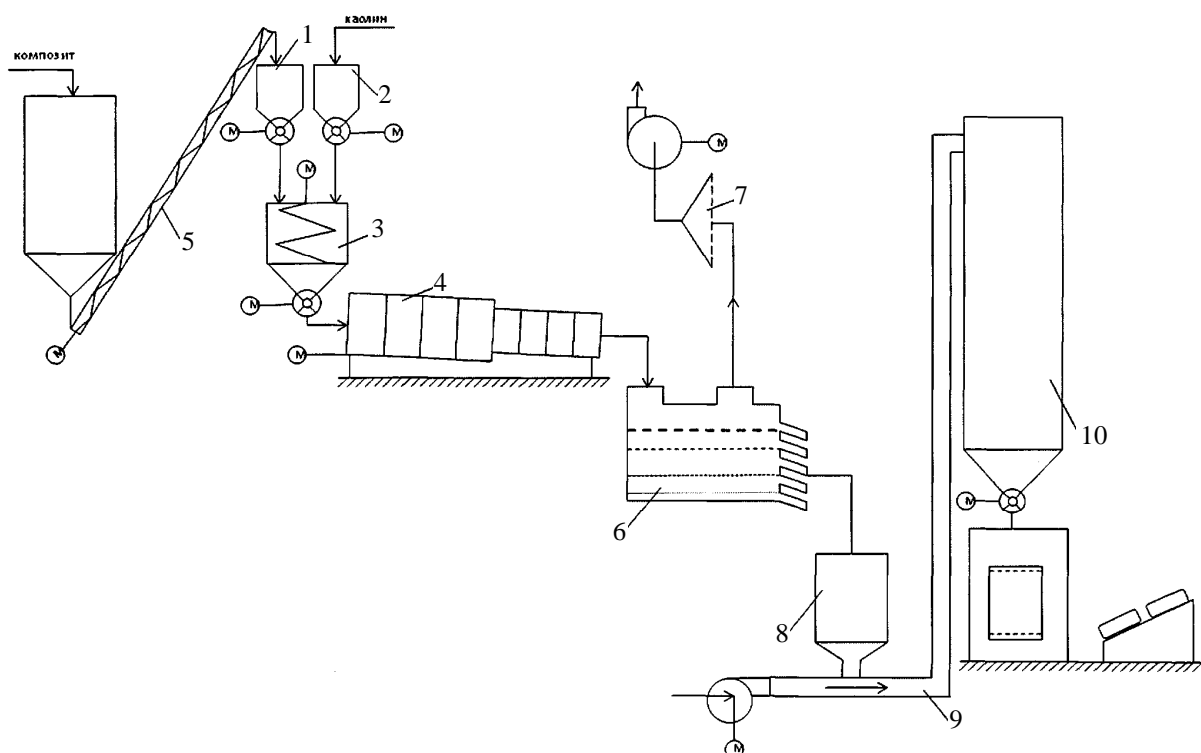


Рис. 1. Технологическая схема производства пеностеклокерамики ЦНИИСК: 1, 2 – питатели; 3 – питатель-смеситель; 4 – печь вспенивания электрическая; 5 – шнек гибкий; 6 – вибросито; 7 – фильтр картриджный; 8 – бункер; 9 – пневмопровод; 10 – силос-накопитель

Имеется такой полиминерал и в Республике Беларусь.

*Краткая характеристика месторождения.* Месторождение известкового трепела Стальное расположено в Хотимском районе Могилевской области. Северо-восточной частью площадь месторождения примыкает к государственной границе Российской Федерации.

Общие запасы на месторождении суммарно по категориям В, С<sub>1</sub>, С<sub>2</sub> составляют 48157 тыс. м<sup>3</sup> (78015 тыс. т).

*Минеральный состав трепела Могилевской области.* Трепел является сложным полиминеральным образованием, состоящим из пяти тонко перемешанных фаз: опал-кristобалита, рентгеноаморфного опала, цеолитов, кальцита и монтмориллонита.

Опал-кristобалит (SiO<sub>2</sub> с примесью H<sub>2</sub>O в опаловой части) – один из основных породообразующих минералов, представляющий собой структурно неупорядоченную форму низкотемпера-



турного кристобалита. Морфологически опал-кристобалит наблюдается в виде шарообразных образований (глобулей) размером 0,001...0,005 мм, поверхность которых осложнена полипообразными отростками, размеры которых в 20...40 раз меньше размеров глобулей. Распределение опал-кристобалита в породе неравномерно и, по данным рентгеновского количественного анализа, составляет в среднем 25...40 %. По разрезу опал-кристобалит присутствует постоянно в количестве 15...20 % с небольшими (+5 %) частыми колебаниями.

Рентгеноаморфный опал ( $\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ ) дополняет опал-кристобалит в кремнеземной составляющей породы. Содержание его определялось рентгенодифрактометрическим анализом, оно колеблется от 10 до 24,2 %, уменьшаясь при увеличении опал-кристобалита. Размеры глобулей опала – 1...8 мк. Суммарное содержание кремнеземных минералов в породе изменяется от 23 до 53 %.

Цеолиты являются постоянной составляющей пород месторождения (их содержание колеблется от 12,4 до 20,2 % при преобладающем содержании 15...19 %) и распределяются в породе достаточно равномерно (коэффициент вариации содержания цеолитов – 12 %). Рентгеновским анализом установлены цеолиты группы термостойкого клиноптилолита, химическая формула которого  $(\text{Na}_2\text{K}_2\text{Ca})_3\text{Al}_6\text{Si}_{30}\text{O}_{72} \cdot 22\text{H}_2\text{O}$ , и гейландит  $\text{Ca}_4\text{Al}_8\text{SiO}_{28}\text{O}_{72} \cdot 24\text{H}_2\text{O}$ . Гейландит в отличие от клиноптилолита разрушается при нагревании порошка до 400 °С.

Кальцит ( $\text{CaCO}_3$ ) представлен мельчайшими кристалликами неправильной, реже псевдопризматической, формы и их микроагрегатными скоплениями размером 1...20 мк, достаточно равномерно распределенными в породе. Основная часть зерен кальцита – обломки и остатки скелетов известкового нанопланктона. Кальцит в породе присутствует постоянно, содержание его

изменяется от 15 до 34 % и имеет обратную зависимость от содержания опал-кристобалита.

Глинистые минералы представлены монтмориллонитом с примесью хлорита. Монтмориллонит концентрируется в самой тонкой гранулометрической фракции (менее 0,001 мм), содержание его – до 20 %.

Терригенный материал представлен в основном чешуйками слюды (мусковита, глауконита) – около 5 %, зернами кварца и полевого шпата алевритовой размерности.

Таким образом, трепел представляет собой композиционную смесь из четырех кристаллических компонентов – опал-кристобалита, кальцита, клиноптилолита и монтмориллонита. Рентгеноаморфный опал распределен по всем вышеперечисленным составляющим с размером кристаллов менее 200 Å, а также определяется присутствием реального аморфного (биогенного) кремнезема. Наличие терригенного материала из-за незначительного количества не влияет на технологические свойства сырья.

Из-за сравнительно высокого содержания кальцита трепел месторождения Стальное отнесен к известковым полезным ископаемым. Кроме того, он характеризуется повышенным содержанием цеолитов.

По этим признакам полезное ископаемое отличается от большинства промышленных месторождений опоки и трепела. Высокое содержание карбонатов отрицательно сказывается на возможности использования трепела в некоторых областях его традиционного применения.

*Химический состав трепела.* Содержание основных окислов изменяется в значительных пределах. Отмечается обратная зависимость содержания  $\text{CaO}$  от содержания  $\text{SiO}_2$ : участкам с наибольшим содержанием  $\text{SiO}_2$  соответствует наименьшее содержание  $\text{CaO}$  и наоборот. Учитывая, что участкам с



максимальной величиной  $\text{SiO}_2$  и минимальными значениями  $\text{CaO}$  соответствуют наименьшие мощности полезного ископаемого, можно предполагать вынос части карбонатного материала в результате карстообразующих процессов.

Количество  $\text{SiO}_2$  определяется суммой кремнезема опал-кristобалита, кремнезема рентгеноаморфного, кремнезема тонкодисперсного терригенного материала, а также кремнезема цеолитов.

От общего количества  $\text{SiO}_2$  основную часть составляет реакционноспособный  $\text{SiO}_2$ , определяющий технологические свойства известкового трепела как активной минеральной добавки к цементу.

Сравнение химсостава наиболее чистых литологических разновидностей трепела и опоки показало его существенное различие по степени известковистости и кремнеземистости. Так, содержание  $\text{SiO}_2$  в опоке на 15 % больше, чем в трепеле, а содержание  $\text{CaO}$ , наоборот, на 5...10 % меньше.

Содержание  $\text{CaO}$  определяется содержанием кальцита и является нежелательным элементом в традиционных областях применения трепела. С содержанием кальцита тесно связаны потери при прокаливании (улетучивается в основном  $\text{CO}_2$ ). В известковом трепеле среднее значение потерь при прокаливании – 19,2 %, и эта величина использовалась при пересчете количества окислов на сухое вещество по части химанализов, произведенных на прокаленное вещество.

Величина  $\text{Al}_2\text{O}_3$  зависит главным образом от количества глинистого материала и цеолитов.  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  содержится в количестве чуть более 2 %.

Трепел характеризуется сравнительно высокими силикатными и глиноземными модулями и вне зависимости от гидравлической активности является полезным в качестве высокосиликатной корректирующей добавки для регулирования модулей и минералогического со-

става клинкера.

Микроэлементы имеют фоновые значения, характерные для этой группы пород. Вредные примеси As, Cd не обнаружены, содержание фтора (F) – 0,03...0,07 %, свинца (Pb) – 0,0005...0,0007 %. Содержание ртути по данным атомно-адсорбционного определения в пяти пробах колеблется от 16,94 до  $21,36 \cdot 10^{-7}$  %.

*Физико-механические свойства трепела.* Полезное ископаемое в природном состоянии представляет собой пластичную глинистую породу с угловатыми включениями сравнительно крепкой опоки размером 2...7 см (твердость опоки по шкале Мооса – 3, трепела – 1). Естественная влажность трепела – 20,7...74,1 %, средняя – 56,5 %. Естественная влажность в основном увеличивается с глубиной, наибольшие колебания влажности отмечаются в очень пористой и трещиноватой породе. Верхний предел пластичности трепела – 26...84, нижний – 18...64, число пластичности – 8...22. Консистенция трепела изменяется от полутвердой до текучепластичной. Преобладающей фракцией в трепеле являются частицы менее 0,005 мм, причем ее содержание, как и других фракций, довольно выдержанное и с глубиной становится господствующим.

При высушивании известковый трепел становится полускальной породой низкой прочности. Сопротивление одноосному сжатию сухой породы – в среднем 30,0 кг/см<sup>2</sup>. Средняя объемная плотность при естественной влажности 56,5 % составляет 1,62 т/м<sup>3</sup>. Объемная плотность в сухом состоянии – от 0,85. Объемная масса трепела в порошке в рыхлом состоянии – 0,56 т/м<sup>3</sup>.

Пористость трепела – 45...60 %.

Коэффициент размолоспособности, определенный применительно к карбонатным породам, составляет 1,2...1,3, а удельные энергозатраты на помол в 2,5...3 раза ниже, чем для клинкеров цементных заводов Респуб-



лики Беларусь.

*Получение готового продукта и его применение.* Конечный вид готовой продукции, полученной в лабораториях

Белорусского технологического университета и Белорусско-Российского университета, представлен на рис. 2.

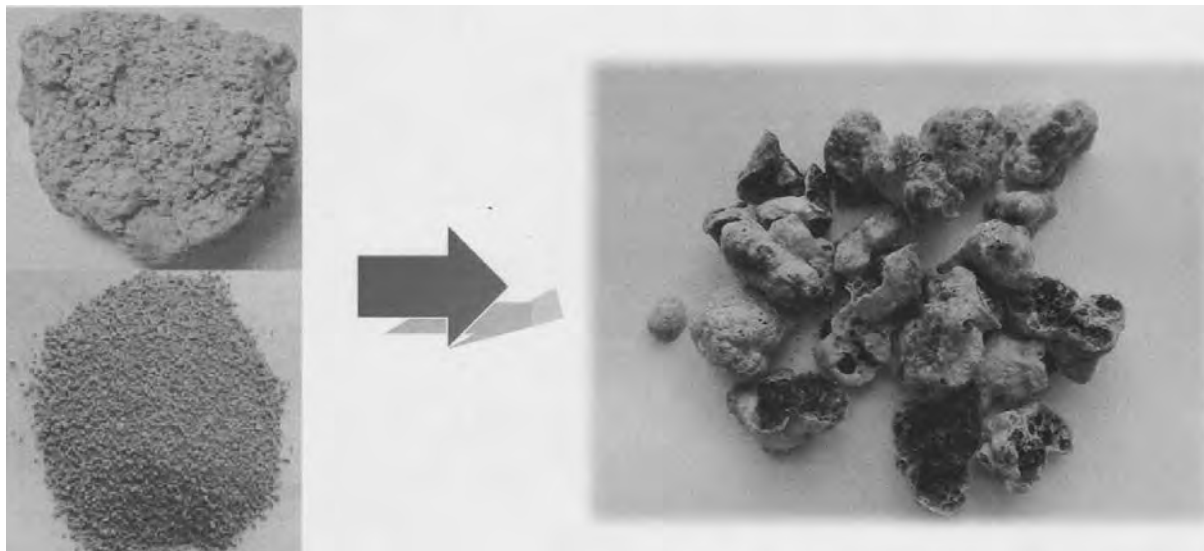


Рис. 2. Исходный продукт и конечный вид готовой пеностеклокерамики из белорусского трепела

Новая технология включает в себя производство гранулированных вспученных материалов на основе кремнистых пород и доступного натрийсодержащего сырья (сода, сульфат натрия).

Материал можно выпускать в двух товарных формах – в виде шарообразных гранул фракций от 0,3 до 10 мм насыпной плотностью 160...300 кг/м<sup>3</sup> и в виде плит плотностью 150...250 кг/м<sup>3</sup>. Первая форма – идеальный гранулированный легкий наполнитель для сверхлегких конструктивно-теплоизоляционных бетонов нового поколения (350...600 кг/м<sup>3</sup>, 0,8...0,12 Вт/(м·К)). Стена из таких бетонов толщиной не более 40 см гарантированно обеспечит требования ТНПА по теплопроводности и кратное снижение веса конструкции. Вторая форма – плитный материал, который может использоваться в качестве утеплителя как стеновых конструкций (монолитные теплоизоляционные фасады, перекрытия, внутренняя отделка, изоляция трубопроводов), так и в каркасных строительных конструкциях,

включая строительные стеновые панели.

На рис. 3 показан конструктивный вариант применения пеностеклокерамики при утеплении перекрытий над подвалом и чердачных неотапливаемых перекрытий.

На нагружаемый пол, основанием которого служит плита перекрытия, укладывается георешетка, в ячейки которой укладывается утеплитель, на него внахлест укладывается пленка, которая будет служить гидроизоляцией (пароизоляцией). Поверх пленки делается стяжка. Стяжка плавающего пола отделяется от стен тонким слоем утеплителя (демпфером). Сухую стяжку укрывают пароизоляцией и стелют основание для чистового пола.

Как теплоизоляционный материал пеностеклокерамика может применяться также при утеплении перекрытия по деревянным балкам с подшивкой досками или ориентированной стружечной плитой.

Конструкция стеновых панелей с утеплителем из пеностеклобетонных



плит на основе трепела представлена на рис. 4. Основным элементом является унифицированная панель. Каждая панель имеет несущий каркас, выполненный из оцинкованного металлического профиля либо деревянных брусков. Жесткость в каркасе дополнительно обеспечивается применением ограждающих панелей несъемной опалубки. Стеновая панель имеет размеры 600

и 1200 мм по ширине и 2400, 2700, 3000 мм по высоте, что позволяет оптимизировать ее использование в соответствии со строительной модульной системой. Удельный вес панелей составляет 700...800 кг/м<sup>3</sup>.

На рис. 5 показаны строительные конструкции с эффективным утеплителем на основе пеностеклокерамики.

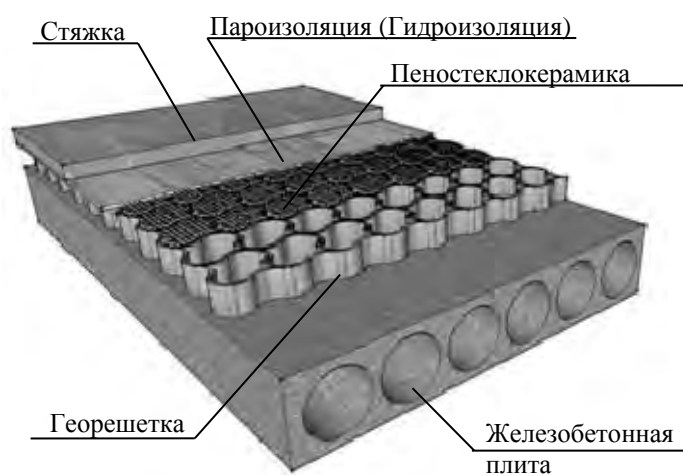


Рис. 3. Вариант конструкции системы утепления по железобетонным плитам

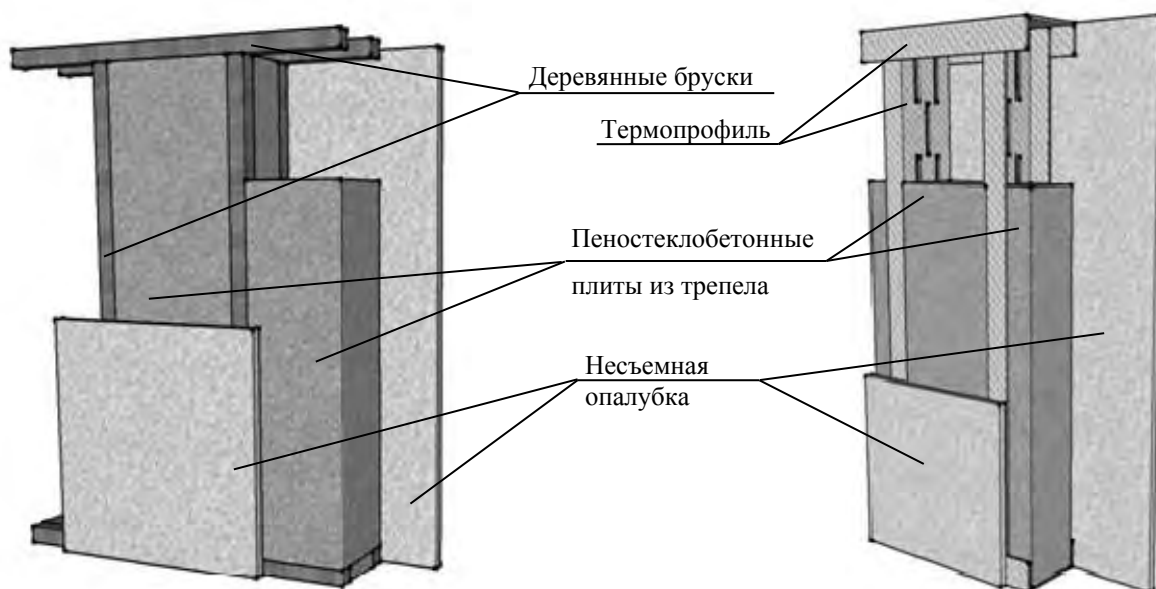


Рис. 4. Принципиальные конструкции стеновых панелей с эффективным утеплителем для малоэтажного домостроения





Рис. 5. Примеры выполнения плитных материалов для пола и стен

Основным конструктивным элементом технологии является унифицированная панель с наполнителем из гранулированной пеностеклокерамики. Панели имеют каркас, выполненный из тонкостенного оцинкованного металлического профиля, и многослойную систему ограждающей конструкции. Размеры панели кратны по ширине 0,6 м и по длине 3,0 м, толщина панели может быть 150...250 мм. Стеновые панели конструктивно и технологически аналогичны панелям перекрытия.

Гранулированный стеклокерамический наполнитель для высокотехнологичных сверхлегких бетонов обеспечивает панелям дополнительную прочность, в 2...3 раза превышающую прочность пенополистиролбетонов и пенобетонов аналогичной плотности. Сверхлегкие бетоны на основе стеклокерамики позволяют создавать однослойные ограждающие конструкции, имеющие сравнительно небольшую себестоимость, включая детали сборных стеновых панелей с качественно новым уровнем теплоизоляции. Массовое производство экономически доступных материалов на основе инертных неорганических пен с закрытыми порами со стеклокерамической матрицей, по целевым свойствам близких к пеностеклу, по себестоимости за 1 м<sup>3</sup> будет близким к производству керамзита.

Преимущества пеностеклокерами-

ки – долговечность, негорючесть и высокая огнестойкость, биостойкость и экологичность; эти показатели, в принципе, недостижимы для пенопластов и минераловатных утеплителей на органической связке.

С учетом доступности сырьевой базы (кремнистые породы, карбонаты и сульфаты щелочных металлов), достаточной близости к месторождению сырьевая составляющая себестоимости не превышает 25 р./м<sup>3</sup> по влажному материалу из карьера, 220 р./м<sup>3</sup> по высушенному продукту, стоимость гранулированного продукта сопоставима с керамзитом, а по прочности на сжатие (20...60 кг/см<sup>2</sup>) и плотности (50...150 кг/м<sup>3</sup>) даже превосходит его. По сравнению с пеностеклом аналогичной плотности гранулированная пеностеклокерамика еще более конкурентна.

При производстве пеностеклокерамики используются две стадии растворных нанотехнологий синтеза материалов (золь-гель-процесс и синтез стеклофазы), что позволяет существенно сократить длительность процесса производства, снизить капитальные затраты и полностью автоматизировать производство.

При изготовлении сборных стеновых панелей применение сверхлегких бетонов на основе гранулированных стеклокерамических наполнителей обеспечи-



вает снижение себестоимости не только за счет снижения материалоемкости, но и за счет существенного снижения трудозатрат на строительной площадке.

### Выводы

В последние годы активно изучается возможность производства пеностеклокерамики в промышленных масштабах. Этот материал обладает уникальными свойствами и эксплуатационными характеристиками, превосходящими другие теплоизоляционные материалы, ведь пеностеклокерамика – абсолютно экологичный материал, не выделяющий вредных веществ даже при пожаре и воздействии высоких температур. Устойчивость к температурному воздействию довольно высока, пеностекло является негорючим материалом, почти не подвергается разрушению на протяжении срока эксплуатации здания, не крошится, не подвержено коррозии, не насыщается влагой.

Пеностеклокерамика при своей высокой прочности хорошо поддается механической обработке. Монтаж и установка пеностеклокерамики также не является проблемой.

Полученные характеристики пено-

стеклокерамики способствуют удешевлению и ускорению строительства, позволяют отказаться от армированных стяжек при монтаже перекрытий.

Трепел как сырье для производства пеностеклокерамики является одним из оптимальных видов исходного продукта. Пеностеклокерамика на основе трепела позволяет получить готовую продукцию в виде гранул со следующими характеристиками, которые были подтверждены проведенными лабораторными испытаниями:

- размер гранул – 0,25...10 мм;
- насыпная плотность – 180...300 кг/м<sup>3</sup>;
- прочность на сжатие в цилиндре – 0,5...2,5 МПа;
- объемное водопоглощение не более 2 %.

При изготовлении сборных строительных конструкций применение сверхлегких бетонов на основе пеностеклокерамики позволит уменьшить себестоимость за счет применения недорогих строительных материалов и существенно снизить трудовые затраты при производстве строительного-монтажных работ.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Демидович, Б. К.** Производство и применение пеностекла / Б. К. Демидович. – Минск : Наука и техника, 1972. – 304 с.
2. **Мелконян, Р. Г.** Аморфные горные породы и стекловарение / Р. Г. Мелконян. – Москва : Природа, 2002. – 266 с.
3. **Орлов, А. Д.** Пеностеклокерамика из минерального сырья: новая одностадийная технология «Термогран» на основе низкотемпературного синтеза стеклофазы и ее перспективы / А. Д. Орлов // Вестн. НИЦ «Строительство». – 2014. – № 2. – С. 40–45.
4. **Венгеров, А. С.** Минералы и горные породы / А. С. Венгеров, М. В. Венгерова. – Екатеринбург : Урал. ун-т, 2017. – 132 с.

*Статья сдана в редакцию 15 сентября 2017 года*

**Дмитрий Владимирович Михальков**, канд. техн. наук, Белорусско-Российский университет.  
E-mail: MikhalkovDV@rambler.ru.

**Владимир Сергеевич Михальков**, канд. техн. наук, доц., Белорусско-Российский университет.  
E-mail: mvs1949@mail.ru.

**Dmitry Vladimirovich Mikhalkov**, PhD (Engineering), Belarusian-Russian University.  
E-mail: MikhalkovDV@rambler.ru.

**Vladimir Sergeevich Mikhalkov**, PhD (Engineering), Associate Prof., Belarusian-Russian University.  
E-mail: mvs1949@mail.ru.

*Строительство. Архитектура*

