

УДК 691.618.93

DOI 10.48612/ntp/k9gu-84ar-gdau

РАЗРАБОТКА СПОСОБА ПОСЛОЙНОЙ ПОДГОТОВКИ ШИХТЫ ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ ИЗДЕЛИЙ ИЗ ПЕНОСТЕКЛА

П. П. БУРАЛКОВ¹, В. Е. РУМЯНЦЕВА^{1,2}, А. Л. НИКИФОРОВ²

¹Ивановский государственный политехнический университет,
Российская Федерация, г. Иваново

²Ивановская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России,
Российская Федерация, г. Иваново

E-mail: logitech0303@gmail.com, k_enitb@ivgpu.ru, anikiforoff@list.ru

В предлагаемой работе рассматривается изменение технологии традиционного порошкового способа изготовления изделий из пеностекла. Стандартный способ производства пеностекляных изделий порошковым способом включает в себя такие этапы, как подготовка смеси из измельченного боя стекла и газообразователя, подача полученной шихты в металлические формы, предварительный нагрев и вспенивание шихты в одной печи, последующий отжиг полученного изделия в другой печи. Существенная разница во временных промежутках между этапами производства, а также неравномерность прогрева материала внутри металлической формы, вызванная возникающим в процессе нагрева в печи градиентом температуры, существенно затрудняет возможность для непрерывного производства изделий. Предлагаемое решение затрагивает этап предварительного прогрева порошковой смеси и направлено на обеспечение однородности температуры сырья по всей его толщине и уменьшение времени предварительной термообработки, позволяющее снизить себестоимость готовых изделий. Достижение поставленного результата достигается путем нагрева реакционной смеси отдельными слоями малой толщины на транспортной ленте перед попаданием её в металлические формы для последующего вспенивания. Количество слоев и их толщина принимаются в зависимости от времени дальнейшего вспенивания и размеров конечных изделий таким образом, чтобы обеспечить непрерывный цикл производства.

Ключевые слова: пеностекло, подогрев, послойная обработка, термообработка, порошковая технология, уплотнение, вспенивание.

DEVELOPMENT OF A METHOD OF LAYER-BY-LAYER HEATING OF THE CHARGE FOR INCREASING THE UNIFORMITY OF THE INTERNAL STRUCTURE OF FOAM GLASS PRODUCTS

P. P. BURALKOV¹, V. E. RUMYANTSEVA^{1,2}, A. L. NIKIFOROV²

¹Ivanovo State Polytechnic University,
Russian Federation, Ivanovo

²Federal State Budget Educational Establishment of Higher Education
«Ivanovo Fire Rescue Academy of State Firefighting Service of Ministry of Russian Federation
for Civil Defense, Emergencies and Elimination of Consequences of Natural Disasters»,
Russian Federation, Ivanovo

E-mail: logitech0303@gmail.com, k_enitb@ivgpu.ru, anikiforoff@list.ru

The proposed paper considers a change in the technology of the traditional powder method of manufacturing foam glass products. The standard method of producing foam glass goods by the powder method includes such steps as preparing a mixture of crushed glass and a gas-forming agent, feeding the resulting charge into metal molds, preheating and foaming the charge in one furnace, and subsequent annealing of the resulting product in another furnace. The significant difference in the time intervals between the production stages, as well as the uneven heating of the material inside the metal mold, caused by the temperature gradient that occurs during heating in the furnace, significantly complicates the possibility of continuous production of products. The proposed solution affects the preheating stage of the powder mixture and is aimed at ensuring uniformity of the temperature of the raw material throughout its width and reducing the time of preliminary heat treatment, thereby reducing the cost of finished products. This result is achieved by heating the reaction

mixture in separate layers of small width on a conveyor belt before it enters metal molds for subsequent foaming. The number of layers and their width are taken depending on the time of further foaming and the size of the final products in such a way as to ensure a continuous production cycle.

Keywords: foam glass, heating, layer-by-layer treatment, heat treatment, powder technology, sealing, foaming.

Введение

На подавляющем большинстве объектов промышленного и гражданского строительства применяются материалы, обеспечивающие поддержание внутреннего температурного режима. Развитие строительной отрасли приводит к необходимости поиска наиболее эффективных теплоизоляционных материалов. В настоящее время в качестве теплоизолирующих материалов используются чаще всего вспененные полимеры (пенополистирол, пенополиуретан и др.) [1, 2], ватные материалы (каменная и стеклянная ваты) [3, 4], вспененные неорганические материалы и связующие (газосиликаты, газобетоны, пеностекло) [5, 6, 7]. Каждый из перечисленных материалов имеет индивидуальное целевое назначение. При этом считаем необходимым обратить внимание на последнюю группу теплоизолирующих материалов, востребованность которых резко возросла в последние годы. Данные материалы, в отличие от других перечисленных, имеют высокую плотность, что позволяет использовать их в качестве конструктивных, т.е. возводить перегородки и другие ограждающие элементы без использования каркасов. Преимуществом неорганических материалов является также и то, что все они относятся к группе негорючих материалов. В то же время газосиликаты и пенобетоны требуют последующей отделки – облицовки плиткой или оштукатуривания. Изделия из пеностекла имеют целый ряд преимуществ по сравнению с традиционными теплоизоляционными материалами, такими как устойчивость к горению и гниению, высокие физико-химические и механические показатели и возможность производства изделий различной конфигурации [8, 9], в том числе с уже сформированным на поверхности декоративным покрытием [10, 11].

Кроме того, с каждым годом все больше внимания уделяется требованиям охраны окружающей среды. Важность приобретает способность материала не оказывать вредного воздействия на окружающую среду и здоровье человека как в процессе применения, так и при транспортировке и хранении изделий. Не теряет актуальности и вопрос утилизации как самих теплоизоляционных материалов, так и промышленных отходов, образующихся при их производстве. При учете этих показателей, пено-

стеклянные изделия также показывают себя крайне эффективными в применении [12]. Их сырьевая база состоит из отходов стекольной промышленности, таких как тарное и оконное стекло, при обработке которых не происходит выделения вредных веществ.

Главным недостатком данного материала является его стоимость. Затраты на производство блочного пеностекла формируются из затрат на сырье и термообработку [13, 14], и в ряде случаев к этим расходам добавляются затраты на последующий монтаж изоляционного материала с отделкой для защиты от ударных воздействий и других внешних факторов.

Актуальной современной задачей является поиск возможностей снижения всех видов затрат на производство пеностекла, а также расширение ассортимента готовых изделий на его основе.

Предварительный анализ

Для снижения себестоимости были проведены теоретические исследования, цель которых заключалась в поиске более дешевого сырья, а также снижении энергозатрат на отдельные этапы цикла производства и возможности получения готовых пеноблоков, имеющих финишную отделку наружных граней. Начальный этап работы заключался в анализе имеющегося опыта разработок в данном направлении и опубликованных исследований по данному вопросу в открытой печати.

Так некоторые исследователи уделяют внимание сырьевой основе пеностекла, а именно стеклобою [15]. Однако следует отметить, что несмотря на рекомендацию применения отходов из стекла, будь оно тарное или оконное, данный тип сырья требует высокой однородности и тщательной обработки (тонкость помола стекла может достигать показателя удельной поверхности до $6000 \text{ см}^2/\text{г}$). Поэтому, на наш взгляд, для снижения итоговой стоимости продукции при сохранении приемлемых эксплуатационных характеристик необходимо рассматривать варианты по внедрению в состав шихты более дешевых и доступных отходов производства, таких как золошлаковая смесь [16]. Для того, чтобы в процессе нагрева стекольный порошок приобрел необходимую пористую структуру, в процессе подготовки к нагреву в его состав вводится газообразователь.

Обычно в роли активной добавки применяются составы, включающие в себя твердый углерод (сажа, антрацит и др.). Однако на данный момент исследователями рассматривается применение более дешевых газообразующих компонентов, таких как доломитовая мука [17] и глицерин [18].

Другие исследователи ставили целью оптимизацию процесса термообработки [19, 20, 21]. Следует отметить, что данный вопрос является основополагающим в процессе получения пеностекла, т.к. от его организации зависит качество готовой продукции и экономические затраты, которые формируют стоимость конечного изделия. Для снижения энергозатрат применяют разнообразные типы печей, режимы обработки и снижение общей температуры процесса до минимально допустимого [22]. В отдельных случаях рассматривается изменение положения форм и направления нагрева пеностекла для повышения энергоэффективности процесса или возможность добавления непродолжительных периодов простоя печей в процессе термообработки для экономии энергии без негативных последствий для финального продукта. При этом оптимизации процесса предварительного нагрева уделяется крайне мало внимания.

При производстве пеностекла существует несколько существенно отличающихся друг от друга по типу сырья, технологическим приемам и оборудованию способов, однако наиболее распространенным является порошковый способ. Данный выбор обусловлен возможностью контроля процесса вспенивания. Контроль производится посредством легко изменяемых параметров, таких как температура и время вспенивания, а также состав используемого сырья. Технология данного способа производства состоит из нескольких этапов термообработки заранее подготовленной смеси в виде шихты, состоящей из стекольного порошка и газообразователя. Для подготовки смеси стекломатом подвергают интенсивному помолу для получения частиц с удельной поверхностью не менее $3000 \text{ см}^2/\text{г}$, после чего полученный порошок тщательно перемешивается с газообразователем. Полученная шихта подвергается предварительному прогреву, вспениванию и отжигу. После выполнения отжига, готовые блоки извлекаются из форм для последующей механической обработки в виде нарезки и упаковки. Несмотря на то, что наиболее интенсивным с точки зрения энергозатрат является непосред-

ственно этап вспенивания, проходящий при наиболее высоких температурах (800°C и более), именно подогрев смеси является лимитирующей стадией процесса при активных энергозатратах [23], что вызвано продолжительностью выполнения данного этапа. Во время этого процесса происходит плавный нагрев смеси в форме до температуры близкой к температуре вспенивания. Высокая продолжительность и сложность в практической реализации приводят к необходимости поиска альтернативных методов выполнения данного этапа производства. Необходимое время предварительного подогрева смеси зависит от применяемого на производстве оборудования, конфигурации изделия и визуального контроля. Продолжительность термообработки напрямую связана с толщиной изготавливаемого изделия и увеличивается в соответствии с законом квадратичной зависимости для нестационарной теплопроводности. Так, например, для изготовления блока пеностекла толщиной 50 мм требуемое время прогрева составляет порядка 60 мин, но при увеличении данной толщины до 100 мм наблюдается увеличение продолжительности прогрева до 240 мин, что в 4 раза больше первичного показателя [24]. Кроме того, при изготовлении изделий толщиной больше 40 мм технологический процесс значительно усложняется из-за необходимости образования градиента температур по высоте печи для обеспечения равномерного прогрева [25, 26, 27]. В случае получения неравномерной термообработки конечное изделие будет иметь неоднородные по размеру и распределению внутренние поры, что негативно сказывается как на изоляционных показателях материала, так и на его физических свойствах [28].

На основе проведенного анализа можно сделать вывод, что проблема оптимизации процесса производства изделий из пеностекла до сих пор актуальна и требует дальнейшего изучения.

Разработка нового способа получения пеностекла

Для сокращения энергозатрат и времени на выполнение подогрева, а также обеспечения равномерности внутренней структуры конечного изделия предлагается альтернативный способ выполнения этого этапа, подразумевающий послойную термообработку пеностеклольной шихты (рисунок).

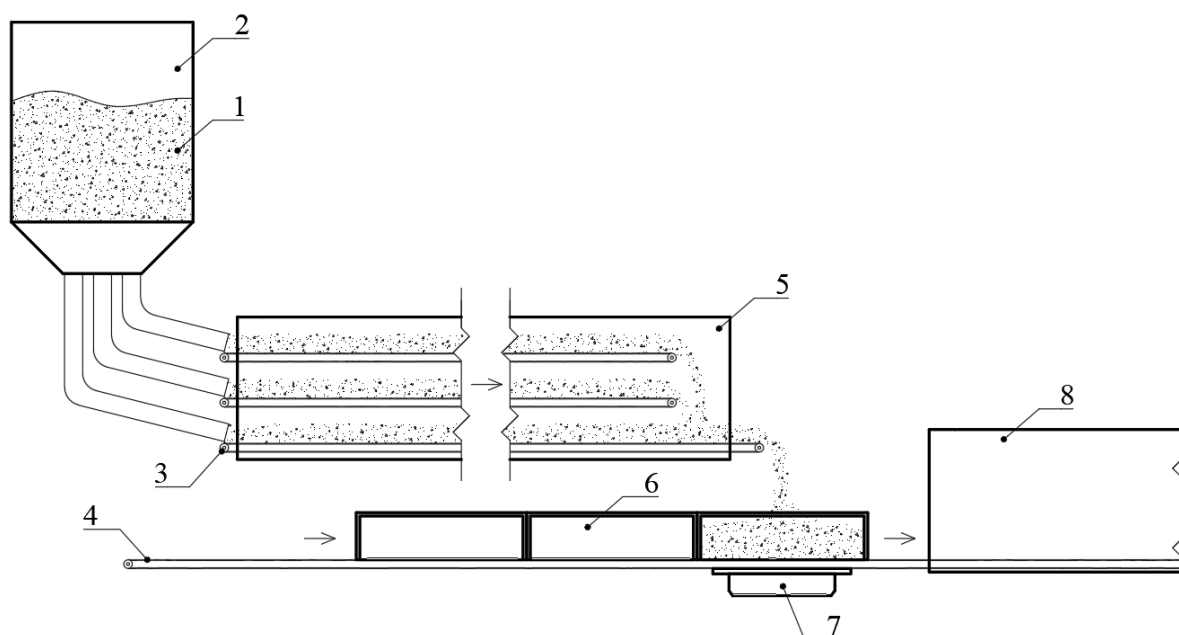


Рисунок. Схема послойной подготовки смеси для производства пеностекла порошковым способом:

1 – вспенивающая смесь (шихта); 2 – расходный бункер; 3 – транспортная лента печи прогрева;
4 – транспортная лента печи вспенивания; 5 – печь предварительного прогрева;
6 – металлическая форма; 7 – промышленный вибратор для уплотнения смеси; 8 – печь вспенивания

В данном способе предварительной тепловой подготовки смеси для изготовления изделий из пеностекла предлагается прогрев реакционной смеси по слоям толщиной до 30–35 % от требуемой толщины изделия перед их подачей в металлические формы. Ввиду сильной зависимости времени прогрева от общей толщины изделия, оборачиваемости форм и состава пеностекляной шихты, количество транспортных лент печи прогрева и толщина слоя на каждой отдельной ленте могут быть адаптированы под требования производства. Единственным обязательным условием предлагаемой технологии является одинаковое количество шихты на каждой ленте печи подогрева для обеспечения равномерного повышения температуры. При этом состав каждого слоя шихты может быть одинаковым или различаться по содержанию компонентов. Таким образом можно получать однородное по своему составу пеностекло, либо формировать пеноблок с различными по структуре и назначению слоями. Следует отметить, что в приведенном примере предложено использовать устройство предварительного подогрева трех слоев шихты. Однако, на практике, может быть реализован процесс с большим количеством слоев. Суть предлагаемого способа заключается в том, что подготовленная реакционная смесь (1) подается из расходного бункера (2) на транспортные ленты (3) при помощи питателей после чего проходит термообработку до температуры 500–600 °С проходя через печь

предварительного прогрева (5). Равномерность прогрева сырьевой смеси, обеспечиваемая за счет использования многоярусной ленты, происходит более эффективно, что обусловлено меньшей толщиной слоев. После прогрева смесь подается в металлические формы (6) с необходимыми для производства геометрическими параметрами и уплотняется при помощи промышленного площадочного вибратора (7). Затем заполненные формы (6) по транспортной ленте (4) подаются в печь для дальнейшего вспенивания (8). После вспенивания и стабилизации формы с полученным пеностеклом подвергаются отжигу для снятия внутренних напряжений. Полученное изделие затем отправляется на извлечение из металлических форм и последующей механической обработки перед упаковкой.

Ввиду низкого исходного показателя теплопроводности стекла прогрев малых объемов реакционной смеси происходит более эффективно и занимает меньше времени, а также гарантирует равномерность прогрева по всей толщине изделия. Для рассмотренного нами случая предполагается получение однородного по своей структуре и составу пеноблока, толщина которого может достигать 300 мм, при значениях предельных отклонений от номинальных размеров, не превышающих 3 мм. Предполагается, что пеностекло, получаемое таким способом, будет соответствовать

актуальным нормативным требованиям^{1, 2, 3}. При необходимости ленточную систему подачи форм в печь можно заменить на подачу в тарельчатый гранулятор с последующей сушкой во вращающейся печи для получения стандартизированного гранулированного пеностекла⁴.

Все вышесказанное требует экспериментальной проверки и отработки технологических режимов нагрева шихты, а также подбора компонентов ее состава.

Заключение

По материалам статьи можно сделать следующие выводы:

– выявлены основные негативные факторы, влияющие на стоимость производства

пеностекла, рассмотрены возможности снижения данных затрат;

– предложен новый способ и устройство для получения пеностекла с послойным подогревом сырьевой смеси, сокращающий продолжительность прогрева пеностекольной смеси и повышающий равномерность внутренней структуры материала;

– изделия из пеностекла, их геометрические параметры, а также теплоизолирующие свойства, получаемые в процессе производства рассмотренным способом, могут регулироваться с учетом потребностей строительных фирм или частных потребителей.

Список литературы

1. Миненков Д. Р. Анализ преимуществ и недостатков различных типов утеплителей для фасадов и кровли // Поколение будущего: Взгляд молодых ученых – 2024: сборник научных статей 13-й Международной молодежной научной конференции. Курск: ЗАО «Университетская книга», 2024. С. 394–396.

2. Халилов А. Э. Исследование современных теплоизоляционных материалов, применяемых в гражданском строительстве // Инвестиции, градостроительство, недвижимость как драйверы социально-экономического развития территории и повышения качества жизни населения: материалы XII Международной научно-практической конференции. Томск: Томский государственный архитектурно-строительный университет, 2022. С. 868–871.

3. Ключ В. Р. Современные теплоизоляционные материалы // Инновационный потенциал развития общества: взгляд молодых ученых: сборник научных статей 5-й Всероссийской научной конференции перспективных разработок. Курск: ЗАО «Университетская книга», 2024. С. 305–307.

4. Малоэнергоемкое связующее для изделий на основе каменной ваты / А. Д. Жуков, С. О. Артеменко, П. М. Жук [и др.] // Нанотехнологии в строительстве: научный интернет-журнал. 2025. С. 377–388.

5. Рыжих В. Д. Ячеистые бетоны как основной стеновой материал в малоэтажном

жилищном строительстве // Инновации в науке и практике: сборник статей по материалам IV международной научно-практической конференции. 2017. Уфа: Издательство Дендра. С. 184–188.

6. Жаростойкий бетон для огнезащитных покрытий строительных конструкций / В. Е. Румянцев, А. А. Овчинников, Д. В. Обручев [и др.] // Современные проблемы гражданской защиты. 2024. № 4 (53). С. 118–125.

7. Мороз А. В. Энергоэффективные конструктивные решения наружной стены жилого дома с использованием модифицированного газобетона // Вестник Донбасской национальной академии строительства и архитектуры. 2019. С. 80–83.

8. Пеностекло – современный эффективный неорганический теплоизоляционный материал / Н. И. Минько, О. В. Пучка, Е. И. Евтушенко [и др.] // Фундаментальные исследования. 2013. № 6-4. С. 849–854.

9. Куанышева К. Р. Теплоизоляция нового поколения: исследование свойств пеностекла // Вестник науки. 2024. № 12 (81). С. 1677–1682.

10. Патент № 2844929 С1 Российская Федерация МПК С 03 В 19/08, С 03 С 11/00. Способ получения блочного пеностекла / А. М. Хлыновский, О. В. Федорова, Р. А. Смит [и др.]; заявл. 22.11.2024; опубл. 11.08.2025, Бюл. № 23.

11. Буралков П. П. Применение люминофоров в изделиях из пеностекла для оформления путей эвакуации // Актуальные вопросы

¹ ГОСТ 16381-2022. Материалы и изделия строительные теплоизоляционные. Классификация. Общие технические требования. М.: Российский институт стандартизации, 2022. 10 с.

² ГОСТ 33676-2015. Материалы и изделия из пеностекла теплоизоляционные для зданий и сооружений. Классификация. Термины и определения. М.: Стандартинформ, 2020. 3 с.

³ ГОСТ 33949-2016. Изделия из пеностекла теплоизоляционные для зданий и сооружений. Технические условия. М.: Стандартинформ, 2019. 11 с.

⁴ ГОСТ Р 59574-2021. Щебень на основе пеностекла. Технические условия. М.: Стандартинформ, 2021. 16 с.

совершенствования инженерных систем обеспечения пожарной безопасности объектов: сборник материалов XII Всероссийской научно-практической конференции. Иваново: Ивановская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России. 2025. С. 53–57.

12. Буралков П. П. Исследование экологически чистых изоляционных строительных материалов на основе пеностекла // Актуальные экологические проблемы современных городов: сборник материалов II Национальной научно-практической конференции с международным участием. Иваново: Ивановский государственный политехнический университет, 2025. С. 24–26.

13. Сафончик Д. И. К вопросу о снижении себестоимости изготовления пеностекла // Качество. Технологии. Инновации: материалы VI международной научно-практической конференции. Новосибирск: Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин). 2023. С. 170–174.

14. Лобова В. А. Пути снижения себестоимости пеностекла // Молодежь и наука: шаг к успеху: сборник научных статей 7-й Всероссийской научной конференции перспективных разработок молодых ученых. Курск: Закрытое акционерное общество «Университетская книга», 2024. С. 305–308.

15. Ашпина О., Степаненко П. Стекло и пена // The Chemical Journal. 2010. С. 47–49.

16. Гольцман Б. М. Органические соединения как эффективный порообразователь для пеностекла // Новые тенденции в керамике и стекле: тезисы докладов Международной научной конференции, посвященная памяти академика РАН Шевченко Владимира Ярославовича. Новочеркасск: Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М. И. Платова, 2025. С. 156–159.

17. Федосов С. В. Управляемая кристаллизация как подход к повышению прочностных и шумозащитных свойств пеностекла на базе золошлаковых отходов // Актуальные экологические проблемы современных городов: сборник материалов II Национальной научно-практической конференции с международным участием. Иваново: Ивановский государственный политехнический университет, 2025. С. 160–163.

18. Исследование возможности применения органических веществ как порообразователя при синтезе пеностекла / Е. А. Яценко, Б. М. Гольцман, В. А. Смолий [и др.] // Физика и химия стекла. 2019. № 2. С. 189–195.

19. Моделирование физико-химических процессов при синтезе пеностекла различных модификаций: фазовый анализ и прогнозирование свойств / С. В. Федосов, М. О. Баканов,

И. С. Грушко [и др.] // Construction and Geotechnics. 2023. Т. 14, № 4. С. 19–33.

20. Баканов М. О., Грушко И. С., Кузнецов И. А. Моделирование нелинейных процессов динамики теплопереноса на стадии изотермической выдержки пеностекла // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. 2023. № 3-4(92). С. 103–115.

21. Федосов С. В., Баканов М. О., Никишов С. Н. Тепловые процессы при термической обработке пеностеклянной шихты // Научные перспективы XXI века. Достижения и перспективы нового столетия: сборник материалов XIII международной научно-практической конференции. Новосибирск: Международный научный институт «EDUCATIO», 2015. С. 160–162.

22. Патент на полезную модель № 100072 U1 Российская Федерация, МПК С 03 В 19/08. Установка для производства блоков пеностекла / В. С. Кононыхин; заявл. 23.08.2010; опубл. 10.12.2010, Бюл. № 34.

23. Тайчинов Д. Р. Технологические принципы получения изделия из пеностекла // Качество жизни: архитектура, строительство, транспорт, образование: сборник материалов III Международной научно-практической конференции. Иваново: Ивановский государственный политехнический университет, 2025. С. 307–310.

24. Городов Р. В., Кузьмин А. В. Оценка конвективной составляющей при нагреве шихты в печи в процессе производства пеностекла // Известия Томского политехнического университета. 2008. Т. 313, № 4. С. 18–22.

25. Математическая модель динамики процесса порообразования при термической обработке пеностеклянной шихты / С. В. Федосов, М. О. Баканов, А. В. Волков [и др.] // Известия вузов. Химия и химическая технология. 2014. Т. 57. Вып. 3. С. 73–79.

26. Городов Р. В. Экспериментальное определение зависимости температуропроводности пеностеклянной шихты от температуры // Известия Томского политехнического университета. 2009. Т. 314. № 4. С. 33–37.

27. Баканов М. О., Никишов С. Н. Моделирование процессов теплообмена при термической обработке пеностекла // Физика волокнистых материалов: структура, свойства, наукоемкие технологии и материалы (SMARTEX-2015): сборник материалов XVIII Международного научно-практического форума. Иваново: Ивановский государственный политехнический университет, 2015. С. 270–273.

References

1. Minenkov D. R. Analiz preimushchestv i nedostatkov razlichnykh tipov utepliteley dlya fasadov i krovli [Analysis of the advantages and disadvantages of various types of insulation for facades and roofs]. *Pokoleniye budushchego: Vzglyad molodykh uchenykh – 2024: sbornik nauchnykh statey 13-y Mezhdunarodnoy molodezhnoy nauchnoy konferentsii*. Kursk: ZAO «Universitetskaya kniga», 2024, pp. 394–396.
2. Khalilov A. E. Issledovaniye sovremennykh teploizolyatsionnykh materialov, primenyayemykh v grazhdanskom stroitel'stve [Study of modern thermal insulation materials used in civil engineering]. *Investitsii, gradostroitel'stvo, nedvizhimost' kak drayvery sotsial'no-ekonomicheskogo razvitiya territoriy i povysheniye kachestva zhizni naseleniya: materialy XII Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii*. Tomsk: Tomskiy gosudarstvennyy arkhitekturno-stroitel'nyy universitet, 2022, pp. 868–871.
3. Klyus V. R. Sovremennyye teploizolyatsionnyye materialy [Modern thermal insulation materials]. *Innovatsionnyy potentsial razvitiya obshchestva vzglyad: Molodyye uchenyye: sbornik nauchnykh statey 5-y Vserossiyskoy nauchnoy konferentsii perspektivnykh razrabotok*. Kursk: ZAO «Universitetskaya kniga», 2024, pp. 305–307.
4. Maloenergoyemkoye svyazuyushcheye dlya izdeliy na osnove kamennoy vaty [Low-energy binder for stone wool-based products] / A. D. Zhukov, S. O. Artemenko, P. M. Zhuk. *Nanotekhnologii v stroitel'stve: nauchnyy internet-zhurnal*, 2025, pp. 377–388.
5. Ryzhikh V. D. Yacheistyye betony kak osnovnoy stenovoy material v maloetazhnom zhilishchnom stroitel'stve [Cellular concrete as the main wall material in low-rise housing construction]. *Innovatsii v nauke i praktika: sbornik statey po materialam IV mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii*. Ufa: Izdatel'stvo Dendra, 2017, pp. 184–188.
6. Zharostoykiy beton dlya ognezashchitnykh pokrytiy stroitel'nykh konstruktsey [Heat-resistant concrete for fireproof coatings of building structures] / V. Ye. Rumyantseva, A. A. Ovchinnikov, D. V. Obruchev [et al.]. *Sovremennyye problemy gradostroitel'noy zashchity*, 2024, vol. 4 (53), pp. 118–125.
7. Moroz A. V. Energoeffektivnyye konstruktivnyye resheniya naruzhnoy steny zhilogo doma s ispol'zovaniyem modifitsirovannogo gazobetona [Energy-efficient design solutions for the external wall of a residential building using modified aerated concrete]. *Vestnik Donbasskoy natsional'noy akademii stroitel'stva i arkhitektury*, 2019, pp. 80–83.
8. Penosteklo – sovremennyy effektivnyy neorganicheskiy teploizolyatsionnyy material [Foam glass – a modern effective inorganic thermal insulation material] / N. I. Minko, O. V. Puchka, Ye. I. Yevtushenko [et al.]. *Fundamental'nyye issledovaniya*, 2013, vol. 4–6, pp. 849–854.
9. Kuanysheva K. R. Teploizolyatsiya novogo pokoleniya: issledovaniye svoystv penostekla [New generation thermal insulation: study of the properties of foam glass]. *Vestnik nauk*, 2024, vol. 12 (81), pp. 1677–1682.
10. A. M. Khlynovsky, O. V. Fedorova, R. A. Smith [et al.] Sposob polucheniya blochnogo penostekla [Method for producing block foam glass]. Patent 2844929 C1 Rossiyskaya Federatsiya IPC C 03 B 19/08, C 03 C 11/00, opubl. 10.12.2010, Byul. № 23.
11. Buralkov P. P. Primeneniye lyuminoforov v izdeliyakh iz penostekla dlya oformleniya putey evakuatsii [Use of phosphors in foam glass products for the design of evacuation routes]. *Aktual'nyye voprosy s poyavleniyem inzhenernykh sistem obespecheniya sistem pozharoy bezopasnosti: sbornik materialov XII Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii*. Ivanovo: Ivanovskaya pozharno-spatatel'naya akademiya GPS MCHS Rossii, 2025, pp. 53–57.
12. Buralkov P. P. Issledovaniye ekologicheskikh chistykh izolyatsionnykh stroitel'nykh materialov na osnove penostekla [Study of environmentally friendly insulating building materials based on foam glass]. *Aktual'nyye ekologicheskiye problemy sovremennykh gorodov: sbornik materialov II Natsional'noy nauchno-prakticheskoy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiyem*. Ivanovo: Ivanovskiy gosudarstvennyy politekhnicheskiy universitet, 2025, pp. 24–26.
13. Safonchik D. I. K voprosu o snizhenii sebestoimosti izgotovleniya penostekla [On the issue of reducing the cost of foam glass production]. *Kachestvo. Tekhnologii. Innovatsii: Materialy VI mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii*, Novosibirsk: Novosibirskiy gosudarstvennyy arkhitekturno-stroitel'nyy universitet (Sibstrin), 2023, pp. 170–174.
14. Lobova V. A. Puti snizheniya sebestoimosti penostekla [Ways to reduce the cost of foam glass]. *Molodezh' i nauka: shag k uspekhu: sbornik nauchnykh statey 7-y Vserossiyskoy nauchnoy konferentsii perspektivnykh razrabotok molodykh uchenykh*. Kursk: Zakrytoye aktsionernoye «Universitetskaya knizhnaya obshchestvo», 2024, pp. 305–308.
15. Ashpina O., Stepanenko P. Steklo i pena [Glass and foam]. *The Chemical Journal*, 2010, pp. 47–49.
16. Goltsman B. M. Organicheskiye soyedineniya Kak effektivnyy poroobrazovatel' dlya penostekla [Organic compounds as an effective

blowing agent for foam glass]. *Novyye tendentsii v keramike i stekle: tezisy dokladov Mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii, posvyashchennoy akademii pamyati RAN Shevchenko Vladimira Yaroslavovicha*. Novocherkassk: Yuzhno-Rossiyskiy gosudarstvennyy politekhnicheskii universitet (NPI) imeni M. I. Platova 2025, pp. 156–159.

17. Fedosov S. V. Upravlyayemaya kristallizatsiya kak podkhod k povysheniyu prochnostnykh i shumozashchitnykh svoystv penostekla na baze zoloshlakovykh otkhodov [Controlled crystallization as an approach to improving the strength and noise-protective properties of foam glass based on ash and slag waste]. *Aktual'nyye ekologicheskiye problemy sovremennykh gorodov: sbornik materialov II Natsional'noy nauchno-prakticheskoy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiyem*. Ivanovo: Ivanovskiy gosudarstvennyy politekhnicheskii universitet, 2025, pp. 160–163.

18. Issledovaniye vozmozhnosti primeniya organicheskikh veshchestv kak poroobrazovatelya pri sinteze penostekla [Study of the possibility of using organic substances as a blowing agent in the synthesis of foam glass] / Ye. A. Yatsenko, B. M. Goltsman, V. A. Smoliy [et al.]. *Fizika i khimiya stekla*, 2019. issue 2, pp. 189–195.

19. Fedosov S. V., Bakanov M. O., Grushko I. S., Bychinsky V. A. Modelirovaniye fiziko-khimicheskikh protsessov pri sinteze penostekla razlichnykh modifikatsiy: fazovyy analiz i prognozirovaniye svoystv [Modeling of physical and chemical processes in the synthesis of foam glass of various modifications: Phase analysis and prediction of properties]. *Construction and Geotechnics*, 2023, vol. 14 (4), pp. 19–33.

20. Bakanov M. O., Grushko I. S., Kuznetsov I. A. Modelirovaniye nelineynykh protsessov dinamiki teploperenosa na stadii izotermicheskoy vyderzhki penostekla [Mathematical modeling and experimental investigation of process of non-stationary heat transfer in a block foam glass sample at the annealing stage]. *Vestnik Volgogradskogo avariynno-stroitel'nogo universiteta. Seriya: Stroitel'stvo i arkhitektura*, 2023, vol. 3-4 (92), pp. 103–115.

21. Fedosov S. V., Bakanov M. O., Nikishov S. N. Teplovyye protsessy pri termicheskoy obrabotke penostekol'noy shikhty [Thermal processes during heat treatment of foam glass charge]. *Nauchnyye perspektivy XXI veka*.

Dostizheniya i perspektivy novogo rezul'tata: sbornik materialov XIII Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii. Novosibirsk: Mezhdunarodnyy nauchnyy institut «EDUCATIO», 2015, pp. 160–162.

22. Patent 100072 U1 Russian Federation, IPC C 03 B 19/08. Ustanovka dlya proizvodstva blokov penostekla [Installation for the production of foam glass blocks] / Kononykhin V. S.; publ. 10.12.2010, Byul. № 34.

23. Taychinov D. R. Tekhnologicheskiye printsipy polucheniya izdeliya iz penostekla [Technological principles of obtaining products from foam glass]. *Kachestvo zhizni: arkhitektura, stroitel'stvo, transport, obrazovaniye: sbornik materialov III Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii*. Ivanovo: Ivanovskiy gosudarstvennyy politekhnicheskii universitet, 2025, pp. 307–310.

24. Gorodov R. V., Kuzmin A. V. Otsenka konvektivnoy sostavlyayushchey pri nagreve shikhty v pechi v protsesse proizvodstva penostekla [Evaluation of the convective component during heating of the batch in a furnace during the production of foam glass]. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta*, 2008, vol. 313 (4), pp. 18–22.

25. Matematicheskaya model' dinamiki protsessa poroobrazovaniya pri termicheskoy obrabotke penostekol'noy shikhty [Mathematical model of the dynamics of the pore formation process during thermal treatment of foam glass batch] / S. V. Fedosov, M. O. Bakanov, A. V. Volkov [et al.]. *Izvestiya vuzov. Khimiya i khimicheskaya tekhnologiya*, 2014, vol. 57 (3), pp. 73–79.

26. Gorodov R. V. Eksperimental'noye opredeleniye zavisimosti temperaturoprovodnosti penostekol'noy shikhty ot temperatury [Experimental determination of the dependence of the thermal diffusivity of foam glass batch on temperature]. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta*, 2009, vol. 314 (4), pp. 33–37.

27. Bakanov M. O., Nikishov S. N. Modelirovaniye protsessov teploobmena pri termicheskoy obrabotke penostekla [Modeling of heat transfer processes during thermal treatment of foam glass]. *Fizika voloknistykh materialov: struktura, svoystva, naukoymkiye tekhnologii i materialy (SMARTEX-2015): sbornik materialov XVIII Mezhdunarodnogo nauchno-prakticheskogo foruma*, Ivanovo: Ivanovskiy gosudarstvennyy politekhnicheskii universitet, 2015, pp. 270–273.

Буралков Павел Павлович

Ивановский государственный политехнический университет,
Российская Федерация, г. Иваново

Аспирант

E-mail: logitech0303@gmail.com

Buralkov Pavel Pavlovich

Ivanovo State Polytechnic University,

Russian Federation, Ivanovo

postgraduate student

E-mail: logitech0303@gmail.com

Румянцева Варвара Евгеньевна

Ивановский государственный политехнический университет,

Российская Федерация, г. Иваново

Ивановская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России,

Российская Федерация, г. Иваново

Доктор технических наук, профессор, член-корреспондент РААСН

E-mail: k_enitb@ivgpi.ru

Rumyantseva Varvara Evgenievna

Ivanovo State Polytechnic University,

Russian Federation, Ivanovo

Federal State Budget Educational Establishment of Higher Education «Ivanovo Fire Rescue Academy

of State Firefighting Service of Ministry of Russian Federation for Civil Defense, Emergencies

and Elimination of Consequences of Natural Disasters»,

Russian Federation, Ivanovo

Doctor of Technical Sciences, Professor, Corresponding Member of the Russian Academy of Natural Sciences

E-mail: k_enitb@ivgpi.ru

Никифоров Александр Леонидович

Ивановская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России,

Российская Федерация, г. Иваново

доктор технических наук, профессор

E-mail: anikiforoff@list.ru

Nikiforov Alexander Leonidovich

Federal State Budget Educational Establishment of Higher Education «Ivanovo Fire Rescue Academy

of State Firefighting Service of Ministry of Russian Federation for Civil Defense, Emergencies

and Elimination of Consequences of Natural Disasters»,

Russian Federation, Ivanovo

Doctor of technical sciences, Professor

E-mail: anikiforoff@list.ru