

УДК 691.618.93

**Г.В. Сопегин, Н.С. Семейных**

**G.V. Sopegin, N.S. Semeynykh**

Пермский национальный исследовательский  
политехнический университет

Perm National Research Polytechnic University

## **ПОДГОТОВКА ИСХОДНЫХ КОМПОНЕНТОВ ШИХТЫ В ПРОИЗВОДСТВЕ ГРАНУЛИРОВАННОГО ПЕНОСТЕКЛА**

### **PREPARATION OF INITIAL COMPONENTS IN THE PRODUCTION OF GRANULATED FOAMED GLASS**

Рассмотрены преимущества и недостатки сырьевых компонентов, используемых в производстве гранулированного пеностекла. Представлены методы подготовки исходных компонентов и приготовления шихты. Показано преимущество термической обработки стеклобоя с целью достижения ресурсосбережения от сокращения времени его измельчения и обеспечения повышенной тонины помола.

**Ключевые слова:** гранулированное пеностекло, стеклобой, газообразователи, рекомендации по выбору исходных компонентов и методов их подготовки, ресурсосбережение.

Discusses the advantages and disadvantages of raw materials used in the production of granulated foam glass. Presents the methods of preparation of initial components and preparation of the charge. The advantage of thermal treatment of glass cullet to achieve a resource saving by reducing the time it crushing and provide increased fineness.

**Keyword:** granulated foamed glass, cullet, blowing agent, recommendations on the choice of the initial components and methods for their preparation, resource saving.

В настоящее время в России и за рубежом наблюдается тенденция к применению материалов, обеспечивающих как необходимую несущую способность конструкций, так и обладающих низкими значениями теплопроводности. К таким материалам можно отнести легкие бетоны на пористых заполнителях. Оптимальными заполнителями для легких бетонов являются материалы, имеющие закрытые внутренние ячейки правильной формы, обеспечивающие низкую плотность и водопоглощение композита при его относительно высокой прочности. Современные пористые заполнители представляют собой неорганические пористые материалы антропогенного происхождения, изготовленные с использованием разнообразного сырья и разных производственных процессов. На сегодняшний день одним из наиболее применяемых пористых заполнителей для легких бетонов является керамзитовый гравий

с насыпной плотностью 300–600 кг/м<sup>3</sup>, прочностью 1,5–2,0 МПа при коэффициенте теплопроводности 0,1–0,2 Вт/м·К [1].

Перспективными пористыми заполнителями являются также вспученные перлит и вермикулит, с помощью которых возможно производство легких бетонов плотностью менее 450–900 кг/м<sup>3</sup> при прочности до 3,5 МПа. Однако использование керамзита, вспученного перлита и вермикулита в качестве заполнителей для легкого бетона имеет существенный недостаток: они обладают высокой водопотребностью [2].

Таким образом, в современном строительстве существует актуальность поиска альтернативных материалов и технологий, направленных на возможность расширения существующей сырьевой базы и производства пористых заполнителей, позволяющих получать легкие бетоны со средней плотностью 400–800 кг/м<sup>3</sup>, а также с низкими показателями водопотребности. К одному из таких видов заполнителей для легких бетонов относится гранулированное пеностекло, плотность которого составляет всего 100–180 кг/м<sup>3</sup> [3].

Пеностекло – высокопористый теплоизоляционный материал ячеистой структуры, отличающийся высокой механической прочностью, долговечностью и высокой морозостойкостью. Пеностекло может производиться как в виде блоков, так и в виде гранул. Пеностекло как теплоизолятор замкнутопористой структуры, вобрав в себя все положительные качества многих теплоизоляционных материалов, лишено ряда их отрицательных свойств. При сравнительно низкой средней плотности (100–300 кг/м<sup>3</sup>) пеностекло имеет высокую пористость (80–95 %), обладает достаточно высокой прочностью на сжатие (не менее 0,8 МПа) и низкой теплопроводностью (0,045–0,085 Вт/м·°С). Водопоглощение по объему – не более 6 %. Как и всякое стекло, пеностекло устойчиво к воздействию гнили, различных микроорганизмов, насекомых, грызунов, совершенно не горит, не выделяет вредных веществ, не впитывает влагу.

Анализ литературы показал, что гранулированное пеностекло с насыпной плотностью 150–350 кг/м<sup>3</sup> в качестве заполнителя позволяет получать конструкционно-теплоизоляционные бетоны средней плотности – 500–900 кг/м<sup>3</sup> [3–5].

Технология производства гранулированного пеностекла основана на порошковом способе производства, когда тонкодисперсная шихта, состоящая из порошка стекла и газообразователя, спекается с одновременно протекающей поризацией массы при последующем закреплении пористой структуры и снятии внутренних напряжений, возникающих при снижении температуры.

Гранулированное пеностекло может быть получено вспучиванием гранул исходной шихты на основе кремнеземистого компонента – специального стеклогранулята, боя тарного или оконного стекла, а также природных алюмосиликатов, представляющих собой кремнистые горные породы типа диатомита, опоки, трепела с использованием щелочной активизации [5].

В настоящее время при выборе исходного кремнеземистого компонента шихты учитываются его доступность, химический состав, недефицитность и возможность снижения техногенных нагрузок на окружающую среду, а также достижение ресурсосберегающего эффекта.

Кремнеземистым компонентом, отвечающим вышеприведенным характеристикам, является стеклобой<sup>1</sup> как существующий многотоннажный отход производства оконного или тарного стекла. Однако вовлечение стеклобоя в производство пеностекла при неправильном выборе и подготовке других исходных компонентов шихты может повлечь за собой нежелательное ухудшение основных физико-механических свойств готового продукта (плотности, водопоглощения и др.).

Учитывая вышесказанное и вследствие отсутствия научно обоснованных рекомендаций по использованию стеклобоя для производства гранулированного пеностекла, на практике приходится подбирать исходные компоненты и способы их подготовки эмпирическим путем. Это определило актуальность разработки рекомендаций по выбору исходных компонентов и способам их подготовки при производстве гранулированного пеностекла на основе стеклобоя.

Одним из наиболее важных технологических этапов в производстве гранулированного пеностекла является подготовка исходных компонентов и приготовление шихты.

Выше было отмечено, что одной из важных характеристик исходного кремнеземистого компонента является его химический состав. Стеклобой, как известно, может быть получен как отход оконного или тарного стекла. В тарном стекле присутствует, как правило, больше оксида железа, являющегося плавнем и снижающего температуру спекания и вспенивания. Хорошими свойствами обладают стекла, содержащие в своем составе  $\text{SiO}_2$  – 60–72,5 мас. %,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  – 0–2,5 мас. %,  $\text{CaO}$  – 4,5–6 мас. %,  $\text{MgO}$  – 1,5–2,5 мас. %,  $\text{Na}_2\text{O}$  – 12,5–15,0 мас. % [6].

Тарное стекло предпочтительнее для применения в качестве исходного компонента, так как оно относится к так называемым «длинным» стеклам, имеющим температурный интервал размягчения от 250 до 500 °С, в котором обеспечивается величина вязкости массы от  $10^2$  до  $10^8$  Па·с. Оконное стекло, имеющее температурный интервал от 100 до 150 °С, относится к классу «коротких» промежуточных стекол.

Следует отметить, что для производства качественного пеностекла обычно используют стекла, температурный интервал вязкости которых превышает 200 °С.

Если проводить вспенивание тарного стекла при температурах, характерных для оконного стекла, это приведет к образованию большего количества сквозных пор вследствие меньшей вязкости стекломассы и меньшей величины

---

<sup>1</sup> ГОСТ Р 52233–2004. Тара стеклянная. Стеклобой. Общие технические условия. – М., 2004.

поверхностного натяжения, что вызовет повышенную величину водопоглощения пеностекла. Наоборот, если при температурах вспенивания, характерных для тарного стекла, использовать оконное стекло, можно наблюдать недопенивание (повышенную среднюю плотность) и малые размеры гранул.

На рис. 1 представлена зависимость вязкости расплава стекла от температуры и класса стекла.

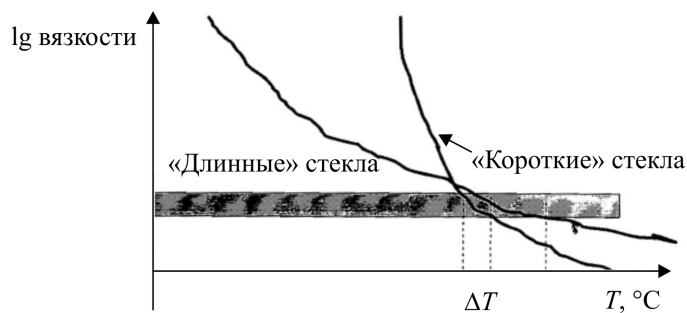


Рис. 1. Зависимость вязкости расплава стекла от температуры и класса стекла

Как следует из рис. 1, при работе с «короткими» стеклами, небольшое изменение температуры ( $\Delta T$ ) вспенивания приводит к сильному снижению вязкости. В этих условиях точность поддержания температуры вспенивания должна быть достаточно высокой (не более  $\pm 5$  °C). На «длинных» стеклах эти изменения менее резкие.

Однако, как показала практика, при производстве пеностекла лучше работать два месяца на оконном стеклобое и месяц на тарном стекле или наоборот, что зависит от количеств поступающих видов стеклобоя. Однако следует отметить, что при этом требуется каждый раз корректировать температуру в печи вспенивания. Если разделение по сортам стекла невозможно, то необходимо усреднять состав (в пределах постоянных долей с отклонениями до  $\pm 10$  %).

Первая стадия подготовки – дробление стеклобоя в молотковой дробилке и получение стеклогранулята с размером фракции не более 5 мм.

При выборе исходного сырья в виде стеклобоя необходимо учитывать степень его загрязненности землей, песком, бумагой, пластиком и другими отделяемыми водой примесями, доля которых должна составлять не более 5–8 мас. %. Если же загрязненность боя стекла составляет более 8 %, то в начале цикла подготовки стеклобоя необходимо проводить обработку стеклогранулята в аппарате очистки от примесей. Для этих целей используют измельчитель, а далее – моечно-сушильный барабан, где стеклогранулят подсушивается при  $T = 130\text{--}150$  °C до влажности не более 0,3–0,5 %<sup>2</sup>. Остаточная

<sup>2</sup> Способ изготовления гранулированного пеностекла из стеклобоя: пат. 2162825 Рос. Федерация. С03С 11/00, 10.02.2001.

влаги в стеклогрануляте в указанных количествах ускоряет скорость измельчения стекла и в последующем способствует процессу вспенивания. При большей влажности происходит набивание плотной стеклянной массы в углах мельницы и на ее стенках, удаление которой является весьма трудоемким процессом.

Однако при проведении обработки стеклогранулята, описанной выше, не происходит удаления органических включений, разложения глинистых примесей, отсутствует предварительная термическая обработка кварцевых примесей и самого стекла, что способствовало бы сокращению длительности процесса измельчения (и, следовательно, намолу футеровочного материала) и повышению тонкости помола стекла, а также существенному повышению тонины помола стекла.

Предложена предварительная термообработка дробленого стеклобоя в печи конвейерного типа при  $T = 500\text{--}550\text{ }^{\circ}\text{C}$  с последующей стадией очистки и подсушивания до необходимой влажности в моечно-сушильном барабане. Известно, что при термообработке при указанных температурах в кварцевых примесях происходит ряд полиморфных превращений, а также наблюдается изменение свойств и структуры стекла в начале так называемого аномального интервала, когда при  $T = 420\text{--}550\text{ }^{\circ}\text{C}$  стекло приобретает хрупкость, что в дальнейшем способствует облегчению его помола [7]. В то же время при данной температуре происходят дегидратация глинистых примесей и потеря пластичности глинистых частиц, что облегчает их удаление на стадии промывки гранулята.

Одной из основных стадий подготовки шихты является помол стеклогранулята в шаровых мельницах. Для качественного измельчения стеклогранулята необходимо применять шаровые мельницы, где футеровка выполнена не керамическими плитами, а бронеплитами и в качестве мелющих тел используются стальные шары или цилиндры (ципельбсы). Использовать же шаровые мельницы с бронеплитами представляется полезным, так как железо является сильным плавнем и способствует снижению температуры размягчения стеклобоя.

Практический опыт показывает, что если мельницы футерованы керамическими плитами, то при сухом измельчении намальывается большое количество футеровочного материала, который имеет более высокие температуры плавления, чем молотое стекло. Присутствие тугоплавкого компонента в составе шихты вызывает повышение температуры размягчения массы, а следовательно, при принятых режимах тепловой обработки стекло остается в твердом или малоразмягченном состоянии и при температуре вспенивания. К тому же при наличии тугоплавкого компонента наблюдается перфорация стенок пор, вызванная неравномерностью величины поверхностного натяжения размягченной стекломассы, содержащей различные по температуре размягчения частицы, и, как следствие, процесс вспенивания становится слабоуправляемым, а при большой концентрации материала футеровки и вовсе невозможным.

Измельчение стеклобоя в шаровых мельницах проводится до получения порошка стекла, имеющего удельную поверхность  $6000\text{--}7000\text{ см}^2/\text{г}$  с последующим его смешиванием с газообразователем, т.е. другим необходимым компонентом исходной шихты. Известно, что можно применять и совместный помол стеклобоя с газообразователем, например коксом, который предварительно также проходит стадию дробления до фракции 1 мм.

Чтобы добиться высокой тонины помола шихты, в мельницу следует добавлять пластификатор (олеиновую кислоту) из расчета на 5 кг шихты 0,5 г олеиновой кислоты. Введение пластификатора существенно уменьшает комкование смеси и ускоряет процесс размола компонентов шихты.

Другим основным компонентом шихты для производства пеностекла является газообразователь. Газообразователи должны отвечать следующим основным требованиям: температура выделения газа должна быть на  $50\text{--}70\text{ }^\circ\text{C}$  выше температуры начала размягчения стекольного порошка; выделение газа должно происходить равномерно в количестве, обеспечивающем необходимое парциальное давление; газообразователи не должны выделять токсичных продуктов; не должны быть дефицитными и дорогостоящими. Желательно, чтобы тонкость помола газообразователя была в 1,5–2 раза больше, чем у стекольного порошка. Чем выше тонкость помола газообразователя, тем больше прочность гранул и меньше их водопоглощение.

Выбор того или иного вида газообразователя определяется его свойствами. Так, при использовании технического углерода (сажи), который имеет удельную поверхность  $350\ 000\text{--}850\ 000\text{ см}^2/\text{г}$ , т.е. в 60–200 раз большую, чем молотое стекло, его необходимое количество может составлять 0,2–0,3 % от массы стеклопорошка. При использовании сажи нагрев шихты до температуры вспенивания должен быть достаточно быстрым, так как при медленном нагреве возможно преждевременное выгорание газообразователя из-за его большой удельной поверхности и способности к окислению.

Следует отметить, что из-за малого содержания сажи в шихте возникают трудности при ее дозировании. В этом случае следует предварительно в лабораторной мельнице произвести смешивание стеклогранулята с сажой в соотношении 8:1 в течение 30 мин. Полученную смесь загружают с остальной массой стеклогранулята для помола в основную шаровую мельницу.

Другими распространенными видами углеродистых газообразователей являются молотый кокс и антрацит, количество которых в исходной шихте составляет 2–3 и 1,5–1,7 % от массы стекла соответственно. Практический опыт показал, что антрацит следует использовать одного месторождения. Если использовать антрацит разных месторождений, то придется корректировать как температурную кривую нагрева, так и максимальную температуру вспенивания. Следует отметить, что необходимо соблюдать постоянство со-

става газообразователя, так как это обеспечивает неизменное давление газов при данной температуре.

Еще одним допустимым видом газообразователя может служить древесный уголь, у которого достаточно большая теплотворная способность (7400 ккал/кг). Для сравнения: теплотворная способность кокса равна 6400–6900 ккал/кг.

Кроме того, присутствие древесного угля в составе шихты, особенно при недостаточной тонине его измельчения или при большом разбросе его гранулометрического состава, сопровождается значительно более высоким разогревом шихты, чем при наличии кокса или антрацита, а следовательно, и менее управляемым процессом вспенивания, а также большим количеством перфорированных пор.

Это обязательно нужно учитывать. И по этой причине древесный уголь в серийном производстве пеностекла практически никогда не использовался.

Необходимо также помнить, что при получении гранулированного пеностекла вспенивание происходит при непосредственном контакте с газовой атмосферой печи, поэтому необходимо применять газообразователи, не подвергающиеся быстрому окислению. По этой причине кокс как газообразователь оказывается более предпочтительным.

Конечно, можно использовать и древесный уголь, но тогда на его основе необходимо готовить комплексный газообразователь путем добавления сульфата бария и строительного гипса, карбоксилметилцеллюлозы (КМЦ), крахмального клейстера или лигносульфоната. Роль этих составляющих комплексного газообразователя проявляется на различных этапах формирования структуры пеностекла. Сульфаты кальция и бария (1,5 и 4,0 г на 100 г порошка стекла) расширяют интервал температуры, в котором выделяется газ, образующий ячейки. Сульфат бария (барит) склонен к образованию мелких пор, тогда как гипс образует более легкую структуру ячеистого стекла. Таким образом, меняя соотношение их в шихте, можно регулировать структуру и среднюю плотность пеностекла.

Введение в смесь небольшого количества КМЦ (в количестве 0,5–0,6 г на 100 г стеклогранулята) улучшает гранулообразование на стадии грануляции смеси, повышает равномерность распределения частиц активного углерода. Аналогичное действие оказывают лигносульфонат или крахмальный клейстер.

Проведенные исследования показали, что в этом случае пеностекло получается таким же качественным, как при использовании сажи или кокса, но процесс подготовки шихты усложняется из-за большого количества добавок.

На рис. 2 приведены кривые, отражающие зависимость средней плотности пеностекла на основе боя оконного стекла от температуры вспенивания при использовании различных видов газообразователя.

Как следует из данных на рис. 2, древесный уголь более выгоден с точки зрения снижения температуры вспенивания. Однако разложение древесного

угля при низких температурах в то время, когда вязкость расплавленной стекломассы еще очень велика, приводит к появлению значительного давления в образующихся порах. А это, в свою очередь, будет служить причиной разрыва стенок пор и являться одной из основных причин появления открытых, доступных для воды пор в гранулированном пеностекле. Из представленной выше зависимости следует, что кокс способен поризовать размягченную стекломассу в интервале температур 780–850 °С, обеспечивая при этом среднюю плотность пеностекла от 150 до 300 кг/м<sup>3</sup>.

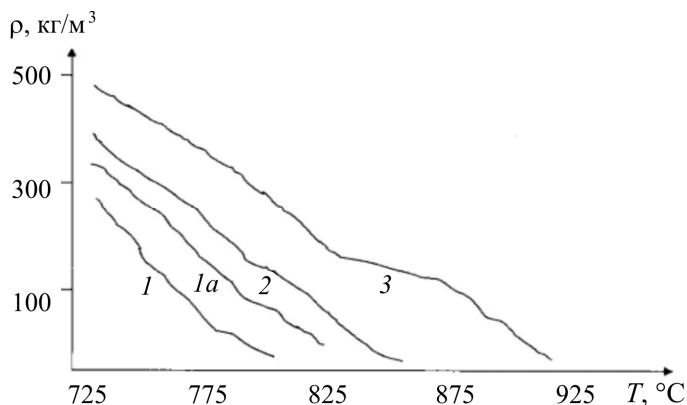


Рис. 2. Зависимость средней плотности пеностекла от температуры вспенивания при использовании различных видов газообразователей:  
1 – древесный уголь; 1а – антрацит; 2 – сажа; 3 – кокс

Далее при выборе вида газообразователя для производства пеностекла необходимо учитывать вид применяемого стеклобоя.

Стеклобой на основе оконного стекла относится к группе «коротких» стекол (см. рис. 1) и характеризуется узким интервалом температур, в котором обеспечивается необходимая для вспучивания вязкость стекломассы. Следовательно, на стадии вспенивания необходимо исключить резкое колебание температур, а отклонение от установленной температуры должно составлять не более  $\pm 5$  °С, тогда как стекломасса из стеклобоя, представленного «длинными» стеклами (бой тарного стекла), выдерживает колебание температуры при вспенивании массы в пределах  $\pm 70$  °С, при этом наблюдается образование мелкоячеистой структуры пеностекла. Установлено, что для производства пеностекла предпочтительнее использовать кокс и бой тарного стекла.

Высокие температуры вспенивания (выше 850 °С) при работе со стеклобоя использовать нежелательно, так как при повторном высокотемпературном нагреве возможна кристаллизация стекла, которая, как показано многочисленными опытами и всей мировой практикой, препятствует вспениванию и приводит к появлению перфорированных пор.



Наблюдения показывают, что водопоглощение – одно из важнейших свойств пеностекла – увеличивается по мере приближения температуры кристаллизации к температуре вспенивания.

При использовании загрязненного стеклосбоя вероятность кристаллизации возрастает, так как кристаллизация начинается с поверхности, а посторонние примеси являются центрами зарождения кристаллической фазы.

Исследования показали, что кристаллизация стекол, наблюдаемая при повторном нагревании силикатных сред, представляет собой сложный процесс, который с целью улучшения условий развития структуры пеностекла желательнее исключить.

Причины воздействия кристаллизации на процесс вспенивания расплава стекла известны давно. Показано, что кристаллизация резко меняет величины вязкости и поверхностного натяжения, т.е. тех факторов, которые являются определяющими при вспенивании. Известно, например, что крупные неравномерные кристаллы ухудшают вспенивание за счет повышения поверхностного натяжения и вязкости или вовсе препятствуют получению пеностекла, поэтому в мировой практике кристаллизации стекла стараются избежать путем понижения температуры вспенивания или введением антикристаллизационных добавок в стекло (например, до 6 % пиролюзита, 3–5 % оксида магния или алюминия). Введение даже сотых долей оксида магния в состав исходного стекла резко снижает рост кристаллов. Из литературы [8] известно, что оксиды кадмия, селена и хрома даже в небольших количествах стимулируют кристаллизацию стекла, из-за чего ухудшается структура пеностекла, а процесс вспенивания замедляется.

Введение добавок усложняет процесс, поэтому более радикальным является снижение температуры вспенивания до температур ниже 850 °С.

Необходимо также отметить, что нужно воздерживаться от внесения в состав шихты тонко измельченного песка (особенно в количестве более 8–10 мас. %), повышающего максимальную температуру вспенивания и являющегося причиной образования кристаллической фазы. Песок можно вводить в указанных количествах, если при вспенивании используются карбонатные газообразователи. Это связано с тем, что при их использовании температура вспенивания ниже температуры начала кристаллизации стекла (830–850 °С) при повторном его нагреве (первый нагрев осуществляется при его производстве). При введении дополнительно молотого песка в шихту, помимо инициирования кристаллизации стекла, увеличения температуры размягчения и вспенивания, происходит повышение его вязкости.

Молотый песок можно использовать только в качестве опудривающего материала, но и здесь лучше использовать, например, каолин.

При производстве гранулированного пеностекла необходимой стадией является формование исходных гранул с использованием связующих ве-

ществ, в качестве которых можно использовать КМЦ, фенолформальдегидные смолы, лигносульфонаты, крахмальный клейстер, а также жидкое стекло, цементы, поливиниловый спирт, лигнины. В ряде проведенных опытов в качестве связующих для гранулированного пеностекла были опробованы жидкое стекло, КМЦ и лигносульфонаты.

Однако применение жидкого стекла в качестве связующего не рекомендуется по нескольким причинам: высокая стоимость, необходимость использовать ускоритель твердения (двухкомпонентный состав) и трудоемкость подготовки раствора необходимой плотности. Кроме того, отмечается понижение прочности пеностекла, связанное с появлением многочисленных неравномерно распределенных прослоек жидкого стекла в гранулированном материале. Жидкое стекло рекомендуется применять только при высокотемпературном вспенивании ( $T = 850\text{--}1000\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) и при использовании в качестве газообразователя карбида кремния или кокса.

Для формования гранул наиболее приемлемым видом связующего представляется применение КМЦ. При использовании КМЦ не нужны ускорители твердения, поскольку время начала проявления связующих свойств достаточно мало и сравнимо со временем, необходимым для гомогенизации (перемешивания) смеси. Следует отметить высокую живучесть раствора КМЦ, так как его сохранность без протекания процесса желатинизации составляет 7 суток и более. Кроме того, КМЦ является дешевым и недефицитным продуктом, способным при введении его раствора в количестве 12 мас. % стеклопорошка обеспечивать его полную смачиваемость. Механическая прочность сформованных гранул с применением раствора КМЦ достаточна для осуществления опудривания и последующей транспортировки.

Еще одной стадией при подготовке исходных компонентов к вспучиванию, кроме стадии гранулирования, является опудривание сформованных гранул. Назначение опудривания – предотвратить слипание гранул в процессе вспенивания и обеспечить чистоту футеровки вращающейся печи.

В качестве опудривающих материалов целесообразно использовать тугоплавкие порошки: технический глинозем, тальк, высокоглиноземистую шамотную пыль, тонкоизмельченные отходы корундовых огнеупоров или графит. Положительные результаты получены при использовании эмульсии на водной основе, состоящей из высокопластичных тугоплавких глин (каолина) или графита в соотношении 2:1.

В случае когда гранулированное пеностекло предназначено в качестве заполнителя в легкие бетоны, целесообразно производить опудривание гранул цементом. Это обеспечивает лучшую адгезию цементного камня к заполнителю при нормальном твердении и пропаривании.

Следует отметить, что перспективными опудривателями для гранулированного пеностекла могут являться как микрокремнезем, так и метакаолин,

присутствие которых в составе бетонов на основе гранулированного пеностекла, возможно, обеспечит снижение вредного влияния щелочно-силикатного взаимодействия цемента и заполнителя (гранулированного пеностекла) [9].

В целом приведенные выше рекомендации по термоподготовке стеклобоя по использованию в качестве газообразователя кокса, в качестве связующего – раствора КМЦ, а в качестве опудривателя – каолина следует рассматривать как наиболее оптимальный вариант выбора исходных компонентов для производства гранулированного пеностекла.

### Список литературы

1. Баженов Ю.М. Технология бетона: учеб. – М.: АСВ, 2002. – 500 с.
2. Иванов И.А. Технология легких бетонов на искусственных пористых заполнителях. – М.: Стройиздат, 1974. – 287 с.
3. Погребинский Г.М., Искоренко Г.И. Гранулированное пеностекло как перспективный теплоизоляционный материал // Строительные материалы. – 2003. – № 3. – С. 28–29.
4. Арутюнян М.Р. Легкие бетоны на основе пеностеклогранулята с насыпной плотностью 200–350 кг/м<sup>3</sup> и их основные физико-механические и теплофизические свойства: автореф. дис. ... канд. техн. наук. – М., 1990.
5. Кетов А.А., Пузанов И.С., Саулин Д.В. Опыт производства пеностеклянных материалов из стеклобоя // Строительные материалы. – 2007. – № 3. – С. 70–72.
6. Кулаева Н.С., Гаркави М.С. Пеностекло из стеклобоя // Строительные материалы. – 2007. – № 3. – С. 74.
7. Рабухин А.И., Савельев В.Г. Физическая химия тугоплавких неметаллических и силикатных соединений: учеб. – М.: ИНФРА-М, 2004.
8. Попов М.Ю. Подбор составов легких бетонов на реакционноспособных пористых заполнителях // Научное обозрение. – 2015. – № 16. – С. 162–167.

Получено 06.09.2016

**Семейных Наталья Сергеевна** – кандидат технических наук, доцент кафедры «Строительный инжиниринг и материаловедение», строительный факультет, Пермский национальный исследовательский политехнический университет, e-mail: semeyn@mail.ru.

**Сопегин Георгий Владимирович** – бакалавр кафедры «Строительный инжиниринг и материаловедение», строительный факультет, Пермский национальный исследовательский политехнический университет, e-mail: gosha006@yml.com.