

Таким образом, кварц-полевошпатовый песок после его усреднения может быть использован в шихте частично в технологии окрашенных стекол и износостойчивых ситаллов [6]. Песок поддается обогащению. Наиболее эффективным методом является магнитная сепарация, что снижает содержание оксида железа на 25%. Учитывая высокое содержание  $Al_2O_3$  и  $F_2O_3$  в кварц-полевошпатовом песке, его можно использовать как алюмо- и кремнесодержащий компонент взамен полевошпатового концентрата.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Семенов А. А. Текущая ситуация на российском рынке стекольных кварцевых песков и прогноз развития рынка // *Glass Russia*. – 2010, март. – С. 34–35.
2. Минько Н. И., Жерновая Н. Ф., Лесовик В. В. Строительные и тарные стекла на основе искусственных песков из кварцитопесчанников КМА // *Стекло и керамика*. – 1989. – № 12. – С. 6–7.
3. Парюшкина О. В., Мамина Н. А. Проблемы обогащения кварцевого песка для стекольной промышленности // *Стекло и керамика*. – 2011. – № 1. – С. 4–6.
4. Кондрашов В. И., Безлюдная В. С., Иванов А. Л. Особенности формования теплопоглощающего флоат-стекла // *Стекло и керамика*. – 2000. – № 9. – С. 12–13.
5. Генезис песка природного в технологии стекла / Н. И. Минько, М. Яхья, К. Н. Гридякин [и др.] // *Вестник БГТУ им В. Г. Шухова*. – 2014. – № 2. – С. 126–130.
6. Минько Н. И., Гридякин К. Н., Яхья М. Использование кварцевого песка, обогащенного  $Al_2O_3$  и  $Fe_2O_3$  в технологии стекломатериалов строительного назначения. Сб. докл. Международ. научн.-практ. конф. «Современные строительные материалы, технологии и конструкции». Грозный, 2015. – С. 316–319.

## REFERENCES

1. Semenov A. A. Tekushhaja situacija na rossijskom rynke stekol'nyh kvartsevyh peskov i prognoz razvitija rynka [The current situation on the Russian market of glass and quartz sands market forecast]. *Glass Russia*, 2010, March, pp. 34–35 (in Russian).
2. Min'ko N. I., Zhernovaya N. F., Lesovik V. V. Stroitel'nye i tarnye stekla na osnove iskusstvennyh peskov iz kvarsitopeschannikov KMA [Construction of container glass on the basis of artificial sands from quartzite-sandstones KMA]. *Steklo i keramika*, 1989, no. 12, pp. 6–7 (in Russian).
3. Paryushkina O., Mamina N.A. Problemy obogashhenija kvarcevego peska dlja stekol'noj promyshlennosti [Problems of enrichment of quartz sand for glass industry]. *Steklyannaya tara*, 2011, no. 1, pp. 4–6 (in Russian).
4. Kondrashov V. I., Bezlyudnaya V. S., Ivanov A. L. Osobennosti formovaniya teplopogloshhajushhego float-stekla [Features heat-absorbing forming float glass]. *Steklo i keramika*, 2000, no. 9, pp. 12–13 (in Russian).
5. Min'ko N. I., Yakh'ya M., Gridyakin K. N., et al. Genезis peska prirodnogo v tehnologii stekla [Genesis of natural sand in glass technology]. *Vestnik BGTU im. V. G. Shukhova*, 2014, no. 2, pp. 126–130 (in Russian).
6. Min'ko N. I., Gridyakin K. N., Yakh'ya M. Ispol'zovanie kvartsevego peska, obogashchennogo  $Al_2O_3$  i  $Fe_2O_3$  v tehnologii steklomaterialov stroitel'nogo naznachenija [Using quartz sand rich in  $Al_2O_3$  and  $Fe_2O_3$ , in technology of glass materials for construction application]. *Sb. dokl. Mezhdunarod. nauchn.-prakt. konf. «Sovremennyye stroitelnyie materialyi, tehnologii i konstruksii»*. Groznyiy, 2015, pp. 316–319 (in Russian).

## ПЕНОСТЕКЛО НА ОСНОВЕ ПРИРОДНОГО И ТЕХНОГЕННОГО АМОРФНОГО КРЕМНЕЗЕМА

**В. А. Кутугин, В. А. Лотов, Томский политехнический университет, г. Томск; В. В. Ревенко, ЗАО «Базальтопластик», г. Москва**

**Ключевые слова:** пеностекло, гидротермальный синтез, ресурсоэффективность  
**Key words:** foam glass, hydrothermal synthesis, resource efficiency

### Введение

Актуальность развития и совершенствования технологий производства пеностеклольных материалов определяется как уникальными эксплуатационными характеристиками пеностекла, так и постоянно растущим спросом на него.

В настоящее время в нашей стране реализуются проекты по строительству заводов выпускающих пеностекляную продукцию в нескольких регионах – построен завод пеностекляного гравия в г. Калуге, большой проект запущен в г. Владимире [1–3]. Понятно, что потребности даже внутреннего рынка не могут быть удовлетворены одним-двумя заводами в Европейской части страны. Специфика логистики объемных и легких материалов диктует необходимость освоения региональных рынков продукцией местного производства. Другими словами, производство высокоэффективных теплоизоляционных материалов должно быть освоено практически в каждом регионе.

Основными проблемами технологии пеностекла являются высокая наукоемкость и энергоемкость технологического процесса. Классическая технология, разработанная в стране в 1930-х годах, подразумевает технологический процесс, состоящий из нескольких этапов: варка стекломассы, подготовка шихты, вспенивание материала в металлических формах, отжиг полученных блоков и механическая обработка изделий. Наиболее сложные и дорогие этапы – это варка стекломассы, вспенивание и отжиг блоков [1].

### Теоретические предпосылки

Нашим коллективом продолжительное время ведутся научные разработки, направленные на упрощение технологии пеностекла, расширение сырьевой базы и снижения себестоимости продукта [2–7].

В настоящей работе представлены результаты исследований принципиально нового способа изготовления блочного пеностекла, существенно упрощающего технологию при получении пеностекла с плотностью 200–300 кг/м<sup>3</sup> и заданными геометрическими размерами [8, 9].

Основная идея технологического процесса заключается в получении гидросиликата натрия методом прямого синтеза с последующим введением в смесь вспученного перлита. Гидросиликат натрия (жидкое стекло) образуется при взаимодействии компонентов, содержащих активный кремнезем с горячим 34–36% раствором щелочи. Введение влагоемкого перлита позволяет внести в смесь необходимые для получения водостойкого стекла оксиды и превратить густую и вязкую композицию в рыхлую смесь. Синтезируемые гидросиликаты натрия активно вступают во взаимодействие с перлитом при нагревании, формируют гидросиликаты и гидроалюминаты натрия. Наличие в шихте гидратированных минералов позволяет не вводить дополнительные газообразователи, так как вспенивание шихты происходит за счет удаления паров воды, выделяющихся при разложении последних.

В качестве исходных сырьевых материалов использовались:

гидроксид натрия технический в твердом виде (NaOH) по ГОСТ 2263-79 Натр едкий технический, тип ТР, содержание основного вещества 99%;

перлитовый песок, вспученный по ГОСТ 10832-2009, марки ВПМ (от 0,16 до 1,25 мм) плотностью 75–100 кг/м<sup>3</sup>, производства ЗАО «Нижнетагильский завод теплоизоляционных изделий» (Свердловская обл.);

микрокремнезем конденсированный МКУ-85 (ОАО «Кузнецкие ферросплавы», г. Новокузнецк, Кемеровская обл.) по ТУ 5743-048-02495332-96;

диатомит Инзенского месторождения (Ульяновская обл.);

трепел Зиекеевского месторождения (Калужская обл.).

Средний химический состав сырьевых материалов приведен в табл. 1.

Т а б л и ц а 1

**Химический состав сырьевых материалов**

Материал	Среднее содержание оксидов, мас. %						
	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	R <sub>2</sub> O	п.п.п.
Перлит	75	13	0,8	1,2	1	9	–
Микрокремнезем	92	0,7	0,5	1,9	0,9	2	2
Диатомит	82,3	4,8	2,49	0,61	0,7	1,2	7,9
Трепел	82	5	2,5	2	0,5	1	7

### Экспериментальная часть

Шихту готовили в следующей последовательности: отдозированные количества природного или техногенного аморфного кремнезема, гидроксида натрия и горячей воды с температурой 80–90 °С подавали в реактор с мешалкой, в котором при перемешивании в тече-

ние 10–15 мин образуются гидросиликаты натрия в виде вязкой жидкости. Далее эта вязкая жидкость поступала в интенсивный смеситель, где ее тщательно перемешивали с отдозированным количеством вспученного перлита в течение 5–10 мин. В результате перемешивания получалась шихта для получения теплоизоляционного материала, представляющая собой рыхлую смесь с влажностью до 40%. Приготовленную шихту в расчетном количестве загружали в разборную металлическую форму без уплотнения, форму закрывали крышкой с жесткими фиксаторами и помещали в печь вспенивания для термообработки при температуре 700 °С (для природного кремнезема) и 780 °С для шихт на микрокремнеземе. Время вспенивания зависит от габаритных размеров и объема изделий, в данном случае, при изготовлении образцов 10x10x3...5 см вспенивание проводили в течение 0,5–1 ч. Отжиг готовых изделий проводили при температуре от 700 °С (от 780 °С для МКУ) до 360 °С в течение 1 ч с последующим охлаждением на воздухе.

По такому способу были изготовлены изделия с плотностью в пределах 200–300 кг/м<sup>3</sup> с шагом в 20 кг/м<sup>3</sup>. Соотношения компонентов в шихте (в мас. %): перлит 33, кремнеземистое сырье 47, гидроксид натрия 20; водотвердое отношение 1,5.

Составы шихт и полученных стекол приведены в табл. 2.

Т а б л и ц а 2

**Химический состав шихт и стекол**

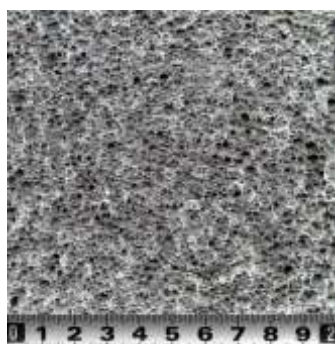
Состав		Среднее содержание оксидов, мас. %						
		SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	R <sub>2</sub> O	п.п.п.
Трепельное пеностекло	Шихта	63,29	6,64	1,44	1,34	0,56	18,94	7,79
	Стекло	68,64	7,2	1,56	1,45	0,61	20,54	–
Микрокремнеземовое пеностекло	Шихта	67,99	4,62	0,5	1,29	0,75	19,41	5,44
	Стекло	71,9	4,88	0,53	1,36	0,8	20,53	–
Диатомитовое пеностекло	Шихта	63,43	6,55	1,43	0,68	0,66	19,04	8,21
	Стекло	69,11	7,13	1,56	0,74	0,72	20,74	–

Режим вспенивания и свойства экспериментальных образцов, полученных из различного кремнеземсодержащего сырья, представлены в табл. 3. На рисунке приведена макроструктура полученного материала.

Т а б л и ц а 3

**Свойства полученного пеностекла**

Компоненты шихты и свойства изделий	Режим термообработки и показатели свойств изделий					
	трепел	МКУ-85	диатомит	трепел	МКУ-85	диатомит
Кремнеземистая порода, кг	700	780	700	700	780	700
Температура вспенивания, °С	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
Время вспенивания, ч	200	220	240	260	280	300
Плотность изделий, кг/м <sup>3</sup>	1,44	1,62	1,88	2,14	2,48	2,67
Прочность при сжатии, МПа	0,062	0,068	0,074	0,079	0,083	0,086
Коэффициент теплопроводности, Вт/(м·град)						



Макроструктура полученных материалов

## Результаты и обсуждение

По предложенному способу удалось в лабораторных условиях получить высокопористый пеностекольный теплоизоляционный материал с плотностью 200–300 кг/м<sup>3</sup> и коэффициентом теплопроводности 0,062–0,086 Вт/(м·град). Изделия имеют преимущественно замкнутую пористость, что подтверждается показателями водопоглощения (7 сут), например, для плотности 200 кг/м<sup>3</sup> массовое и объемное водопоглощение составляет 35 и 7% соответственно. Таким образом, закрытые поры составляют 62%, открытые – 38%. Химическая стойкость полученных стекол оценивалась потерями массы при кипячении в течение 2 ч в дистиллированной воде. По результатам испытаний всех составов растворения не происходит, а рН среды остается нейтральным.

В процессе нагревания гранулированной шихты в форме с замкнутым объемом происходит несколько последовательно-параллельных процессов. До 120–150 °С испарятся свободная влага, а при температуре выше 300 °С шихта приобретает псевдопиропластическое состояние и выделяемая при разложении гидросиликата химически связанная вода в виде пара начинает поризовать массив шихты. В этот же период возникают гидротермальные условия при которых начинают интенсивно протекать процессы взаимодействия гидросиликата натрия и компонентов, входящих в состав, происходят реакции силикатообразования при температурах существенно ниже, чем в обычной пеностекольной шихте. Таким образом, к моменту испарения химически связанной влаги (температура до 500 °С) шихта представляет собой активную, динамично развивающуюся систему, в которой активно протекают процессы стеклообразования, поризации и вязкого течения. Возникновение гидротермальных условий на начальной стадии процесса поризации позволяет достичь стеклообразования при температурах 700–780 °С, что не реализуемо при использовании сухой шихты.

Основным преимуществом исследованных составов шихты является использование аморфной кремнеземистой породы с размером частиц 0,1–2 мм или конденсированного микрокремнезема без дополнительного тонкого помола. Применение вспученного перлита с размерами 0,16–1,25 мм, который обладает большой влагоемкостью, позволяет получать из вязкой жидкости влажную сыпучую смесь. Использование предлагаемого состава и способа приготовления шихты позволяют синтезировать в присутствии горячей воды и гидроксида натрия высокоактивные, по отношению к вспученному перлиту, гидросиликаты натрия в течение 10–15 мин при температуре до 100 °С. Дополнительное диспергирование аморфной кремнеземистой породы происходит при ее химическом взаимодействии с гидроксидом натрия и последующим смешением продукта взаимодействия со вспученным перлитом.

Проведение процесса по предлагаемому способу в замкнутом объеме формы позволяет получать изделия с заданными геометрическими размерами и формой – плиты, сегменты и скорлупы, не требующие последующей механической обработки.

## Выводы

Проведенные исследования, показали что, предлагаемый способ получения пеностекольных материалов обладает существенными преимуществами перед традиционной технологией пеностекла, среди которых необходимо выделить следующие:

- упрощается технология получения теплоизоляционного материала;
- из технологического процесса исключается энергозатратная стадия высокотемпературной варки стекла;
- исключается операция тонкого помола компонентов шихты;
- активация шихты осуществляется не механическим, а химическим способом;
- более эффективно используется вспученный перлит по сравнению, например, с производством цементно-перлитовых изделий;
- существенно сокращается температура и время вспенивания шихты и время отжига изделий;
- блоки не требуют опилки и получаются с заданными геометрической формой и размерами;
- снижаются капитальные затраты на организацию производства.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Китайгородский И. И., Кешишян Т. Н. Пеностекло. – М.: Промстройиздат, 1953. – 78 с.
2. Лотов В. А., Кривенкова Е. В. Кинетика процесса формирования пористой структуры пеностекла // Стекло и керамика. – 2002. – № 3. – С. 14–17.
3. Лотов В. А. Перспективные теплоизоляционные материалы с жесткой структурой // Строительные материалы. – 2004. – № 11. – С. 8–9.
4. Пат. 2357933 Российская Федерация. Шихта для получения пеностекла / Архипов А. А., Лотов В. А., Власов В. В. Заявл. 30.09.07; опубл. 10.06.09, Бюл. № 16.
5. Лотов В. А. Получение пеностекла на основе природных и техногенных алюмосиликатов // Стекло и керамика. – 2011. – № 9. – С. 34–37.
6. Перспективные технологии для производства термоизоляционных материалов с жесткой структурой / В. А. Кутугин, В. А. Лотов, Ю. И. Паутова [и др.]. Труды 7 Международного форума по стратегической технологии (IFOST-2012), Томск, 18–21 сентября, 2012. – Томск: Изд-во ТПУ, 2012. – Т. 1. – С. 244–247.
7. Лотов В. А., Кузнецова Н. А., Казьмина О. В. Использование методов фрактального анализа при оценке пористой структуры пеностекла // Стекло и керамика. – 2013. – № 7. – С. 3–6.
8. Пат. 2478587 Российская Федерация. Способ получения пеностекла и шихта для его изготовления / Лотов В. А., Кутугин В. А. Заявл. 30.09.11; опубл. 10.04.13, Бюл. № 10.
9. Пат. 2478586 Российская Федерация. Способ получения теплоизоляционного материала и шихта для его изготовления / Лотов В. А., Кутугин В. А. Заявл. 30.09.11; опубл. 10.04.13, Бюл. № 10.

## REFERENCES

1. Kitaygorodsky I. I., Keshishian T. N. *Penosteklo* [Foam glass]. Moscow: Promstroyizdat, 1953, 78 p (in Russian).
2. Lotov V. A., Krivenkova E. V. Kinetika processa formirovaniya poristoj struktury penostekla [Kinetics process of formation of the porous structure of the foam glass]. *Steklo i keramika*, 2002, no. 3, pp. 14–17 (in Russian).
3. Lotov V. A. Perspektivnye teploizoljacionnye materialy s zhestkoj strukturoj [Advanced insulation materials with a rigid structure]. *Stroitel'nye materialy*, 2004, no. 11, pp. 8–9 (in Russian).
4. Patent RU 2357933. *Schichta dlya polucheniya penostekla* [The charge for foam glass]. Arkhipov A. A., Lotov V. A., Vlasov V. V. Declared 30.09.07. Published 10.06.09. Bulletin no 16 (in Russian).
5. Lotov V. A. Poluchenie penostekla na osnove prirodnyh i tehnogennyh aljunosilikatov [Preparation of foam glass based on natural and man-made aluminum silicates]. *Steklo i keramika*, 2011, no. 9, pp. 34–37 (in Russian).
6. Kutugin V. A. Lotov V. A., Pautova Yu. I., et al. Perspektivnye tehnologii dlja proizvodstva termoizoljacionnyh materialov s zhestkoj strukturoj [Perspective Technologies for Production of Thermal Insulating Materials with Hard Cellular Structure]. *Trudy 7 Mezhdunarodnogo Foruma po Strategicheskoj Tehnologii (IFOST-2012)*. Tomsk, September, 18–21, 2012. Tomsk: TPU Press, 2012, vol. 1, pp. 244–247 (in Russian).
7. Lotov V. A., Kuznetsova N. A., Kazmin O. V. Ispol'zovanie metodov fraktal'nogo analiza pri ocenke poristoj struktury penostekla [The use of fractal analysis in the evaluation of the porous structure of the foam glass]. *Steklo i keramika*, 2013, no. 7, pp. 3–6 (in Russian).
8. Patent RU 2478587. *Sposob polucheniya penostekla i schichta dlya ego izgotovleniya* [The process for producing foamed glass, and charge for its production]. Lotov V. A., Kutugin V. A. Declared 30.09.11. Published 10.04.13. Bulletin no. 10 (in Russian).
9. Patent RU 2478586. *Sposob polucheniya teploizoljazinnogo materiala i schichty dlya ego izgotovleniya* [A method for producing heat-insulating material and charge for its production]. Lotov V. A., Kutugin V. A. Declared 30.09.11. Published 10.04.13. Bulletin no. 10 (in Russian).