

Ю.М. Смирнов<sup>1</sup>, Б.М. Кенжин<sup>2</sup>, Т.М. Нургожин<sup>2</sup>, Е.К. Иманов<sup>1</sup>, М.А. Журунова<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Карагандинский государственный технический университет, Казахстан;

<sup>2</sup>ТОО «Eskolit», Караганда, Казахстан

(E-mail: smirnov\_y\_m@mail.ru)

## Основные предпосылки к созданию энергосберегающих строительных изделий из газостекло- и пеностеклобетона

Приведены результаты анализа известных теоретических исследований, поисковых и внедренческих работ по использованию техногенного стеклобоя для производства строительных материалов и изделий различного назначения. Показаны результаты лабораторных исследований установочной партии изделий, включающих изучение микроструктуры и установление основных физико-механических показателей, определяющих уровень их производственной востребованности: плотность, прочность на сжатие и водопоглощение. Установлены качественные и количественные закономерности изменения показателей от фракционного состава основного наполнителя — молотого стекла. Полученная нелинейная зависимость плотности изделия от размера фракции показывает значительное ее возрастание при размере зерен стеклобоя более 2 мм, что говорит о преобладании основного наполнителя во всем объеме смеси. Зависимость прочности на сжатие образцов от размера фракции имеет ярко выраженный экстремум при размере фракции ~ 2 мм. Это определяется изменением соотношения внутренних сил между частицами смеси. Коэффициент водопоглощения также нелинейно возрастает с увеличением промежутков между частицами основного наполнителя и других компонентов смеси. Полученные величины показателей входят в пределы, регламентируемые государственными стандартами, их вариации будут уточняться для различных условий применения промышленных материалов и изделий.

*Ключевые слова:* молотое стекло, основной наполнитель, строительные изделия, физико-механические показатели, установочная партия, результаты, графические зависимости, эмпирические формулы.

Перспективы развития отрасли требуют создания новейших казахстанских технологий производства строительных материалов и изделий с использованием местного сырья, заменяющих зарубежные аналоги. С этой точки зрения особого внимания заслуживают технологии производства материалов и изделий на основе бетонов на базе различных техногенных отходов: шлаков, шламов, зол, древесно-стружечных и строительных отходов. Исследования П.И. Боженова, Н.Г. Кисленко и других ученых специалистов строительного комплекса убедительно показали перспективность безотходных технологий производства строительных материалов и изделий на основе использования техногенных отходов деятельности человека, в том числе стеклобоя [1, 2]. В последние годы интересы ученых и производителей обратились к утилизации несортированного боя техногенных стекол — стеклобоя. Это объясняется тем, что несортированный стеклобой, сосредоточенный в отвалах и полигонах, до сих пор не находит должного применения. В то же время с экологической точки зрения это наиболее трудноутилизуемый отход. Стекло не разрушается под действием атмосферного воздействия, это также коррозионностойкий материал, не разрушающийся под действием кислот, солей, грибов и бактерий. Вследствие этого стекло способно сохраняться без особых разрушений сотни лет. Поэтому использование стеклобоя в качестве основного наполнителя позволяет в значительной степени снизить потребление традиционных вяжущих средств и заполнителей.

Это может решить следующие проблемы, возникающие в экономике и социальной сфере:

- сбережение минеральных ресурсов и экономия материальных и трудовых затрат на их разработку и доставку к месту использования;
- высвобождение площадей, занимаемых отходохранилищами и возвращение их в экономические и социальные отношения;
- улучшение экологической обстановки в промышленно развитых регионах, снижение заболеваемости населения;
- снижение ввозимых из зарубежья объемов строительных изделий с заданными физико-механическими и технологическими свойствами;
- исследования и наблюдения специалистов Госэпиднадзора различного уровня показали, что жилые и производственные помещения, построенные с применением бетона с наполнителем в виде стеклобоя, обеспечивают механическое отторжение взрослых особей грызунов и их по-

томства. Это обеспечивает экологическую чистоту и эффективность защиты помещений от грызунов и тем самым от распространения различного рода болезней, в том числе и инфекционных.

Теория и практика производства пеностекла и изделий на его основе, в частности строительных, изложены в основополагающих трудах Б.К. Демидовича [3, 4]. Основная идея состоит в том, что основной наполнитель смесей, как правило, бетонных, заменяется молотым до фракции  $\leq 80$  мкм силикатным натрий-кальциевым стеклом, смешивается с пенообразующей добавкой углеродного или карбонатного типа, помещается в соответствующие формы и подвергается дальнейшей термообработке. При достижении уровня температуры 750–850 °С происходит спекание частиц стекла и за счет химического взаимодействия выделение газа. Состав смеси при этом вспенивается и получает соответствующую вязкость и пластичность. Полученная смесь охлаждается и производится ее отжиг. Строительные материалы требуемой формы и размеров получают после распиливания блоков.

К настоящему времени известно множество способов получения пеностекла различных свойств и, как следствие, назначения. Все они различаются по постановке задач, реализации методов, химическому составу и процентному содержанию компонентов. Каждый из них имеет свои преимущества и недостатки [5, 6].

Основными задачами, стоящими перед исследователями и создателями пеностеклобетонов, являются: совершенствование основного технологического цикла, обеспечение требуемых физико-механических показателей изделия, снижение энергозатрат и, как следствие, себестоимости продукции.

По реализации методов производства изделия выделены: наличие термообработки, как в начальной стадии, так и по окончании технологического процесса, использование дополнительных компонентов, способствующих загустению или отвердеванию раствора, наличие выдержки в естественных или специально создаваемых условиях.

Основные компоненты, составляющие смесь, представлены молотым стеклом, пенообразователем и специальными добавками, в той или иной степени улучшающими технологический процесс и качество получаемого продукта. К ним можно отнести: цемент, песок, минеральные вяжущие, портландцемент, огнеупоры и модификаторы.

Качественный и количественный анализ составов основного наполнителя и добавок известных технических составов позволяет установить пределы и интервалы процентного содержания элементов. Они характеризуются гистограммами (рис. 1–3).

Гистограмма, приведенная на рисунке 1, определяет наиболее встречающееся содержание хлорида кальция: в среднем 16 % от состава смеси в интервале (7,5÷17,3) %  $\text{CaCl}_2$ .

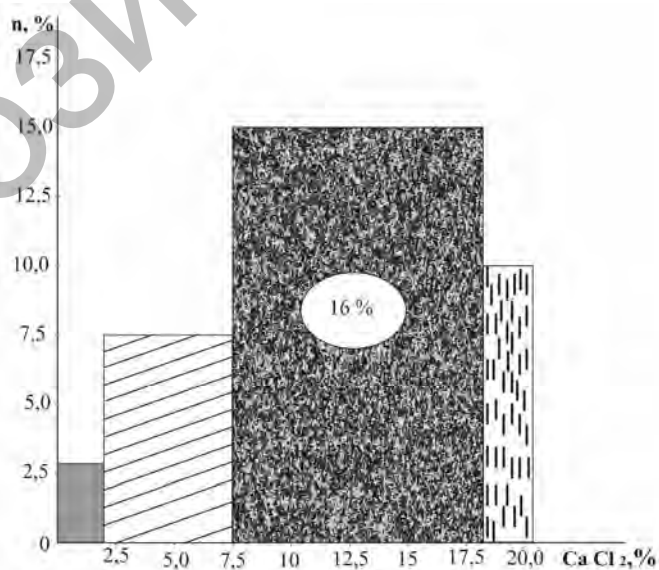


Рисунок 1. Гистограмма распределения процентного содержания хлорида кальция  $\text{CaCl}_2$

Гистограмма распределения содержания в смеси силиката натрия (рис. 2) показывает его содержание 12 % от состава при интервале изменения содержания элемента (6,2–17) %.

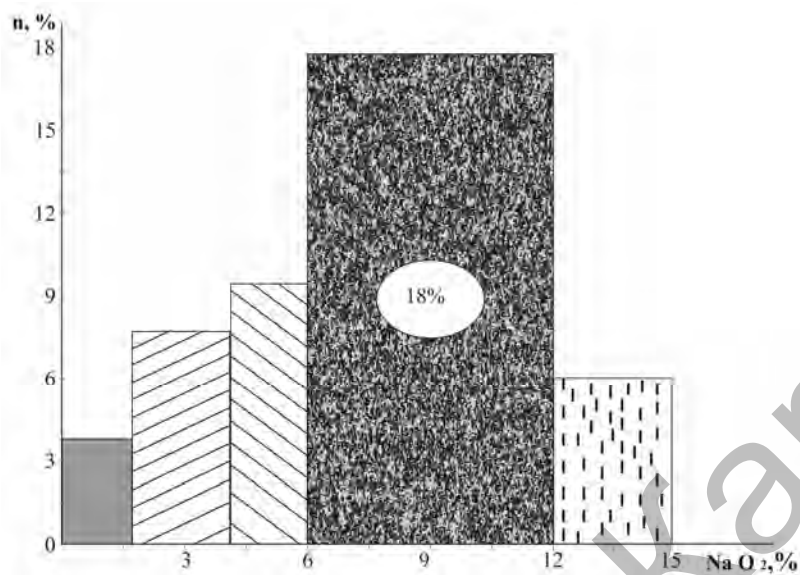


Рисунок 2. Гистограмма распределения силиката натрия  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$

В составе смеси с повышенным содержанием карбоната натрия (рис. 3) его доля составляет 9 % при процентном содержании элемента (6–12) %.

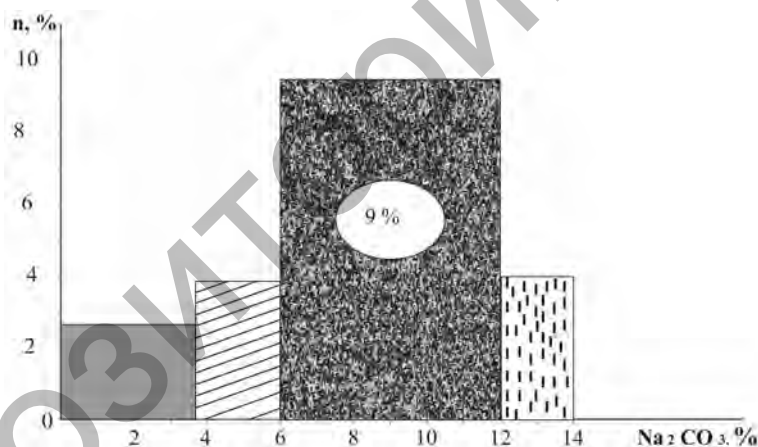


Рисунок 3. Гистограмма распределения карбоната натрия  $\text{Na}_2\text{CO}_3$

Что касается процентного содержания основных элементов смеси (молотого стекла, цемента и песка), то оно значительно различается для различных видов строительных изделий и принятых за основу технологических процессов.

Для установления правомочности выявленных закономерностей в условиях Республики Казахстан проведены специальные исследования установочной партии изделий. Установочная партия изделий была получена с использованием разработанной методики, утвержденной Карагандинским филиалом РПП «Атамекен», на производственном предприятии ТОО «Eskolit» (г. Караганда).

Анализ проведен в два этапа:

- исследование микроструктуры изделия и сравнение с известными из технической литературы аналогами;
- установление основных физико-механических показателей.

На первом этапе была исследована микроструктура полученных изделий для установления состава и фазы распределения химических элементов по объему образца, химической неоднородности

распределения, а также для получения изображения внутреннего строения в широком диапазоне увеличений во вторичных и отраженных электронах.

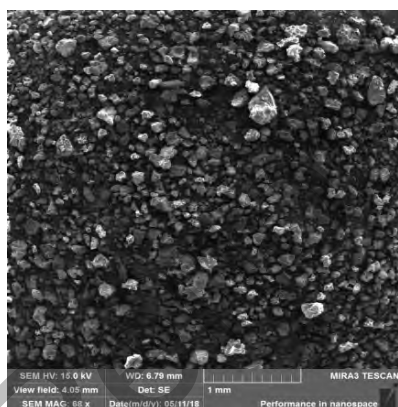
Исследования проведены с использованием сканирующего электронного микроскопа TESCANMira 3 (Чехия) [7] с системой микроанализаторов фирмы Oxford Instruments (Великобритания) (рис. 4).



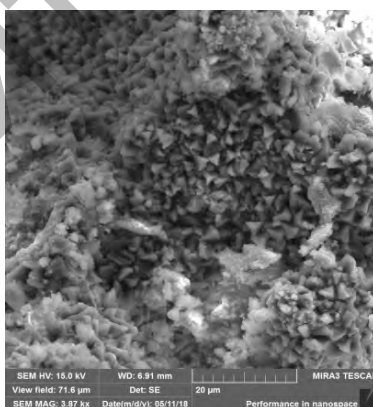
Рисунок 4. Внешний вид электронного микроскопа TESCANMira 3

Разрешение микроскопа до 1,2 нм при ускоряющем 30 кВ (изображение во вторичных электронах), ускоряющее напряжение — от 0,5 до 30 кВ, увеличение — от  $\times 10$  до  $\times 1\,000\,000$ , ток пучка — до 200 нА, элементный анализ — от В до U. Пробоподготовка исследуемых образцов проводилась на комплексе оборудования фирм Jeol (Japan) и Gatan (USA). Результаты получают при использовании ряда специальных программ, таких, например, как качественный и количественный элементный анализ — INCA Point& ID, картирования — Mapping и QuantMap, количественное распределение фаз и включений — Feature.

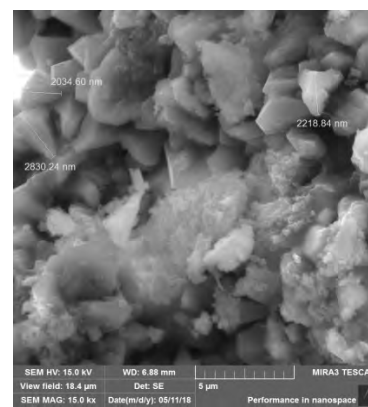
Микроструктура композитов и размер частиц были изучены сканирующей электронной микроскопией. На рисунке 5 приведены СЭМ изображения поверхности материала. Из приведенных фотографий видно, что поверхность данного материала состоит из достаточно крупных пористых гранул до (100 мкм и выше), их средний диаметр — около 2 мкм.



1 —  $\times 68$



2 —  $\times 3870$



3 —  $\times 15000$

Рисунок 5. СЭМ изображения поверхности материала пеностекло при различных масштабах увеличения

На образцах кальция, легированного кремнием и алюминием, полученных в различных условиях кристаллизации, были исследованы микроструктура и элементный состав фаз. Количественный элементный состав двух точечных спектров, приведенный на рисунке 6, позволил установить, что светлая фаза состоит из кислорода (63,89 масс. %), кальция (25,45 масс. %), кремния (8,43 масс. %), натрия (3,69 масс. %), алюминия (3,23 масс. %) и магния (1,72 масс. %), темная — из кальция (25 масс. %).

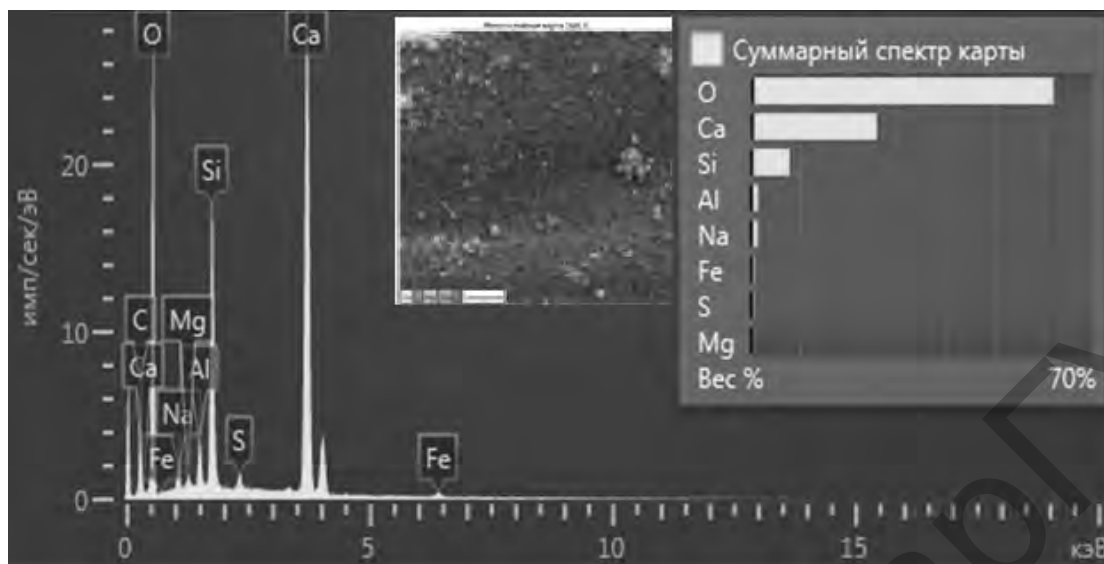


Рисунок 6. Спектральный анализ и карта распределения элементов на поверхности пеностекла

Задачами второго этапа являются установление основных физико-механических показателей изделий установочной партии, их сравнение с показателями лучших образцов и разработка рекомендаций по корректировке состава смесей и технологических процессов получения изделий.

Одной из задач исследований является установление оптимального размера фракций молотого стекла для определенного вида изделий. Вследствие этого в установочной партии изделия основным параметром, подлежащим исследованию, является размер фракции. Молотое стекло различного фракционного состава получено на предприятии — партнере ТОО «Eskolit» (г. Караганда) [8]. Для проведения лабораторных испытаний использованы фракции размером (3,0>0,5) мм.

В качестве основных физико-механических показателей изделий выбраны: плотность, прочность на сжатие, водопоглощение. Эти показатели во многом определяют эксплуатационные показатели изделий и их востребованность.

Плотность — физический показатель, характеризующий вес изделия и, как следствие, вес строительной конструкции в целом. При неизменных других показателях предпочтение отдается изделиям с меньшей плотностью. Классическая формула для определения плотности имеет вид

$$\rho = \frac{m}{V}, \text{ кг/м}^3,$$

где  $m$  — масса изделия, кг;  $V$  — его объем, м<sup>3</sup>.

Таким образом, определение массы сводится к взвешиванию на лабораторных весах и определению трех размеров.

График изменения плотности образцов от фракционного состава смеси  $\Phi_p$  приведен на рисунке 7.

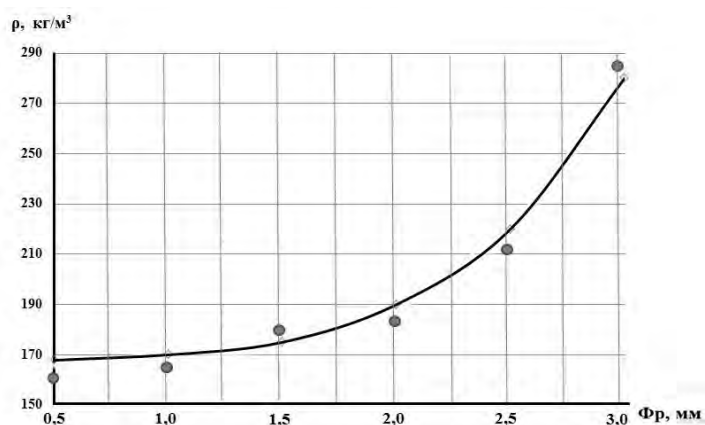


Рисунок 7. Зависимость плотности образцов  $\rho$  от размера фракции стеклобоя  $\Phi_p$

Анализ полученной зависимости показывает нелинейное возрастание плотности  $\rho$  с увеличением размера фракции стекла  $\Phi p$ . При этом увеличение размера зерен от 0,5 мм до 1,5 мм приводит к увеличению плотности от 162 кг/м<sup>3</sup> до 175 кг/м<sup>3</sup>, или на 8 %. Увеличение же размера от 1,5 мм до 3,0 мм приводит к возрастанию плотности от 175 кг/м<sup>3</sup> до 280 кг/м<sup>3</sup>, или на 60 %. Это объясняется тем, что объем молотого стекла определяется кубической зависимостью от размера фракции.

Интерпретация полученной зависимости с привлечением известных методов дает возможность установления эмпирической зависимости

$$\rho = A\Phi^{2/3} + B,$$

где  $A$  и  $B$  — коэффициенты, зависящие от процентного содержания других элементов, входящих в состав смеси.

Прочность на сжатие — физический показатель, определяющий степень противодействия разрушению не только изделия в отдельности, но и всего сооружения. Его величина определяется известной зависимостью

$$\sigma_{сж} = \frac{P}{F}, \text{ Па},$$

где  $P$  — сжимающая нагрузка, Н;  $F$  — площадь поперечного сечения изделия, м<sup>2</sup>.

Установление этого показателя сводится к определению критической сжимающей силы, при которой происходит разрушение образца  $P_{кр}$ , и определению площади поперечного сечения.

График изменения прочности на сжатие образцов  $\sigma_{сж}$  от фракционного состава смеси  $\Phi p$  приведен на рисунке 8.

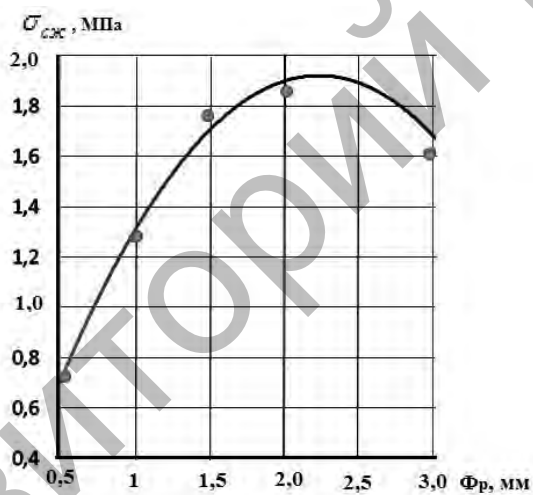


Рисунок 8. Зависимость прочности на сжатие  $\sigma_{сж}$  образца от размера фракции  $\Phi p$

Полученная кривая имеет явно выраженный максимум при размере фракции 2,0 мм и может быть описана эмпирической формулой

$$\sigma_{сж} = Ae^{(B\Phi p + C\Phi p^2)},$$

где  $A$ ,  $B$  и  $C$  — коэффициенты, зависящие от процентного содержания других элементов, входящих в состав смеси.

Явно выраженный экстремум функции может быть объяснен тем, что при небольших размерах фракции ( $0,5 < \Phi p < 2,0$ ) мм уменьшается расстояние между частицами смеси и соответственно снижаются величины сил взаимного притяжения между ними. Это снижает сопротивляемость сжатию. При дальнейшем увеличении фракции ( $2,0 < \Phi p < 3,0$ ) мм преобладают силы притяжения до определенного соотношения между зернами вещества. Это способствует снижению прочностных характеристик.

Водопоглощение — физическая величина, характеризующая степень восприятия веществом влаги. Она является одним из основных эксплуатационных показателей строительных изделий, особенно в регионах с резко континентальным климатом, в которые входит и Республика Казахстан. Зависимость коэффициента водопоглощения от размера фракции  $\Phi p$  приведена на рисунке 9.

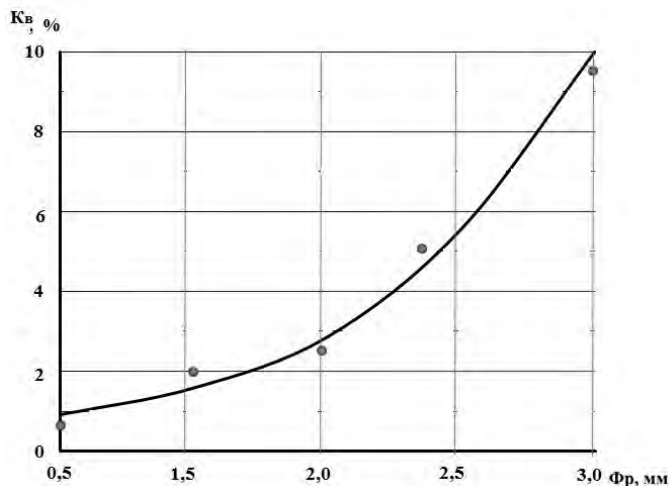


Рисунок 9. Зависимость коэффициента водопоглощения от размера фракции  $\Phi_r$

Поскольку приведенные результаты получены только для образцов установочной партии и полученные эмпирические зависимости характеризуют только выбранный по рекомендациям состав смеси, требуются дальнейшие исследования с вариацией компонентов состава смеси и их процентного содержания.

Изложенные результаты показывают достаточную сходимость с данными ранее известных работ [4–6] как в качественном, так и в количественном отношении. Для более тщательного установления технологии производства изделий будут проведены эксперименты на технологической линии производства ТОО «Eskolit» и на натуральных образцах строительных изделий.

#### Список литературы

- 1 Боженев П.И. // Безотходные технологии и использование вторичных продуктов и отходов в промышленности строительных материалов. — М.: Стройиздат, 1985. — С. 38–40.
- 2 Кисленко Н.Г., Царицын М.А. и др. Утилизация стеклобоя // Промышленность строительных материалов. — 1983. — Вып. 10. — С. 15, 16.
- 3 Демидович Б.К. Пеностекло / Б.К. Демидович. — Минск: Наука и техника, 1975. — 248 с.
- 4 Демидович Б.К. Производство и применение пеностекла / Б.К. Демидович. — Минск: Наука и техника, 1972. — 301 с.
- 5 Ketov A. Peculiar chemical and technological properties of glass cullet as the raw material for foamed insulation / A. Ketov // Recycle and reuse of waste materials: International symposium / A. Ketov. — United Kingdom: Dundee, 2003. — P. 695–704.
- 6 Кетов А.А. Опыт производства пеностеклянных материалов из стеклобоя / А.А. Кетов, И.С. Пузанов, Д.В. Саулин // Строительные материалы. — 2007. — № 3. — С. 70–72.
- 7 Weillie Zhou. Scanning Microscopy for Nanotechnology (Techniques and Applications) / Ed. by Weillie Zhou, Zhong Lin Wang. — Springer, 2006. — 522 p.
- 8 Кенжин Б.М., Нургожин Т.М., Смирнов Ю.М., Уалиев С.Т. Предпосылки к созданию технологий производства строительных бетонов на основе пеностекла // Промышленность Казахстана. — 2017. — № 1(100).

Ю.М. Смирнов, Б.М. Кенжин, Т.М. Нургожин, Е.К. Иманов, М.А. Журунова

### Газэйнек және көбікшыныбетондардан энергияны үнемдейтін құрылыс бұйымдарын құруға негізгі алғышарттар

Әртүрлі қолданыстағы құрылыс материалдарымен ұйымдарын өндіру үшін техногендік шыныұнтақтарын пайдалану бойынша белгілі теориялық зерттеулер, іздестіру және енгізу жұмыстарының талдау нәтижелері көрсетілген. Тығыздығы, сығылуға беріктігі мен суды сіңіру сияқты өндірістік қажеттіліктерінің деңгейін анықтайтын негізгі физика-математикалық көрсеткіштерін орнату және микроқұрылымды меңгеруді қосатын орнату бұйымдар партиясын лабораториялық зерттеулер нәтижелері көрсетілген. Ұсақталған шыны — негізгі фракциялық құрамының толтырғышы, сапалық және сандық көрсеткіштерін өзгерту заңдылықтары белгіленген. Алынған сызықты емес тәуелділігі

тығыздығы, бұйымның мөлшері фракциясын көрсетеді. Айтарлықтай оның өсуі кезінде ұсақталатын түйір 2 мм астам, бұл негізгі толтырғыш барлық көлемді қоспалар. Бұл қатынас ішкі күштердің арасындағы бөлшектер қоспасының өзгеруімен анықталады. Негізгі орындары бөлшектерінің арасындағы толтырғыш және басқа да компоненттердің қоспасы, су сіңірілу коэффициенті, сондай-ақ дамуында желілік артуымен өсе түседі. Әртүрлі шарттарды қолдану өнеркәсіптік материалдар мен бұйымдар, алынған шамалар көрсеткіштерінің шектері кіреді, мемлекеттік стандарт регламенті, олардың вариациясы нақтыланатын болады.

*Кілт сөздер:* ұнтақталған шыны, негізгі толтырғыш, құрылыс бұйымдары, физика-механикалық көрсеткіштері, орнату партиясы, нәтижелері, графикалық тәуелділік, эмпирикалық формулалар.

Yu.M. Smirnov, B.M. Kenzhin, T.M. Nurgozhin, E.K. Imanov, M.A. Zhurunova

## Main preconditions for energy conservation building products from gas-steel and foam glass concrete

The results of the analysis of known theoretical studies, exploratory and promotional works on the use of man-made cullet for the production of building materials and products for various purposes are presented. The results of laboratory studies of the installation batch of products, including the study of the microstructure and the establishment of the main physical and mechanical parameters that determine the level of their industrial demand: density, compressive strength and water absorption are presented. The qualitative and quantitative laws of changes in indicators from the fractional composition of the main filler — ground glass are established. The obtained nonlinear dependence of the product density on the size of the fraction shows a significant increase with the size of cullet grains over 2 mm, which indicates the predominance of the main filler in the entire volume of the mixture. The dependence of the compressive strength of the samples on the size of the fraction has a pronounced extremum with a fraction size of ~2 mm. This is determined by the change in the ratio of internal forces between the particles of the mixture. The coefficient of water absorption also increases nonlinearly with increasing gaps between the particles of the main filler and other components of the mixture. The obtained values of the indicators are within the limits regulated by state standards, their variations will be refined for different conditions of use of industrial materials and products.

*Keywords:* ground glass, main filler, construction products, physical and mechanical parameters, installation lot, results, graphic dependencies, empirical formulas.

### References

- 1 Bozhenov, P.I. (1985). Bezotkhodnye tekhnologii i ispolzovanie vtovichnykh produktov i otkhodov v promyshlennosti stroitelnykh materialov [Waste-free technologies and the use of secondary products and waste in the building materials industry]. Moscow: Stroiizdat [in Russian].
- 2 Kislenco, N.G., & Tsaritsyn, M.A. (1983). Utilizatsiia stekloboia [Disposal of cullet]. *Promyshlennost stroitelnykh materialov — Building materials industry*, 10, 15–16 [in Russian].
- 3 Demidovich, B.K. (1975). *Penosteklo [Foam glass]*. Minsk: Nauka i tekhnika [in Russian].
- 4 Demidovich, B.K. (1972). *Proizvodstvo i primeneniye penostekla [Production and use of foam glass]*. Minsk: Nauka i tekhnika [in Russian].
- 5 Ketov, A. (2003). Peculiar chemical and technological properties of glass cullet as the raw material for foamed insulation. Proceedings from Recycle and Reuse of Waste Materials. *International Symposium* (pp. 695–704). United Kingdom: Dundee.
- 6 Ketov, A.A., Puzanov, I.S., & Saulin, D.V. (2007). Opyt proizvodstva penostekliannykh materialov iz stekloboia [Experience in the production of foam glass materials from cullet]. *Stroitelnye materialy — Construction Materials*, 3, 70–72 [in Russian].
- 7 Weilie Zhou. (2006). Scanning microscopy for nanotechnology (techniques and applications). Weilie Zhou, Zhong Lin Wang (Eds.). Springer.
- 8 Kenzhin, B.M., Nurgozhin, T.M., Smirnov, Yu.M., & Ualiev, S.T. (2017). Predposylki k sozdaniyu tekhnologii proizvodstva stroitelnykh betonov na osnove penostekla [Background to the creation of technologies for the production of building concretes based on foam glass]. *Promyshlennost Kazakhstana — Kazakhstan industry*, 1, 100 [in Russian].