

А. В. Корнилов, Л. Н. Назарова

ЭФФЕКТИВНЫЕ ДОБАВКИ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА СТЕНОВОЙ КЕРАМИКИ ИЗ НИЗКОСОРТНОГО ГЛИНИСТОГО СЫРЬЯ

Ключевые слова: легкоплавкое глинистое сырье, модификация, технологические добавки, керамика, свойства.

В производстве строительных материалов важной задачей является получение качественных керамических высокопустотных пористых стеновых материалов с высокими прочностными и теплоизоляционными свойствами. Для ее решения при истощении запасов высококачественного сырья актуально вовлечение в производство общераспространенного легкоплавкого глинистого сырья низкого качества, а также отходов добычи и переработки нерудных полезных ископаемых. С целью улучшения свойств низкокачественного сырья применяют различные способы его переработки и обогащения, в том числе и модификацию технологическими (порообразующими, флюсующими и др.) добавками. Данный способ является эффективным и экономически выгодным, так как позволяет целенаправленно регулировать структуру и свойства керамики, а также утилизировать некоторые отходы. В работе изучено влияние добавок цеолитсодержащей кремнистой породы (содержание цеолита 32%), тугоплавкой глины и вермикулита (соотношение оксида кремния к оксиду алюминия = 3,9:1) к глинистому сырью минералого-технологической разности 5а ($OE = 18-19$ мг.экв, $Ch_{gl} = 9-13$ ед, $H_2O_{ads} = 2,9-3,9\%$, $H_2O_{pog} = 4,5-7,5\%$, $K = 1,45-2,20$, $MC = 15-20\%$) на физические и механические характеристики керамики. Установлено, что керамические лабораторные образцы, полученные из трехкомпонентной шихты состава 43-51% глинистого сырья минералого-технологической разности 5а, 42-50% цеолитсодержащая кремнистая порода и 7-9% вспученный вермикулит имеют значение прочности к сжатию в 1,6-2,8 раза выше, чем изделия из «чистой» глины, а значения средней плотности на 0,12-0,27 г/см³ меньше. Из исследуемых сырьевых компонентов можно прогнозировать получение керамических стеновых материалов (кирпича, камня) марки по прочности 100 и выше со сравнительно высокими теплофизическими характеристиками. Использование цеолитсодержащих глинистых материалов, тугоплавкой глины и вермикулита в комбинации с низкокачественным глинистым сырьем способствует улучшению физико-механических характеристик керамических изделий. Увеличение прочности и снижение плотности изделий достигается за счет правильного соотношения оксидов кальция и кремния в шихте, способствующих образованию волластонита в процессе спекания. Высокодисперсный вермикулит, в свою очередь, способствует активации процесса спекания и повышению пористости, что ведет к улучшению теплоизоляционных свойств керамики. Таким образом, модификация глинистого сырья указанными добавками позволяет формировать качественные керамические материалы с высокой прочностью и оптимальными характеристиками теплоизоляции, что повышает конкурентоспособность продукции и эффективность производства в области строительных материалов.

A. V. Kornilov, L. N. Nazharova

EFFECTIVE ADDITIVES FOR THE PRODUCTION OF WALL CERAMICS FROM LOW-GRADE CLAY RAW MATERIALS

Key words: low-melting clay raw materials, modification, technological additives, ceramics, properties.

In the production of building materials, an important task is to obtain high-quality ceramic high-void porous wall materials with high strength and thermal insulation properties. To solve this problem, with the depletion of high-quality raw material reserves, it is important to involve in production widely available low-quality low-melting clay raw materials, as well as waste from the extraction and processing of non-metallic minerals. In order to improve the properties of low-quality raw materials, various methods of processing and enrichment are used, including modification with technological (powder-forming, fluxing, etc.) additives. This method is effective and economically advantageous, as it allows for targeted regulation of the structure and properties of ceramics, as well as the utilization of certain wastes. The study investigated the effect of additives of zeolite-containing siliceous rock (zeolite content 32%), refractory clay and vermiculite (silicon oxide to aluminum oxide ratio = 3.9:1) to clay raw materials of mineralogical and technological grade 5a ($OE = 18-19$ mg.eq, $Ch_{gl} = 9-13$ units, $H_2O_{ads} = 2.9-3.9\%$, $H_2O_{pog} = 4.5-7.5\%$, $K = 1.45-2.20$, $MC = 15-20\%$) on the physical and mechanical properties of ceramics. It has been established that ceramic laboratory samples obtained from a three-component mixture consisting of 43-51% clay raw materials of mineralogical and technological difference 5a, 42-50% zeolite-containing siliceous rock, and 7-9% expanded vermiculite have a compressive strength 1.6-2.8 times higher than products made from "pure" clay, and their average density is 0.12-0.27 g/cm³ lower. From the raw materials studied, it is possible to predict the production of ceramic wall materials (bricks, stones) with a strength grade of 100 and above with relatively high thermal characteristics. The use of zeolite-containing clay materials, refractory clay, and vermiculite in combination with low-quality clay raw materials contributes to the improvement of the physical and mechanical properties of ceramic products. Increased strength and reduced density of products are achieved through the correct ratio of calcium and silicon oxides in the mixture, which promotes the formation of wollastonite during sintering. Highly dispersed vermiculite, in turn, helps activate the sintering process and increase porosity, which improves the thermal insulation properties of ceramics. Thus, the modification of clay raw materials with the above additives allows the formation of high-quality ceramic materials with high strength and optimal thermal insulation characteristics, which increases the competitiveness of products and production efficiency in the field of building materials.

Введение

В промышленности стройматериалов важной задачей является получение керамических высокопористых стеновых изделий с улучшенными прочностными и теплоизоляционными свойствами. Для решения данной задачи вследствие истощения запасов высококачественного сырья актуально вовлечение в производство общераспространенного легкоплавкого глинистого сырья низкого качества, а также отходов добычи и переработки нерудных полезных ископаемых [1-3].

Значительное количество исследований посвящено изучению проблемы расширения сырьевой базы керамических изделий и строительных материалов за счет использования модифицированных малопластичных глинистых минералов с высоким содержанием опал-кristобалитовой фазы и суглинков [4-6]. Для улучшения свойств низкого качества глинистого сырья применяют различные способы его переработки и обогащения, в том числе и модификацию сырья технологическими добавками [7-9]. Данный способ является эффективным и экономически выгодным, так как позволяет целенаправленно регулировать структуру и свойства керамики.

Введение в сырьевую шихту выгорающих добавок (опилок древесных, торфа, битуминозных доломитов и др.) является традиционным способом получения пористых керамических материалов. Для этого достаточно эффективно и применение поробразующих минеральных технологических добавок, например, карбонатсодержащих пород [10,11]. Добавки-плавни (например, тугоплавкие глины) используют для улучшения спекаемости низкого качества глинистого сырья [12,13].

Целью данной работы является изучение влияния природных и техногенных технологических добавок в составе шихты на основе легкоплавкого глинистого сырья, относящегося по качественным характеристикам к минералогическому типу 5а [14], на физические и механические характеристики синтезированных керамических изделий.

Экспериментальная часть

Объектом исследования являлось низкого качества глинистое сырье минералогического типа 5а [14], у которого обменная емкость составляет $OE = 18$ мг.экв, число глинистости $Ч_{гл} = 9$ усл.ед, содержание монтмориллонитового компонента $МК = 18\%$, отношению массовой доли поглощенной воды к массовой доле адсорбированной воды $K = 1,64$. Химический состав сырья представлен следующими основными оксидами (в % масс): оксид алюминия меньше 10, свободный кварц – около 40, смешаннослойный минерал – 17. Чтобы использовать такое глинистое сырье в производстве стеновых керамических материалов необходимо предварительно улучшать его свойства, в частности введением различных добавок.

В качестве природных добавок в работе использовались цеолитсодержащая кремнистая порода (ЦСКП), цеолитсодержащая (ЦГ) и тугоплавкая глины (ТГ), в качестве техногенной добавки - вер-

микулит с размером частиц менее 0,63 мм. Указанная фракция, как правило, не является товарным продуктом, а представляет собой отходы и выводится в отвалы.

По нашим предположениям, цеолитсодержащая и тугоплавкая глины вводились в глинистое сырье для улучшения его спекаемости, мелкозернистый вермикулит – с целью снижения средней плотности и, соответственно, для повышения пористости и теплоизоляционных свойств керамических материалов. ЦСКП является добавкой смешанного действия, т.е. при определенной температуре и режиме обжига ЦСКП может улучшить и сделать менее энергоемким, как процесс спекаемости, так и положительно влиять на теплопроводность керамических материалов.

На первом этапе экспериментов были проведены исследования минерального и химического состава исходных компонентов шихты. Рентгенофазовый количественный анализ показал наличие в цеолитсодержащей кремнистой породе 42% опал-кristобалит-тридимитовой фазы (ОКТ - фазы), 18% цеолита, 21 % глинистых минералов и 15% кальция. По результатам химического анализа содержание в породе SiO_2 составляет 54,74 %, Al_2O_3 – 5,33 %.

Цеолитсодержащая глина содержит ОКТ – фазу – 23 %, цеолит – 32 %, глинистые минералы – 35 %. Количество основных соединений: SiO_2 – 66,51 %, Al_2O_3 – 14,09 %.

В тугоплавкой глине содержание SiO_2 равно 58,33 %, Al_2O_3 – 25,38 %.

Вспученный мелкозернистый (менее 0,63 мм) вермикулит содержит 43,22 % диоксида кремния и оксида алюминия -11,08% (соотношение $SiO_2 : Al_2O_3 = 3,9:1$), Fe_2O_3 – 16,27 %, MgO – 17,51 %. Коэффициент теплопроводности при 25 ± 5 °C равен 0,070 Вт/м·°C.

Подготовка сырьевых компонентов для введения в шихту заключалась в их сушке в естественных условиях и дроблении (глинистого сырья, цеолитсодержащей и тугоплавкой глины - до размеров частиц менее 3 мм, цеолитсодержащей кремнистой породы – до размеров менее 1 мм).

Подготовка вермикулита проводилась в две стадии: первая включала также процесс сушки, после которого производилось его обогащение с целью удаления «холостой» породы по методике, разработанной в патенте [15]. Основной и наиболее энергозатратной стадией подготовки вермикулита являлось его вспучивание при температуре 900°C в течение 7 минут.

Для формирования лабораторных образцов сухие компоненты шихты смешивались в соотношении, указанном в таблице 1 и замачивались водой до необходимой формовочной влажности. Подготовленные глиномассы тщательно перемешивались и вылеживались 24 часа для усреднения шихты по влажности. Через сутки из подготовленной шихты методом пластического формования без давления изготавливали цилиндры и балочки. Технологические добавки в необходимом количестве вводились в глинистое сырье до его замачивания. Сушка отформованных образцов вначале проводилась на стелла-

жах, затем в сушильном шкафу при температуре 35 - 100 °С до остаточной влажности менее 3%.

Малообъемные лабораторные образцы - цилиндры (диаметром 15 мм, высотой 20 мм), обжигали в лабораторной печи типа СНОЛ 1,6,2,5 1/9-ПЗ при температуре 1050 °С при следующем режиме: а) подъем температуры до конечного значения со скоростью 200 °С/ч; б) выдержка при конечной температуре - 30 минут; в) охлаждение до 50-60 °С - 24 часа.

Массоподготовка и сушка образцов - балочек размером 160х40х40 мм проводились аналогично массоподготовке и сушке малообъемных цилиндрических образцов. Режим обжига был иной: а) подъем температуры от 100 до 700 °С - 14 часов (выдержка при 500 °С составляла 3 часа), от 700 до 950 °С - 5 часов, от 950 до 1050 °С - 2 часа; б) выдержка при конечной температуре - 2 часа; в) охлаждение до 50-60 °С - 24 часа.

Таблица 1 – Влияние технологических добавок на физико-механические свойства малообъемных керамических образцов

Table 1 – Effect of technological additives on the physical and mechanical properties of small-volume ceramic samples

Природа и содержание добавки, %	Средняя плотность, г/см ³	Водопоглощение, %	Прочность к сжатию, МПа
30 % ЦСКП	1,61	24,9	19,2
40 % ЦСКП	1,55	25,7	26,5
50 % ЦСКП	1,51	27,2	22,1
20 % ЦСКП 20 % ЦГ	1,64	21,9	23,4
20 % ЦСКП 25 % ЦГ	1,62	22,2	28,2
20 % ЦСКП 30 % ЦГ	1,61	21,4	30,8
25 % ЦСКП 15 % ТГ	1,66	20,6	23,7
25 % ЦСКП 20 % ТГ	1,64	20,9	29,6
25 % ЦСКП 25 % ТГ	1,64	19,4	32,6
25 % ЦСКП 20 % ЦГ	1,61	22,5	29,9
30 % ЦСКП 15 % ЦГ	1,59	23,1	29,6
40 % ЦСКП 10 % ЦГ	1,55	24,2	28,0
-	1,78	19,2	11,9

Свойства керамических образцов определялись согласно нормативно-технической документации.

Результаты исследований по влиянию добавки в глинистое сырье цеолитсодержащей кремнистой породы (30-50 %) и комплексной добавки (20-40 % ЦСКП и 10-30 % ЦГ; 25 % ЦСКП и 15-25 % ТГ) на физико-механические свойства лабораторных образцов приведены в табл. 1.

Прочность к сжатию образцов при введении в глинистое сырье 30, 40 и 50 % цеолитсодержащей

кремнистой породы возрастает (с 11,9 МПа до 19,2, 26,5 и 22,1 МПа соответственно). Наибольшее увеличение прочности к сжатию (в 2,2 раза), по сравнению с образцами из исходного сырья, наблюдается при добавке 40 % цеолитсодержащей кремнистой породы. При этом средняя плотность керамики снижается с 1,78 г/см³ до 1,61; 1,55 и 1,51 г/см³ соответственно.

Увеличение прочности образцов при значительном уменьшении их средней плотности при добавке в глину ЦСКП объясняется, видимо, реакцией между оксидами кремния и кальция, протекающей в расплаве при температуре более 1000 °С с образованием синтетического волластонита (CaSiO₃), твердость которого по шкале Мооса равна 5,5. Об этом свидетельствуют результаты выполненного рентгенофазового количественного анализа керамических черепков. В образцах глины с добавкой 40% ЦСКП его количество в 9 раз больше, чем в образцах из исходного глинистого сырья.

Оценивая эффективность применения цеолитсодержащей кремнистой породы необходимо учитывать и степень снижения средней плотности. Как уже было отмечено, добавка цеолитсодержащей кремнистой породы позволяет снизить среднюю плотность керамического черепка при одновременном повышении его прочности к сжатию. С точки зрения влияния на эти характеристики добавлять ЦСКП в глинистое сырье достаточно эффективно. При этом прочность возрастает в 2,2 раза, а средняя плотность снижается на 14 %. В целом же необходимо учитывать абсолютные значения прочности и средней плотности. Предпочтительный вариант – при минимальном значении средней плотности прочность должна иметь удовлетворительные (требуемые) значения.

Изучались также свойства лабораторных образцов, полученных из 3-х компонентной шихты, содержащей глинистое сырье, цеолитсодержащую кремнистую породу и плавень (цеолитсодержащую или тугоплавкую глины). В сырьевой шихте с цеолитсодержащей глиной содержание ЦСКП равнялось 20 %, с тугоплавкой глиной – 25 %. Кроме того, были исследованы и сырьевые смеси, в которых содержание ЦСКП и цеолитсодержащей глины составляло 30 и 15 %, 40 и 10% соответственно.

С увеличением количества с 20 до 30 % как цеолитсодержащей, так и тугоплавкой глины прочность увеличивается. Добавка тугоплавкой глины повышает прочность в большей степени: при содержании в шихте 20 % - на 6,2 МПа, 25 % - на 4,4 МПа. Средняя плотность практически не изменяется (соответственно снижается с 1,64 до 1,61 г/см³ и с 1,66 до 1,64 г/см³). Достаточно высокие характеристики имеют образцы и при других соотношениях между содержанием цеолитсодержащей глины и ЦСКП (соответственно 25 и 20 %, 30 и 15 %, 40 и 10 %). При этом прочность к сжатию составляет 28,0-29,9 МПа, средняя плотность - 1,55-1,61 г/см³.

Водопоглощение образцов при введении в глинистое сырье ЦСКП и вышеуказанных плавней возрастает с 19,2 до 19,4 – 27,2 %.

Проведенные исследования показали, что цеолитсодержащая кремнистая порода является эффективной добавкой (40-50 % в двухкомпонентной сырьевой смеси и 20-40 % в трехкомпонентной смеси) в низкокачественное глинистое сырье. Содержание плавней (ЦГ или ТГ) в 3-х компонентной смеси варьирует в пределах 10-30 и 15-25 % соответственно.

Исследования влияния вермикулита на характеристики изделий производили с использованием «сырого» минерала и вспученного. Отмечено, что добавка 10 % «сырого» мелкоразмерного вермикулита в глинистое сырье приводит к разрушению образцов при обжиге. Это объясняется тем, что в порах вермикулита содержится большое количество воды, которая при увеличении температуры переходит в газовую фазу и начинает интенсивно расширяться и испаряться, разрушая изделия. Кроме того, наряду с воздействием водяного пара, удаляющегося из порового пространства, в структурной решетке слюды при нагревании также возникают физико-химические превращения вследствие удаления цеолитной и гидратной воды. Указанные явления приводят к деформации (короблению) частиц и раскрытию листочков слюды, что в свою очередь разрушает керамические изделия. Вследствие описанных явлений добавка «сырого» вермикулита была признана не эффективной.

Введение в глинистое сырье от 10 до 30 % вспученного мелкоразмерного вермикулита не приводит к разрушению изделия. У изделий наблюдается снижение средней плотности на 0,12 - 0,22 г/см³. При этом прочность при сжатии уменьшается на 12 - 23 % и практически не зависит от содержания вермикулита. Водопоглощение образцов увеличивается с 19,2 до 22,2 - 25,8 %. Следовательно, использование техногенного мелкоразмерного вермикулита в качестве технологической добавки в низкокачественное глинистое сырье малоэффективно, так как при заметном снижении средней плотности и, соответственно, улучшении теплоизоляционных свойств керамики, прочностные ее характеристики незначительно, но уменьшаются. Повысить прочность можно путем введения в сырьевую смесь ЦСКП, т.е. использовать в одной шихте добавку как природного, так и техногенного происхождения.

Для исследования были приготовлены смеси в которых содержание глинистого сырья составляло 43-51 %, цеолитсодержащей кремнистой породы – 40-52 %, вермикулита мелкоразмерного – 5-12 %.

Установлено, что из трехкомпонентной сырьевой шихты, включающей 43-51 % глинистого сырья, 42-50 % ЦСКП и 7-9 % мелкоразмерного вспученного вермикулита, возможно получение керамики с более высокими характеристиками, по сравнению с образцами, указанными в таблице 1. Значение прочности к сжатию образцов из трехкомпонентной шихты находится в диапазоне 32,1-33,4 МПа, средняя плотность – 1,58-1,65 г/см³.

Таким образом, можно отметить, что введение в состав глинистого сырья минералоготехнологической разности 5а комплексной добавками ЦСКП и вспученного вермикулита с соотношением компонентов оксид кремния: оксид алюминия

3,9: 1 приводит к интенсификации гетерофазного процесса спекания и увеличению прочности при сжатии керамических силикатных изделий за счет образования высокопрочной мелкопористой кристаллической структуры. Одновременно развитая мелкопористая структура гарантирует снижение средней плотности изделий и повышение их теплоизоляционных характеристик.

При сравнении значения физико-механических характеристик образцов, модифицированных комплексной добавкой (ЦСКП + Вспученный вермикулит), с лучшими значениями для керамических образцов, полученных из двух- и трехкомпонентных смесей (табл. 1), а также из исходного глинистого сырья, можно сделать следующие выводы:

1. Прочность к сжатию керамических образцов, отформованных из сырьевой смеси с содержанием 55 % комплексной технологической добавки (46 % природной добавки и 9% техногенной), выше в 2,7 раза прочности образцов из исходного глинистого сырья. При этом средняя плотность (1,58 г/см³) ниже на 0,20 г/см³.

2. По сравнению с образцами из трехкомпонентных сырьевых смесей, содержащих плавни (цеолитсодержащую и тугоплавкую глины), прочность практически не изменяется или в отдельных вариантах незначительно выше, а средняя плотность меньше на 0,03 -0,06 г/см³.

3. Введение в глинистое сырье только цеолитсодержащей кремнистой породы в количестве 40% увеличивает прочность образцов к сжатию в меньшей степени (в 2,2 раза), чем введение комплексной добавки. Средняя плотность имеет минимальное значение (1,55 г/см³).

На основании результатов, полученных на малообъемных образцах (цилиндрах диаметром 15 мм и высотой 20 мм), были выбраны сырьевые смеси для исследований свойств на укрупненных лабораторных образцах: балочках размером 160х40х40 мм. Критерием для выбора лучших сырьевых смесей являлись показатели прочности к сжатию и средней плотности. Отбирались глиномассы у которых значение прочности составляло не ниже 20 МПа, средней плотности – в пределах 1,50-1,65 г/см³. В табл. 2 приведены физико-механические характеристики образцов-балочек, отформованных из выбранных глиномасс.

Удовлетворительные значения показателей прочности и средней плотности получены для керамических образцов, отформованных из двух сырьевых смесей: 1) 60 % глинистого сырья и 40 % ЦСКП; 2) 50 % глинистого сырья, 20 % ЦСКП и 30% цеолитсодержащей глины. Керамика, полученная из двухкомпонентной смеси, обладает следующими характеристиками: прочность к сжатию 19,1 МПа, прочность к изгибу – 4,6 МПа, средняя плотность – 1,55 г/см³. Образцы, отформованные из трехкомпонентной смеси, имеют прочность к сжатию 26,9 МПа, прочность к изгибу – 5,5 МПа, среднюю плотность – 1,59 г/см³. Из данных смесей можно прогнозировать получение керамических стеновых материалов марки по прочности 100 и выше с улучшенными теплотехническими характеристиками.

ми. Сушильные свойства сырьевых смесей по сравнению с исходным глинистым сырьем изменились незначительно. Коэффициент чувствительности к сушке сырьевых смесей с технологическими добавками составляет 86-97 с, а у глинистого сырья без добавок он равен 108 с.

Таблица 2 – Физико-механические характеристики укрупненных керамических образцов

Table 2 – Physical and mechanical properties of enlarged ceramic samples

Природа и содержание добавки, %	Средняя плотность, г/см ³	Водопоглощение, %	Прочность к сжатию, МПа	Прочность к изгибу, МПа
40% ЦСКП	1,55	24,4	19,1	4,6
50% ЦСКП	1,51	27,6	13,2	3,7
20% ЦСКП 30% ЦГ	1,59	22,2	26,9	5,5
40% ЦСКП 10% ЦГ	1,57	25,3	15,0	2,9

Таким образом, установлено, что модификация низкокачественного легкоплавкого глинистого сырья минералого-технологической разновидности 5а природными (цеолитсодержащая кремнистая порода, цеолитсодержащая и тугоплавкая глины) и техногенной (вспученный вермикулит мелкозернистый) технологическими добавками приводит к повышению прочностных характеристик и снижению средней плотности керамики. Из данных сырьевых компонентов можно прогнозировать получение керамических стеновых материалов (кирпича, камня) марки по прочности 100 и выше с улучшенными теплоизоляционными свойствами.

Литература

1. В.П. Лузин, А.В. Корнилов, В.П. Сютин, В.В. Морозов, Л.П. Лузина, Р.Р. Самигуллин. *Вестник технологического университета*, 20, 10; 34-37 (2017).
2. В.А. Гурьева, А.В. Дорошин. *Строительные материалы*, 5, 30-34 (2023).
3. В.А. Гурьева, А.В. Дорошин. *Строительные материалы*, 4, 6-10 (2022).
4. Т.В. Сапелькина, Г.И. Стороженко, Т.Е. Шоева. *Строительные материалы*, 5, 9-13, (2023).
5. А.Ю. Столбоушкин. *Строительные материалы*, 4, 24-28 (2018).

6. З.М. Курызов, З.Р. Кадырова, А.М. Эминов. *Стекло и керамика*, 96, 12, 35-41 (2023).
7. В.А. Гурьева, А.А. Ильина. *Строительные материалы*, 8, 25-29 (2020).
8. В.В. Шеховцов, Н.К. Скрипникова, М.А. Семеновых, О.Г. Волокитин. *Стекло и керамика*, 94, 6, 29-35, (2021).
9. А.Е. Бурученко, В.И. Верещагин, В.К. Меньшикова. *Стекло и керамика*, 92, 11, 19-23, (2019).
10. А.Е. Бурученко, Г.Н. Харук, А.А. Сергеев. *Строительные материалы*, 9, 22-27 (2019).
11. О. Кизиниевич, В. Кизиниевич, Е. Шкамат. *Стекло и керамика*, 96, 1, 28-32, (2023).
12. А.В. Корнилов, В.П. Лузин. *Стекло и керамика*, 1, 24-26 (2004).
13. А.В. Корнилов, Е.Н. Пермяков, Т.З. Лыгина, С.В. Морозова, *Международное совещание «Прогрессивные методы обогащения и комплексной переработки природного и техногенного минерального сырья»* (Алматы, Республика Казахстан, Сентябрь 16-19, 2014). ТОО «Арк», Алматы, 2014. С.441-444.
14. А.В. Корнилов, Е.Н. Пермяков, Т.З. Лыгина. *Стекло и керамика*, 8, 29-31 (2005).
15. Пат. РФ 2080938 (1997).

References

1. V.P. Luzin, A.V. Kornilov, V.P. Syutin, V.V. Morozov, L.P. Luzina, R.R. Samigullin. *Herald of Technological University*, 20, 10; 34-37 (2017).
2. V.A. Guryeva, A.V. Doroshin. *Building Materials*, 5, 30-34 (2023).
3. V.A. Guryeva, A.V. Doroshin. *Building Materials*, 4, 6-10 (2022).
4. T.V. Sapelkina, G.I. Storozhenko, T.E. Shoeva. *Building Materials*, 5, 9-13, (2023).
5. A.Yu. Stolboushkin. *Building Materials*, 4, 24-28 (2018).
6. Z.M. Kuryazov, Z.R. Kadyrova, A.M. Eminov. *Glass and Ceramics*, 96, 12, 35-41 (2023).
7. V.A. Guryeva, A.A. Ilyina. *Building Materials*, 8, 25-29 (2020).
8. V.V. Shekhovtsov, N.K. Skripnikova, M.A. Semenovych, O.G. Volokitin. *Glass and Ceramics*, 94, 6, 29-35, (2021).
9. A.E. Buruchenko, V.I. Vereshchagin, V.K. Menshikova. *Glass and Ceramics*, 92, 11, 19-23, (2019).
10. A.E. Buruchenko, G.N. Kharuk, A.A. Sergeev. *Building Materials*, 9, 22-27 (2019).
11. O. Kizinyevich, V. Kizinyevich, E. Shkammat. *Glass and Ceramics*, 96, 1, 28-32, (2023).
12. A.V. Kornilov, V.P. Luzin. *Glass and Ceramics*, 1, 24-26 (2004).
13. A.V. Kornilov, E.N. Permyakov, T.Z. Lygina, S.V. Morozova, *International Conference "Progressive Methods for Enrichment and Comprehensive Processing of Natural and Technogenic Mineral Raw Materials"* (Almaty, Republic of Kazakhstan, September 16-19, 2014). Arko LLP, Almaty, 2014. P. 441-444.
14. A.V. Kornilov, E.N. Permyakov, T.Z. Lygina. *Glass and Ceramics*, 8, 29-31 (2005).
15. Russian Federation Patent 2080938 (1997).

© А. В. Корнилов – д-р техн. наук, профессор кафедры Технологии неорганических веществ и материалов (ТНВМ), Казанский национальный исследовательский технологический университет (КНИТУ), Казань, Россия, anwakor55@mail.ru; Л. Н. Назарова – доцент кафедры ТНВМ, КНИТУ, linajar@mail.ru.

© A. V. Kornilov – Doctor of Sciences (Technical Sci.), Professor of the Department of Technology of Inorganic Substances and Materials (TISM), Kazan National Research Technological University (KNRTYU), Kazan, Russia, anwakor55@mail.ru; L. N. Nazharova – Associate Professor of the TISM department, KNRTU, linajar@mail.ru.

Дата поступления рукописи в редакцию – 13.05.25.

Дата принятия рукописи в печать – 02.06.25.