

## Исследование образцов керамических строительных материалов с модифицирующими добавками из отходов химических предприятий

© 2022. Е. И. Панькова<sup>1</sup>, ст. преподаватель,  
Г. М. Батракова<sup>1</sup>, д. т. н., доцент, В. А. Шаманов<sup>1</sup>, к. т. н., доцент,  
А. А. Мартынова<sup>2</sup>, учёный секретарь,  
<sup>1</sup>Пермский национальный исследовательский  
политехнический университет,  
614990, Россия, г. Пермь, Комсомольский проспект, д. 29,  
<sup>2</sup>Научно-исследовательский институт полимерных материалов,  
614113, Россия, г. Пермь, ул. Чистопольская, д. 16,  
e-mail: eco@pstu.ru, Pankovaei@pstu.ru

Создание производственно-технических комплексов по переработке и обезвреживанию отходов относится к приоритетным направлениям экологической политики Российской Федерации. Актуальной задачей является поиск направлений утилизации промышленных отходов с учётом межотраслевого сотрудничества. Приведены результаты теоретического и экспериментального обоснования использования двух видов техногенных отходов в качестве отощающей и выгорающей добавок в керамическую смесь для производства стеновой керамики. Улучшение характеристик малопластичного глинистого сырья выполнено при введении в состав шихты двух видов отходов – отхода с высоким (более 95%) содержанием  $Al_2O_3$  и отхода закрытого гидролизного производства, использованного в качестве выгорающей добавки. Введение отходов в глинистое сырьё положительно повлияло на физико-механические свойства керамической массы. Отмечено увеличение числа пластичности, увеличение воздушной и огневой усадки. Исследованы некоторые эксплуатационные характеристики образцов полнотелого керамического кирпича. Экспериментально доказано, что керамический материал, изготовленный с добавками отходов, характеризуется низкой степенью токсичности для тест-объектов разных систематических групп.

**Ключевые слова:** глинистое сырьё, модифицирующие добавки, гидролизный лигнин, алюмосодержащий отход, фитотоксичность.

## Research of ceramic samples of building materials with modifying additives taken from the chemical enterprises wastes

© 2022. E. I. Pankova<sup>1</sup> ORCID: 0000-0001-9451-7112, G. M. Batrakova<sup>1</sup> ORCID: 0000-0002-4549-517X,  
V. A. Shamanov<sup>1</sup> ORCID: 0000-0003-1938-0333, A. A. Martynova<sup>2</sup> ORCID: 0000-0001-5563-7947,  
<sup>1</sup>Perm National Research Polytechnic University,  
29, Komsomolsky Av., Perm, Russia, 614990,  
<sup>2</sup>JSC “Research Institute of Polymer Materials”,  
16, Chistopolskaya St., Perm, Russia, 614113,  
e-mail: eco@pstu.ru, Pankovaei@pstu.ru

The priority direction of the environmental policy of the Russian Federation is the creation of industrial and technical complexes for the processing and disposal of waste. An urgent task is to find directions for the disposal of industrial waste, taking into account intersectoral cooperation. The results of the theoretical and experimental substantiation of the use of two types of technogenic waste as a lean and burnout additives in the ceramic mixture for the production of wall ceramics have been carried out. Improvement of the characteristics of low-plastic clay raw materials was carried out by introducing two types of waste into the charge composition – waste with a high (more than 95%)  $Al_2O_3$  content and waste from a closed hydrolysis production used as a burnout additive. The introduction of waste into clay raw materials has a positive effect on the physical and mechanical properties of the ceramic mixture. Increases in the number of plasticity, an increase in air and fire shrinkage are noted. The authors studied the microstructure of the produced ceramic samples. Microstructural analysis of modified ceramic samples showed an insignificant content of vitreous phases and the presence of small pores. The presence of pores in the microstructure is caused by lignin burnout. The vitreous phase is caused by the addition of waste with a high  $Al_2O_3$  content. The waste particles act as additional crystallization centers, which lead to the compaction of the ceramics. The addition of aluminum-containing waste to the clay raw materials made it pos-

sible to reduce the firing temperature of ceramic samples. Some operational characteristics of samples of solid ceramic bricks have been investigated. It has been experimentally proved that a low degree of toxicity for test-objects of different systematic groups is characteristic of ceramic material with waste additives.

**Keywords:** clay raw materials, modifying additives, hydrolysis lignin, aluminum-containing waste, phytotoxicity.

Отходы химических предприятий являются источником техногенной нагрузки на окружающую среду. К основным направлениям снижения объёмов накопленных отходов относятся принципы ресурсосбережения, т. е. вовлечение отходов в повторное использование [1]. В качестве отошающих добавок, позволяющих улучшить эксплуатационные свойства товарной продукции строительного назначения, предлагается использовать минеральные отходы, например, шламы химико-металлургических производств, отходов угледобычи, шлаки от сжигания угля, золу тепловых электростанций и мусоросжигательных заводов, отход производства минеральных удобрений, осадок шахтных вод и др. [2]. Органические отходы рекомендовано применять в качестве выгорающей добавки с целью снижения энергопотребления при обжиге и уменьшении веса изделия [1–9]. Подшивка глинистого сырья позволяет повысить прочность керамического материала, улучшить его эксплуатационные свойства и расширить номенклатуру сырьевых материалов [10, 11].

Поисковые исследования, разработка и внедрение технологий использования промышленных отходов в качестве добавок в производстве строительных материалов актуальны в России и за рубежом [5, 12–15].

Необходимым этапом разработки технологий применения техногенных отходов в производстве строительных материалов, в том числе стеновой керамики, является экспериментальное исследование модифицированной керамической массы [1, 3]. Актуальной является оценка полученного керамического материала на соответствие эксплуатационно-техническим характеристикам и экологической безопасности.

Целью настоящего исследования являлась оценка образцов керамического материала, изготовленного с минеральной отошающей и выгорающей добавками из отходов химических производств, по показателям экологической безопасности и физико-механическим свойствам.

## Материалы и методы исследования

Объектами исследования были образцы керамического материала без добавления

отходов (контрольный образец) и с добавлением отходов (модифицированный образец). Контрольный образец изготовлен из глинистого сырья Таушинского месторождения в Пермском крае, которое отличается низким содержанием крупнозернистых и посторонних включений, относится к группе полукислых глин (содержание  $Al_2O_3 + TiO_2$  – 15–30%), по содержанию оксида железа – к сырью с высоким содержанием красящих оксидов ( $Fe_2O_3$  более 3%) [16].

Модифицированный образец керамической шихты, кроме глинистого сырья, включал добавки алюмо- и лигнинсодержащих отходов.

Алюмосодержащий отход с высоким (более 95 масс.%) содержанием  $Al_2O_3$  образуется в процессе улова и нейтрализации пылегазовых выбросов при уничтожении энергонасыщенных материалов [17–19]. Класс опасности отхода – 3 (умеренно опасный), определён расчётным методом. Основные характеристики отхода: комковатый материал, средний размер конгломератов составлял 5–10 мм; измельчённый отход имеет размер частиц 3–4 мкм, истинную плотность – 3,31 г/см<sup>3</sup> и удельную поверхность – 5000 см<sup>2</sup>/г, потери при прокаливании – 0,71%. Вследствие высокой дисперсности, отход может оказывать негативное влияние на здоровье человека при пылении.

Лигнинсодержащий отход (гидролизный лигнин) отобран из отвала отходов закрытого гидролизного производства в Пермском крае. Класс опасности отхода – 3 (умеренно опасный). Основные характеристики: фракция – 6–8 мм, влажность – 45–50%, зольность – 6,49% с преобладанием в составе золы  $SiO_2$  (93,4%), содержание лигнина в составе отхода – 67,4%. Подобные отходы представляют опасность в связи с высокой подверженностью к воспламенению.

Керамическую массу с добавками отходов готовили пластическим способом до получения формовочной влажности, затем, при помощи металлической формы с отверстием для выдавливания излишка глиняной массы, формовали цилиндры диаметром и высотой 45 мм. После высушивания до постоянной массы при температуре  $105 \pm 5$  °С образцы обжигали.

Методология исследований реализована в соответствии с поставленной целью. Были

использованы общепринятые методы оценки физико-механических и показателей экологической безопасности, оценка структуры и свойств материалов проведена с использованием стандартных методик по ГОСТ. Статистическую обработку полученных данных проводили в программном продукте Microsoft Excel.

Исследования керамических образцов из модифицированной керамической массы проводили по требованиям ГОСТ 21216, механические свойства образцов определяли по стандартным методикам ГОСТ 7025, ГОСТ 8462, ГОСТ 2409 (ИСО 5017-88). Исследованы следующие характеристики: формовочная влажность, число пластичности, температура спекания, воздушная и огневая усадка, водопоглощение по массе, предел прочности при сжатии и изгибе, количество циклов морозостойкости.

Структура образцов изучена на растровом электронном микроскопе VEGA3 TESCAN SBH во вторичных электронах при увеличениях 100, 300, 1000, 3000 и 10000 крат. Подготовка образцов для электронно-микроскопического исследования была проведена на установке Quorum Q150R ES путём напыления проводящей плёнки.

Исследование безопасности керамических образцов выполнено по требованиям МУ 2.1.674-97 о санитарно-гигиенической оценке строительных материалов, полученных с добавлением промышленных отходов, включая исследования миграции веществ в воздушную среду и модельные среды (водная, слабокислая), а также биотестирование водных вытяжек из модифицированного керамического материала и минеральной добавки (алюмосодержащего отхода).

Исследование миграции химических веществ в воздушную среду было проведено в моделируемых условиях, для этого образцы помещали в эксикаторы, оснащённые штуцерами для подключения шлангов, образцы выдерживали при температуре 20 °С. Отбор проб проводили через 30 сут в откакумированные газовые пипетки, предварительно проверенные на герметичность. Анализ проб воздушной среды проведён методом инфракрасной спектроскопии на Фурье-спектрометре Nicolet iS50 FT-IR с помощью приставки НПВО с алмазным кристаллом в области частот 4000–400 см<sup>-1</sup>. Идентификация проведена с помощью библиотек, приложенных к прибору.

Исследование водной и кислотной (0,8 М HCl) вытяжек выполнено после взбалтывания образцов с раствором в соотношении 1 : 10

в течение 1 ч, отстаивания и фильтрации через бумажный фильтр. Вытяжка проанализирована на атомно-эмиссионном спектрометре Agilent 4100 MP-AES. Градуировка спектрометра для получения количественных характеристик проведена с использованием ГСО ионов металлов.

Дополнительно выполнено исследование водной вытяжки из минерального отхода. Для исследования брали 20,0 г образца отхода, приливали 100 мл дистиллированной воды и встряхивали в ротационном испарителе в течение 1 ч. После отделения водной фазы от осадка анализировали водную вытяжку методом атомно-абсорбционной спектрофотометрии и ионной хроматографии по методикам М-02-2406-13 и М-02-1805-09.

Для биотестирования предварительно готовили водные вытяжки из измельчённых до грубодисперсного состояния модифицированных керамических образцов. Были использованы тест-объекты разных систематических групп: зелёных протококковых водорослей (*Scenedesmus quadricauda*), низших ракообразных (*Daphnia magna*), тест-культуры – редиса красного (*Raphanus sativus*). Тест-реакцию оценивали по следующим показателям: по тест-объекту *S. quadricauda* рассчитывали ингибирующую кратность разбавления (ИКР) и безвредную кратность разбавления (БКР); по тест-объекту *D. magna* рассчитывали летальную кратность разбавления (ЛКР) и БКР.

Оценка опасности использования отходов в керамическом материале основана на экспериментально установленной зависимости величины фитотоксического эффекта от разбавления водного экстракта. Исследования проводили по методике проращивания семян с непосредственным контактом семян тест-культуры с водным экстрактом.

Для исследования брали 50 семян редиса красного (*R. sativus*), которые укладывали равномерно на фильтровальную бумагу в чашки Петри, и наливали по 5 мл водной вытяжки. Эксперимент проводили в четырёхкратной повторности. Чашки закрывали и оставляли при температуре 20 °С на 72 ч. За контроль принимали опыт с дистиллированной водой, сравнение проводили между образцами водной вытяжки минеральной добавки (алюмосодержащий отход) и образца модифицированной керамики. Проводили визуальную оценку состояния тест-культуры и измерение длины корней, при котором исключали из ряда данных пять наименьших значений.

Результаты биотестирования интерпретировали на основании Приказа Минприроды России от 08.12.2020 № 1027 «Об утверждении порядка подтверждения отнесения отходов I–V классов опасности к конкретному классу опасности».

**Результаты и обсуждение**

Для создания строительного материала на основе глинистого сырья необходимо учитывать влияние на свойства разрабатываемого материала одновременно нескольких факторов, включая соответствие эксплуатационно-техническим характеристикам и экологической безопасности.

Оценку физико-механических свойств керамических образцов проводили в два этапа, на первом – выполнен подбор состава шихты и температуры обжига образцов, на втором – определено оптимальное количество добавки гидролизного лигнина и алюмосодержащего отхода в керамической шихте. Установлен оптимальный состав шихты – глинистое сырьё:

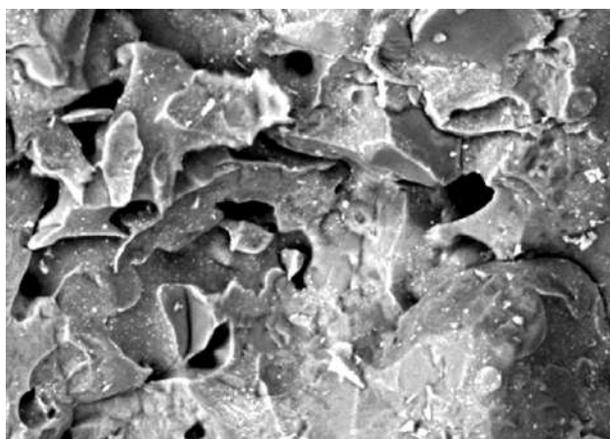
алюмосодержащий отход: лигнинсодержащий отход (масс.%) – 70,7 : 23,5 : 5,8 соответственно. Температура обжига керамической массы, обоснованная моделированием по теории планирования эксперимента, составила 1150±10 °С. Оценены физико-механические свойства образца, изготовленного без добавок отходов (контрольный образец), и образца с минеральной и выгорающей добавками из отходов (модифицированный образец). Результаты исследований с оценкой показателей для керамических изделий по ГОСТ 530 представлены в таблице 1.

Как следует из представленных данных, прочностные характеристики и морозостойкость керамики возрастают, водопоглощение уменьшается с применением минеральной и выгорающей добавок. Добавление отходов к глинистому сырью положительно повлияло на физико-механические свойства керамических образцов – число пластичности увеличилось до 14,56; модифицированная смесь хорошо формовалась, несмотря на увеличение формовочной влажности до 23%; воздушная усадка

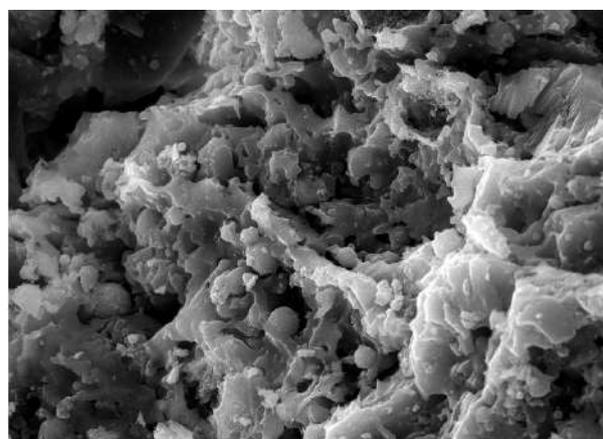
**Таблица 1 / Table 1**  
 Результаты исследований физико-механических свойств керамических образцов  
 Results of studies of physical and mechanical properties of ceramic samples

Образец Sample	Свойства образцов на этапе выбора состава и температуры обжига Properties of the samples during the choice of composition and firing temperature			Свойства образцов после обжига при 1150±10 °С Properties of samples after firing at 1150±10 °C			
	формовочная влажность, % forming moisture, %	воздушная линейная усадка, % air shrinkage, %	огневая линейная усадка, % fire shrinkage, %	водопоглощение, % water absorption, %	предел прочности при сжатии, МПа compressive strength, MPa	предел прочности при изгибе, МПа flexural strength, MPa	морозостойкость, цикл frost resistance, cycles
Контроль control sample (no added waste)	16,65±0,03	6,100±0,001	0,80±0,05	7,5–8,5	10–15	2,2–2,8	50
Модифицированный Modified sample (with additives of waste)	23,0±0,7	8,480±0,015	4,3±0,7	6,7±0,6	17,1±0,5	3,40±0,06	52
Требования ГОСТ 530 Requirements GOST 530	–*	–*	–*	≥ 6,0	10–30	1,4–2,2	≥ 50

Примечание: \* – не регламентируется.  
 Note: \* – not regulated.



a



b

**Рис. 1.** Микроструктура образцов после обжига:  
a – контрольный образец; b – модифицированный образец  
**Fig. 1.** Microstructure of samples after firing:  
a – control sample; b – modified sample

керамических образцов увеличилась до 8,48%, что удовлетворяет технологическим условиям; увеличение огневой усадки до 4,3% связано с добавлением алюмосодержащего отхода.

Для понимания процессов структурообразования композита и оценки влияния добавок из отходов на изменение микроструктуры керамических образцов после обжига проведены исследования микроструктуры керамического образца. Снимки микроструктуры, выполненные с помощью электронного микроскопа, представлены на рисунке 1.

Анализируя полученные результаты, можно отметить, что для образца с оптимальным составом добавок наблюдается пористая микроструктура и характерно значительное содержание стекловидной фазы. Наличие пор в микроструктуре объясняется тем, что в керамической шихте присутствовала выгорающая добавка. Значительное содержание стекловидной фазы обусловлено добавлением алюмосо-

держающего отхода, частицы которого выступают как дополнительные центры кристаллизации, что, в свою очередь, приводит к уплотнению керамического черепка [18]. Добавление алюмосодержащего отхода в сырьевую рецептуру позволило снизить температуру обжига с 1750 до 1150 °С. Таким образом, добавление алюмосодержащего отхода и выгорающей добавки оказывает положительное влияние на формирование керамического материала [20].

Проведены исследования экологической безопасности образца керамического материала по миграции химических веществ в воздушную среду. При исследовании состава веществ, выделяемых в воздушную среду из керамических образцов, в газовой пробе отмечено присутствие только CO<sub>2</sub>. Керамический образец поглощал влагу.

Результаты анализа водной и кислотной вытяжек из керамических образцов представлены в таблице 2. Для сравнения приведены

**Таблица 2/ Table 2**

Выделение химических веществ в модельные среды  
Release of chemicals into model environments

Элемент The element	Содержание, мг/л / Content, mg/L			
	в вытяжке из образца керамического материала / in the extract from a sample of ceramic material		в вытяжке из образца алюмосодержащего отхода in the extract from the mineral waste sample	
	pH 6–7	pH 4,8–5,1	pH 6–7	pH 4,8–5,1
K	–*	67,0±0,7	3,2±0,02	5,20±0,08
Na	11,60±0,02	16,80±0,07	15,5±0,01	18,70±0,03
Mg	1,40±0,08	43,00±0,08	41,8±0,02	46,50±0,02
Ca	9,70±0,03	8,90±0,02	22,0±0,2	23,00±0,09
Al	3,20±0,07	6,50 ±0,05	3209 0 ±0,9	710,0 ±0,8
Fe	следы / negligible amount		2895,0±0,9	689,0±0,5

Примечание / Note: \* – не обнаружено / not found.

Таблица 3 / Table 3

Результаты биотестирования водных экстрактов из образцов модифицированного керамического материала / Results of biotesting of aqueous extracts from modified ceramic material samples

Концентрация водной вытяжки, % Concentration of the aqueous extract, %	Отклонение от контроля с тест-объектом, % Deviation from control with a test object, %	
	<i>Scenedesmus quadricauda</i>	<i>Daphnia magna</i>
100	-14,0	0,0
50	-7,0	5,0
25	-3,2	0,0
10	-1,2	0,0
5	0,6	0,0
Критерий токсичности Toxicity criteria	≤ -30 (стимуляция) ≤ -30 (stimulation)	≤ 10 (безвредная) / ≤ 10 (harmless); ≥ 50 (токсичность) / ≥ 50 (toxicity)
Токсикометрия Toxicometry	БКР = 1 harmless dilution ratio = 1 ИКР = 0 inhibitory dilution rate = 0	БКР = 1 harmless dilution ratio = 1 ЛКР = 0 lethal dilution factor = 0

результаты анализа вытяжки из алюмосодержащего отхода, использованного в качестве минеральной добавки.

При исследовании водной вытяжки минерального отхода (в соотношении 1 : 5) выявлены высокие концентрации кислотных остатков, которые могут оказывать негативное влияние на гидробионтов (мг/дм<sup>3</sup>): нитрит-ионы – 10,0±1,5; нитрат-ионы – 132±20 и хлорид-ионы – 1080±162; концентрации макрокомпонентов в водной вытяжке составили (мг/дм<sup>3</sup>): Al – 140±14; Fe – 16,0±2,0; Mn – 5,4±1,3; Cu – 0,3±0,1.

В водной вытяжке образца керамического материала миграция алюминия в водную среду меньше на 4 порядка, а железо содержится в следовых количествах. Во всех исследованных вытяжках Li, Ba, Cu, Zn и Sr присутствуют в следовых количествах.

Результаты биотестирования представлены в таблице 3. Установлено, что пороги токсичности не были достигнуты ни в одном варианте, в том числе в неразбавленной вытяжке. Безвредная кратность разбавления водной вытяжки для водорослей и ракообразных равна единице, ИКР и ЛКР для тест-объектов равны нулю, что соответствует пятому классу опасности отхода (практически неопасный) для окружающей среды согласно требованиям Приказа Минприроды России от 08.12.2020 № 1027. Таким образом, неразбавленная вытяжка из образцов модифицированного керамического материала не оказывает острого токсического действия на тест-объекты.

Оценка фитотоксичности водной вытяжки из керамических образцов основана на способности семян реагировать на присутствие экзо-

генных химических веществ путём изменения интенсивности прорастания. Сравнение выполняли для проростков семян редиса (*R. sativus*) в дистиллированной воде, водной вытяжке из минеральной добавки и водной вытяжке из образца модифицированного керамического материала.

Визуальная оценка интенсивности прорастания тест-культуры позволила предположить, что водная вытяжка из образца керамики с добавками отходов благоприятна для прорастания тест-культуры, по сравнению с вытяжкой из минеральной добавки она характеризовалась большим числом проросших семян и активным ростом корневой и листовой части проростков. Для вытяжки из алюмосодержащего отхода отмечено окрашивание фильтровальной бумаги, что, вероятно, связано с миграцией в водную среду макрокомпонентов (Al, Fe, Mn, Cu) из состава отходов, что снижало скорость прорастания семян тест-культуры.

При сравнительной оценке токсического действия водных вытяжек на длину проростков установлено, что образец модифицированной керамики обладает более низкой токсичностью по сравнению с водной вытяжкой из минерального отхода. Экспериментально доказано, что керамический материал, изготовленный с добавками отходов, характеризуется низкой степенью фитотоксичности.

### Заключение

Исследованы физико-механические свойства керамической смеси, в которой для модификации малопластичного глинистого сырья использованы мелкодисперсный минеральный алюмосодержащий отход и отход из

отвала закрытого гидролизного производства в соотношении компонентов, позволяющем достигать оптимальные технологические характеристики керамической смеси.

Добавление отходов к глинистому сырью положительно повлияло на физико-механические свойства керамических образцов. Микроструктура образцов керамической массы, модифицированной органическими и минеральными отходами техногенного происхождения, показала незначительное содержание стекловидных фаз и присутствие в структуре керамики мелких пор, обусловленных выгоранием лигнина.

В соответствии с требованиями санитарно-гигиенической оценки строительных материалов, полученных с добавлением промышленных отходов, проведена токсикологическая оценка керамического материала. Исследования фитотоксичности доказали отсутствие негативного влияния водной вытяжки керамического материала на проращение тест-культуры.

*Исследования выполнены при поддержке гранта Президента РФ по государственной поддержке молодых учёных – кандидатов наук МК-1252.2020.8.*

## References

1. Bozhenov P.I., Glibina I.V., Grigorev B.A. Construction ceramics from industrial by-products. Moskva: Stroyizdat, 1986. 136 p. (in Russian).
2. Simonovaa V.V., Shendrika T.G., Kuznetsov B.N. Methods of industrial lignins utilization // Journal of Siberian Federal University. Chemistry. 2010. V. 4. No. 3. P. 340–354.
3. Abdrakhimov V.Z., Abdrakhimova E.S. Promising use of waste coal in the production of insulating material without the use of traditional natural materials // Inorg. Mater. Appl. Res. 2017. V. 8. P. 788–794. doi: 10.1134/S2075113317050021
4. Vakalova T.V., Revva I.B., Adyakaeva A.V. Study of natural resources for material acid resistance // Fundamental Research. 2013. No. 3. P. 556–560 (in Russian).
5. Makarov D.V., Melkonyan R.G., Suvorova O.V., Kumarova V.A. Prospects for using industrial waste in production of ceramic building materials // Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten. 2016. No. 5. P. 254–281 (in Russian).
6. Ewaisa E.M.M., Khalilb N.M., Aminc M.S., Ahmeda Y.M.Z., Barakatd M.A. Utilization of aluminum sludge and aluminum slag (dross) for the manufacture of calcium aluminate cement // Ceramics International. 2009. V. 35. No. 8. P. 3381–3388. doi: 10.1016/j.ceramint.2010.03.001
7. Mymrine V.A., Alekseev K.P., Zelinskaya E.V., Tolmacheva N.A., Catai R.E. Industrial sewage slurry utilization for red ceramics production // Construction and Building Materials. 2014. V. 66. P. 368–374.
8. Kumar S., Kumar R., Bandopadhyay A. Innovative methodologies for the utilisation of wastes from metallurgical and allied industries // Resources, Conservation and Recycling. 2006. V. 48. P. 301–314 (in Russian). doi: 10.1016/j.resconrec.2006.03.003
9. Malchik A.G., Litovkin S.V., Rodionov P.V., Kozik V.V., Gaydamak M.A. Analyzing the technology of using ash and slag waste from thermal power plants in the production of building ceramics // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 2016. V. 127. Article No. 012024. doi: 10.1088/1757-899X/127/1/012024
10. Pecharsky V.K., Zavalij P.Y. Fundamentals of powder diffraction and structural characterization of materials. USA: Springer, 2005. 713 p.
11. Ogrel A.S. Aluminum-containing waste as a potential raw material for the production of industrial products // Ekologicheskij vestnik Rossii. 2011. No. 2. P. 36–40 (in Russian).
12. Chinnam R.K., Bernardo E., Bernardo E.W.J., Boccaccini A.R. Processing of porous glass ceramics from highly crystallisable industrial wastes // Advances in Applied Ceramics. 2015. V. 114. P. 11–16. doi: 10.1179/1743676115Y.0000000053
13. Boltakova N.V., Faseeva G.R., Kabirov R.R., Nafikov R.M., Zakharov Yu.A. Utilization of inorganic industrial wastes in producing construction ceramics. Review of Russian experience for the years 2000–2015 // Waste Management. 2017. V. 60. P. 230–246.
14. Fergusson L. A sustainability framework for the beneficial reuse of alumina refinery residue // Journal of Multidisciplinary Engineering Science and Technology. 2014. V. 1. No. 5. P. 105–120.
15. Kingery W.D., Bowen H.K., Uhlmann D.R. Introduction to ceramics. New York: Wiley, 1977. 1032 p.
16. Volosatova K., Shamanov V., Kazymov K., Tomilina E. Comparison of characteristics of clay raw materials in the Perm territory // PNRPU Bulletin. Applied Ecology. Urban Development. 2022. No. 1. P. 59–70 (in Russian). doi: 10.15593/2409-5125/2022.1.05
17. Martynova A.A., Batrakova G.M., Ponik A.N. Possibility of using aluminum-containing waste as a raw component for the production of alumina and high alumina cement // Ekologiya promyshlennogo proizvodstva. 2019. No. 4 (108). P. 2–5 (in Russian).
18. Ponik A.N., Karpova N.Y., Batrakova G.M. Technological scheme for cleaning waste generated during the destruction of fuel cells // Ecology and Industry of Russia. 2015. V. 19. No. 7. P. 32–35 (in Russian). doi: 10.18412/1816-0395-2015-7-32-35
19. Martynova A.A., Batrakova G.M. Assessment of the composition and the microstructure of aluminium-containing waste for the substantiation of the direction // Theoretical and Applied Ecology. 2018. No. 2. P. 62–69 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2018-2-062-069
20. Monteiro S.N., Fontes Vieira C.M. On the production of fired clay bricks from waste materials: A critical update // Construction and Building Materials. 2014. V. 68. P. 599–610.