

Научная статья  
УДК 549.632  
doi:10.37614/2949-1215.2023.14.1.018

## ПОЛУЧЕНИЕ ТЕРМОСТОЙКОЙ КЕРАМИКИ НА ОСНОВЕ РАЗЛИЧНЫХ ПРИРОДНЫХ И СИНТЕТИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ

**Евгения Михайловна Дятлова<sup>1</sup>, Федор Иванович Пантелеенко<sup>2</sup>, Ростислав Юрьевич Попов<sup>3</sup>, Александра Сергеевна Самсонова<sup>4</sup>**

<sup>1, 3, 4</sup>Белорусский государственный технологический университет, Минск, Республика Беларусь

<sup>2</sup>Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь

<sup>3</sup>rosopov@mail.ru

### Аннотация

Представлены результаты исследований возможности получения термостойких керамических изделий на основе природного глинистого сырья Республики Беларусь различного минерального состава, талька Онотского, а также синтетических глиноземсодержащих компонентов. Исследованы процессы, протекающие при синтезе керамики технического назначения, изменение фазового состава и свойств материала в процессе термообработки. Определены условия получения термостойкого материала, а также параметры его эксплуатации. На основании полученных экспериментальных данных и лабораторно-промышленных испытаний созданы предпосылки для организации производства термостойкой керамики в Республике Беларусь на основе отечественного глинистого сырья.

### Ключевые слова:

термостойкая керамика, отечественное глинистое сырье, температурный коэффициент линейного расширения

### Для цитирования:

Получение термостойкой керамики на основе различных природных и синтетических материалов / Е. М. Дятлова [и др.] // Труды Кольского научного центра РАН. Серия: Технические науки. 2023. Т. 14, № 1. С. 96–104. doi:10.37614/2949-1215.2023.14.1.018

Original article

## OBTAINING HEAT-RESISTANT CERAMICS BASED ON VARIOUS NATURAL AND SYNTHETIC MATERIALS

**Evgenia M. Dyatlova<sup>1</sup>, Fedor I. Panteleenko<sup>2</sup>, Rostislav Yu. Popov<sup>3</sup>, Alexandra S. Samsonova<sup>4</sup>**

<sup>1, 3, 4</sup>Belarusian State Technological University, Minsk, Republic of Belarus

<sup>2</sup>Belarusian National Technical University, Minsk, Republic of Belarus

<sup>3</sup>rosopov@mail.ru

### Abstract

The paper presents the results of studies of the possibility of obtaining heat-resistant ceramic products based on natural clay raw materials of the Republic of Belarus of various mineral composition, Onotsky talc, as well as synthetic alumina-containing components. The processes occurring during the synthesis of ceramics for technical purposes, the change in the phase composition and properties of the material during heat treatment have been studied. The conditions for obtaining a heat-resistant material, as well as the parameters of its operation, are determined. On the basis of the obtained experimental data, laboratory and industrial tests, the prerequisites for organizing the production of heat-resistant ceramics in the Republic of Belarus based on domestic clay raw materials have been created.

### Keywords:

heat-resistant ceramics, domestic clay raw materials, linear expansion temperature coefficient

### For citation:

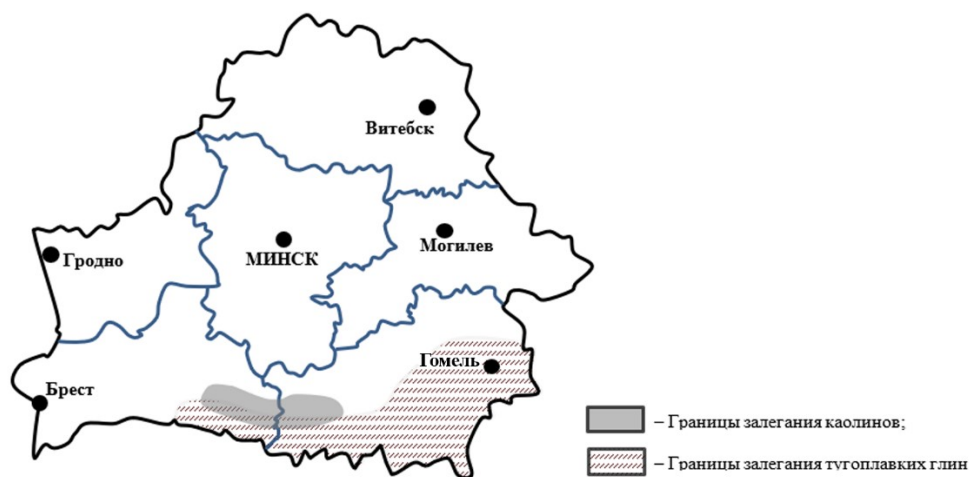
Obtaining heat-resistant ceramics based on various natural and synthetic materials / E. M. Dyatlova [et al.] // Transactions of the Kola Science Centre of RAS. Series: Engineering Sciences. 2023. Vol. 14, No. 1. P. 96–104. doi:10.37614/2949-1215.2023.14.1.018

### Введение

Минерально-сырьевая база Республики Беларусь недостаточно богата природными материалами. Большинство пород, располагающихся в стране, осадочного происхождения, реже магматического. К первому типу относятся обломочные породы (полиминеральные глины, а также несколько мономинеральных, пески, супеси и суглинки), хемогенные (минеральные соли, сульфаты, карбонаты, кремнистые материалы),

органогенные (торф, бурый уголь, несколько месторождений нефти). Ко второму типу относятся гранитоиды и базальты. На территории Республики Беларусь преимущественно залегают легкоплавкие глины (табл. 1), содержащие в своем составе, кроме глинистых минералов (монтмориллонита, гидрослюда, реже каолинита), примеси кварца (в виде песка), полевых шпатов, карбонатов (мел, мергель, мрамор и др.), соединений железа, а также различных смешаннослойных образований, иногда в сырье присутствует гипс [1–3].

Качество глинистых сырьевых материалов (их пластичность и огнеупорность) повышается по мере приближения к южным границам республики [1–5]. Так, например, месторождения тугоплавких глин располагаются в основном в Гомельской и Брестской областях, содержание  $Al_2O_3$  в них достигает 17–18 мас. % (рисунок).



Распределение тугоплавкого и огнеупорного глинистого сырья на территории Республики Беларусь

Также на территории указанных областей находятся месторождения каолинов. Недостаточный уровень исследования качества и условий применения природных сырьевых материалов сдерживает их широкое распространение в промышленности и приводит к необходимости их ограниченного использования, при этом способствуя увеличению импорта аналогичного сырья из-за рубежа и повышая зависимость предприятий от поставщиков.

Комплексное изучение свойств местных глин и особенностей их применения позволяет расширить сырьевую базу предприятий, а также ассортимент выпускаемой продукции, что способствует развитию отечественных производств, снижает зависимость предприятий от зарубежных поставщиков сырья, улучшает логистику и положительно сказывается на стоимости конечного продукта. При этом необходимо обеспечить достижение требуемых характеристик материала и изделий на его основе, сохранение их эксплуатационных свойств. Как видно из данных табл. 1, минеральный состав глинистого сырья, залегающего на территории Республики Беларусь, достаточно неоднороден и включает значительное количество примесных составляющих.

Таблица 1

Общие характеристики глинистого сырья, используемого в работе

Месторождение глинистого сырья	Характеристика глин по огнеупорности	Минеральный состав
1	2	3
Каолин Глуховецкий (Украина)	Огнеупорное сырье	Каолинит, кварц
Глина месторождения Новорайского (ДН-0) (Украина)	То же	Каолинит, гидрослюда, кварц, полевые шпаты
Глина Веселовская (Керамик-Веско) (Украина)	»	То же
Глина месторождения Боровичи (Российская Федерация)	»	»

Окончание таблицы 1

1	2	3
Каолины месторождений Ситница и Дедовка (Республика Беларусь)	»	Каолинит, кварц, железистые соединения
Глина месторождения Туровского (Республика Беларусь)	Тугоплавкое сырье	Каолинит, монтмориллонит, кварц, гидрослюда, полевые шпаты, карбонатные примеси (мергель, доломит, известняк, мел), железистые соединения
Глина месторождения Городного (Республика Беларусь)	То же	Монтмориллонит, кварц, каолинит, гидрослюда, полевые шпаты, карбонатные примеси (мергель, доломит, известняк, мел), железистые соединения
Глина «Крупейский сад» (нижний слой) (Республика Беларусь)	»	Монтмориллонит, гидрослюда, пески полиминеральные (кварцевая и полевошпатовая составляющая), каолинит, монотермит, карбонатные примеси (мергель, доломит, известняк, мел), железосодержащие соединения
Глина месторождения Гайдуковка (Республика Беларусь)	Легкоплавкое сырье	Гидрослюда, монтмориллонит, каолинит, кварц, полевые шпаты, карбонатные примеси (мергель, доломит, известняк, мел), железосодержащие соединения
Глина месторождения Лукомль (Республика Беларусь)	То же	То же

Присутствие в природном материале разнородных по минеральному, химическому составам минералов, непостоянство реологических свойств керамических масс на их основе с неодинаковым поведением при обработке (подготовке, смешивании, помоле, формовке и термической обработке) существенно усложняют технологию получения изделий из такого сырья.

Химический состав глинистого сырья приведен в табл. 2.

Таблица 2

Химический состав проб сырьевых материалов, используемых в работе

Материал	Оксидный состав, мас. %										ППП
	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeO + Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	MnO	TiO <sub>2</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Каолин месторождения Глуховского (обогащенный)	49,67	40,60	0,45	–	0,22	0,15	0,05	–	–	–	8,85
Глина месторождения Новорайского (ДН-0)	53,11	30,95	1,09	1,93	0,55	1,04	0,72	–	1,33	0,08	9,20
Глина месторождения Веселовского (Керамик-Веско)	59,01	26,86	1,18	1,54	0,55	0,96	0,63	–	1,41	0,07	7,79
Глина месторождения Боровичи	45,27	36,96	1,93	0,47	0,59	0,60	0,24	–	1,53	–	12,41
Каолин месторождения Ситница (обогащенный)	46,10	34,60	2,53	0,23	0,42	2,00	0,47	–	0,94	–	12,71
Каолин месторождения Дедовка (обогащенный)	50,70	33,40	1,05	0,21	0,11	3,24	0,01	–	0,63	0,11	10,54
Глина месторождения Туровского	69,04	14,96	3,38	1,08	0,39	0,57	0,23	–	0,77	–	9,59

Окончание таблицы 2

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Глина месторождения Городного	66,96	16,01	7,21	0,71	0,40	0,08	0,49	–	0,51	–	7,63
Глина месторождения Крупейский Сад	62,84	24,23	2,23	0,37	0,40	0,14	0,04	–	0,95	–	8,80
Глина месторождения Гайдуковка	56,08	13,85	4,51	8,19	2,63	3,76	0,84	–	–	–	10,14
Глина месторождения Лукомль	51,42	15,61	6,66	5,57	2,59	5,65	0,74	0,84	0,84	–	10,09
Тальк Онотский	60,45	0,68	0,86	0,13	30,04	–	–	0,10	0,06	–	7,67
Технический глинозем ГН-1	–	99,80	–	–	–	–	–	–	–	–	0,02
Гиббсит (Al(OH) <sub>3</sub> )	0,19	62,50	0,01	–	–	1,00	–	–	–	–	36,31

Производственная потребность предприятий в термостойких керамических материалах достаточно значительна. Они широко применяются в качестве конструктивных элементов тепловых установок и агрегатов, подвергающихся воздействию резких перепадов температур, такие материалы используются в устройствах различных каталитических систем (в том числе автомобильных и нефтеперерабатывающих), а также в быту (в конструкциях устройств горелок, электрических и газовых плит, обогревателей, для изготовления различной кухонной утвари (кофеварок, жаровней и др.) [1–27]. Наиболее перспективными и функциональными термостойкими материалами являются кордиеритовые и волластонитовые. В Республике Беларусь изделия на основе кордиерита и волластонита применяются в машино- и станкостроении, металлургии, производстве строительных материалов, керамики, в химической отрасли и т. д.

Несмотря на значительные объемы потребления таких материалов и изделий из них в Республике Беларусь, они до сих пор являются предметом импорта. Эти обстоятельства приводят к необходимости организации производства подобной керамики в стране. С целью решения поставленных задач осуществляются работы по изысканию возможностей по максимальному вовлечению сырьевых материалов отечественных месторождений для выпуска технической керамики в стране.

## Результаты

Приведен ряд исследований, осуществленных на кафедре технологии стекла и керамики учреждения образования «Белорусский государственный технологический университет» в указанном научном направлении.

Составы керамических масс проектировались таким образом, чтобы обеспечить максимальное приближение основных кордиеритобразующих оксидов MgO, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, SiO<sub>2</sub> к стехиометрическому соотношению, соответствующему значению 2 : 2 : 5. Образцы готовились по полусухой технологии, предусматривающей следующие операции. Высушенные и измельченные сырьевые материалы просеивались через сито с сеткой № 1, дозировались в соответствии с рецептурой, усреднялись по объему композиции. Керамическая масса измельчалась в течение 20 мин в планетарной лабораторной мельнице фирмы Retsch PM-100 (Германия), после чего приготовленная смесь увлажнялась до влажности 6–8 %, протиралась через сито с сеткой № 1. Готовый пресс-порошок вылеживался в течение 1 сут для усреднения по составу и влажности. Формование образцов осуществлялось на гидравлическом прессе при давлении формования 35–40 МПа. Сушка производилась в электрическом сушильном шкафу Snol (Литва) при температуре 100 ± 10 °С в течение 2 ч, после чего осуществлялся однократный обжиг в электрической муфельной печи Nabertherm (Германия) при температурах 1100–1300 °С и скорости подъема температуры 250–300 °С/ч. Охлаждение печи осуществлялось инерционно.

Проведенные исследования показывают, что использование гиббсита в качестве глиноземсодержащего компонента приводит к активизации процессов фазообразования и спекания керамики за счет эффекта Хедвалла, доля кордиеритовой фазы значительно увеличивается, однако при его использовании существенно повышаются усадочные деформационные процессы при обжиге, которые начинают проявляться при 305 °С и продолжаются приблизительно до температуры 1100 °С (согласно данным дифференциально-термического анализа). Отмечается, что процесс формирования кордиеритовой фазы в керамических материалах, синтезированных на основе различного глинистого

сырья, фиксируется при разных температурах обжига, причем первоначально рефлексы кордиерита и индиалита (высокотемпературной модификации кордиерита) идентифицируются у образцов на основе легкоплавких и тугоплавких глин уже приблизительно при 1000 °С, а у образцов, полученных с использованием огнеупорного глинистого сырья (каолина и огнеупорных глин), при температурах выше 1100–1150 °С. Установлено, что использование высококачественных огнеупорных глин (за исключением каолинов) сужает область существования нежелательной для подобных материалов кристаллической фазы кристобалита (до уровня 1150 ± 20 °С), характеризующейся высокими значениями температурного коэффициента линейного расширения, ухудшающими термостойкость материала. Подобное явление, по нашему мнению, связано со сбалансированным содержанием железосодержащих компонентов, оксидов щелочных и щелочноземельных металлов в указанном сырье. Такое соотношение компонентов способствует формированию некоторого количества вязкого стекловидного расплава, поглощающего избыточное количество SiO<sub>2</sub>, не вступившего в реакцию с другими кордиеритобразующими оксидами, в то время как в каолиновом сырье содержание таких примесных соединений ограничено. Что же касается белорусского глинистого сырья, то можно отметить следующее: при использовании легкоплавких и тугоплавких глин (за исключением глины месторождения Крупейский Сад) в продуктах синтеза не фиксировался кристобалит во всем интервале исследуемых температур. Несмотря на то что глинистое сырье месторождений Республики Беларусь характеризуется наличием значительного количества кварца (в том числе аморфного), в термостойкой керамике кристобалит не формируется. Вероятнее всего, что при повышении температуры синтеза в случае использования легкоплавких и тугоплавких глин происходит существенное нарастание стекловидной фазы, приводящее к растворению значительной доли SiO<sub>2</sub>, в особенности его химически активной части (аморфной составляющей). Глинистое сырье месторождения Крупейский Сад характеризуется довольно сложным минеральным составом с избыточным содержанием кварцевой составляющей, наличием значительного количества мотмориллонита, а также присутствием каолинита и монотермита. Использование глин указанного месторождения в качестве компонента керамических масс позволяет получить термостойкий кордиеритовый материал, однако в продуктах синтеза даже при максимальной температуре обжига фиксируется некоторое количество кристобалита. Основные характеристики образцов керамики, полученных с использованием различного глинистого сырья, приведены в табл. 3.

Таблица 3

Сравнительные характеристики образцов термостойкой керамики, синтезированных на основе различного глинистого сырья

Свойства материала	Показатель свойств		
	1200 °С	1250 °С	1300 °С
1	2	3	4
Керамика, полученная с использованием каолина месторождения Глуховецкого (обогащенного) (Украина)			
Водопоглощение (ГОСТ 2409–2014), %	17,5–24,5	15,1–23,1	12,5–19,5
Кажущаяся плотность (ГОСТ 2409–2014), кг/м <sup>3</sup>	1680–1890	1720–1970	1820–2010
ТКЛР (ГОСТ 27180–2019), α·10 <sup>-6</sup> К <sup>-1</sup>	4,3–8,8	3,2–5,9	2,2–4,0
Фазовый состав при 1300 °С	Кордиерит, муллит, кристобалит, α-кварц, энстатит, корунд		
Керамика, полученная с использованием огнеупорной глины месторождений Веселовского и Новорайского (Украина)			
Водопоглощение (ГОСТ 2409–2014), %	15,7–17,3	14,8–15,1	13,1–14,3
Кажущаяся плотность (ГОСТ 2409–2014), кг/м <sup>3</sup>	1920–1925	1971–1975	2010–2025
ТКЛР (ГОСТ 27180–2019), α·10 <sup>-6</sup> К <sup>-1</sup>	4,21–4,32	3,10–3,32	2,34–2,46
Фазовый состав при 1300 °С	Индиалит (высокотемпературная модификация кордиерита), муллит, энстатит		
Керамика, полученная с использованием огнеупорной глины месторождения Боровичи (Российская Федерация)			
Водопоглощение (ГОСТ 2409–2014), %	15,3–17,0	14,2–14,7	12,2–13,4
Кажущаяся плотность (ГОСТ 2409–2014), кг/м <sup>3</sup>	1921–1923	1987–1990	1997–2009
ТКЛР (ГОСТ 27180–2019), α·10 <sup>-6</sup> К <sup>-1</sup>	4,33–3,44	3,56–3,74	2,76–3,10
Фазовый состав при 1300 °С	Индиалит (высокотемпературная модификация кордиерита), муллит, энстатит		

Окончание таблицы 3

1	2	3	4
Керамика, полученная с использованием каолинов месторождений Дедовка и Ситница (Республика Беларусь)			
Водопоглощение (ГОСТ 2409–2014), %	20,3–29,7	17,7–26,2	15,9–25,6
Кажущаяся плотность (ГОСТ 2409–2014), кг/м <sup>3</sup>	1584–1897	1602–1912	1678–2021
ТКЛР (ГОСТ 27180–2019), $\alpha \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$	5,43–7,51	4,87–7,79	4,63–7,68
Фазовый состав при 1300 °С	Кордиерит, муллит, шпинель, кристобалит, $\alpha$ -кварц, энстатит, корунд		
Керамика, полученная с использованием тугоплавкой глины месторождения Крупейский Сад (РБ)			
Водопоглощение (ГОСТ 2409–2014), %	23,9–24,4	22,5–22,8	17,5–18,1
Кажущаяся плотность (ГОСТ 2409–2014), кг/м <sup>3</sup>	1746–1760	1781–1793	1882–1888
ТКЛР (ГОСТ 27180–2019), $\alpha \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$	8,48–8,49	9,41–9,43	1,63–2,54
Фазовый состав при 1300 °С	Кордиерит, индиалит (высокотемпературная модификация кордиерита), муллит, энстатит, кристобалит, корунд		
Керамика, полученная с использованием тугоплавкой глины месторождения Городного (Республика Беларусь)			
Водопоглощение (ГОСТ 2409–2014), %	33,4–33,6	31,2–31,5	29,9–30,1
Кажущаяся плотность (ГОСТ 2409–2014), кг/м <sup>3</sup>	1643–1651	1667–1685	1718–1738
ТКЛР (ГОСТ 27180–2019), $\alpha \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$	5,91–5,98	4,96–5,02	3,68–3,75
Фазовый состав при 1300 °С	Кордиерит, индиалит (высокотемпературная модификация кордиерита), муллит, энстатит, корунд		
Керамика, полученная с использованием тугоплавкой глины месторождения Туровского (Республика Беларусь)			
Водопоглощение (ГОСТ 2409–2014), %	18,3–18,6	16,7–16,9	15,0–15,2
Кажущаяся плотность (ГОСТ 2409–2014), кг/м <sup>3</sup>	1730–1747	1783–1796	1814–1820
ТКЛР (ГОСТ 27180–2019), $\alpha \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$	5,28–5,37	4,36–4,48	3,20–3,26
Фазовый состав при 1300 °С	Кордиерит, индиалит (высокотемпературная модификация кордиерита), муллит, энстатит, корунд		
Керамика, полученная с использованием легкоплавкой глины месторождения Гайдуковка (Республика Беларусь)			
Водопоглощение (ГОСТ 2409–2014), %	9,8–10,1	6,5–6,7	2,7–3,0
Кажущаяся плотность (ГОСТ 2409–2014), кг/м <sup>3</sup>	1910–1920	2140–2160	2370–2490
ТКЛР (ГОСТ 27180–2019), $\alpha \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$	2,61–2,63	2,22–2,31	2,10–2,21
Фазовый состав при 1300 °С	Индиалит (высокотемпературная модификация кордиерита), муллит, шпинель, энстатит, корунд		
Керамика, полученная с использованием легкоплавкой глины месторождения Лукомль (Республика Беларусь)			
Водопоглощение (ГОСТ 2409–2014), %	3,9–4,1	Пережог	Пережог
Кажущаяся плотность (ГОСТ 2409–2014), кг/м <sup>3</sup>	2119–2122		
ТКЛР (ГОСТ 27180–2019), $\alpha \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$	3,0–3,1		
Фазовый состав при 1200 °С	Индиалит (высокотемпературная модификация кордиерита), муллит, шпинель, энстатит, корунд		

**Выводы**

На основании полученных данных можно сделать выводы о возможности применения белорусского глинистого сырья для получения термостойких керамических материалов, при этом следует учитывать специфику эксплуатации керамических материалов на основе указанных компонентов, в особенности при использовании легкоплавких глин (некоторое снижение температуры эксплуатации).

На основе разработанных рецептов керамических масс (глины месторождения Крупейский Сад) и предлагаемых технологических режимов получения керамики были изготовлены термостойкие изделия в виде керамических втулок для конструкции индукционных печей, применяющиеся в ОАО «ТРЕСТ ШАХТОСПЕЦСТРОЙ» для термообработки металлических изделий. В настоящий момент керамические изделия эксплуатируются без каких-либо нареканий со стороны заказчика.

На основании полученных экспериментальных данных в условиях производственного унитарного предприятия «Лоевский комбинат строительных материалов» ведутся работы по организации участка по выпуску термостойких кордиеритовых изделий.

### Список источников

1. Полезные ископаемые Белоруссии: К 75-летию БелНИГРИ / Л. Ф. Ажгиревич [и др.]. Минск: Адукацыя і выхаванне, 2002. 528 с.
2. Махнач А. А. Введение в геологию Беларуси. Минск: Ин-т геол. Наук НАН Беларуси, 2004. 198 с.
3. Основы геологии Беларуси / А. С. Махнач [и др.]. Минск: Ин-т геол. Наук НАН Беларуси, 2004. 392 с.
4. Перспективы использования глинистого сырья месторождения «Крупейский сад» для получения термостойких керамических изделий / Р.Ю. Попов [и др.] // Стекло и керамика. 2021. № 9. С. 24–32.
5. Thermal and deformative characteristics of kaolin raw deposits of the republic of Belarus / О. А. Sergievich [et al.] // Engineering structures and technologies. 2015. No 7 (2). P. 93–98.
6. Авакумов Г. Н., Гусев А. А. Кордиерит — перспективный керамический материал. Новосибирск: Наука, 1999. 167 с.
7. Cordierite obtained from compositions containing kaolin waste, talc and magnesium oxide / Е. Р. de Almeida [et al.] // Ceramics International. 2018. Vol. 44, Iss. 2. P. 1719–1725.
8. Application of surfactant-modified cordierite-based catalysts in denitration process / Z. Lei [et al.] // Fuel. 2020. Vol. 268. P. 11.
9. Балкевич В. Л. Техническая керамика. М.: Стройиздат, 1984. 256 с.
10. Павлов В. Ф., Алексеева Л. Л., Митрохин В. С. Исследование процесса образования кордиерита из низкотемпературных масс при скоростном обжиге // Стекло и керамика. 1976. № 9. С. 21–23.
11. Павлов В. Ф., Алексеева Л. Л., Митрохин В. С. Низкотемпературная кордиеритовая керамика скоростного режима обжига // Стекло и керамика. 1975. № 10. 18 с.
12. Низкотемпературный синтез кордиеритовой фазы в керамических массах из природного сырья / Т. А. Хабас [и др.] // Огнеупоры и техническая керамика. 2002. № 10. С. 42–46.
13. Шихта для получения кордиеритовой керамики: пат. 2458886 Рос. Федерация. № 2010150250/03 / Лебедева Г. А., Попова Т. В., Ильина В. П., Щипцов В. В.; заявл. 07.12.2010; опубл. 20.08.2012. 5 с.
14. Логвинков С. М., Семченко Г. Д., Кобызева Д. А. Влияние периодических реакций в системе  $MgO-Al_2O_3-SiO_2$  на фазовый состав и свойства кордиеритсодержащих материалов // Огнеупоры. 2001. № 6. С. 16–22.
15. Состав шихты для изготовления кордиеритовой керамики: пат. 8183 РБ. № а20040151 / Терещенко И. М., Попов Р. Ю.; заявл. 01.03.2004; опубл. 30.09.2005. 5 с.
16. Терещенко И. М., Попов Р. Ю. Влияние глин, содержащих гидрослюдистый компонент, на технологию получения термически стойкой керамики на основе природного сырья // Научные основы химии и технологии переработки комплексного сырья и синтеза на его основе функциональных материалов: материалы Всерос. науч.-техн. конф. с междунар. участием, Апатиты, 8–11 апр. 2008 г. / Кольский науч., центр РАН. Апатиты, 2008. С. 211–214.
17. Терещенко И. М., Попов Р. Ю., Кравчук А. П. О возможности использования импортозамещающей технологии производства термостойких материалов // Строительная наука и техника. 2009. № 2. С. 81–85.
18. Использование нетрадиционных сырьевых материалов для получения термостойкой керамики / И. М. Терещенко [и др.] // Стекло и керамика. 2009. № 4. С. 14–16.
19. Состав шихты для получения кордиеритовой керамики: пат. 16163 РБ. № а20110004 / Дятлова Е. М., Подболотов К. Б., Какошко Е. С., Шишканова Л. Г.; заявл. 03.01.2011; опубл. 03.08.2012. 5 с.
20. Шихта для получения кордиеритовой керамики: пат. 2494995 Рос. Федерация. № 2011103506/03 / Стущенко Н. В.; заявл. 02.02.2011; опубл. 10.10.2013. 1 с.
21. Попов Р. Ю. Термостойкие керамические кордиеритсодержащие материалы с пониженной температурой спекания: дис. ... канд. техн. наук: 05.17.11: утв. 28.09.2011. Минск, 2011. 180 с.
22. Салычиц О. И., Дятлова Е. М. Влияние оксидов железа (II) и стронция на структуру и свойства магнийаломосиликатной керамики // Весці Нац. Акад. навук Беларусь. Сер. хімічных навук. 2007. № 3. С. 104–107.
23. Дятлова Е. М., Миненкова Г. Я., Колонтаева Т. В. Интенсификация спекания муллит-кордиеритовой керамики с применением минерализаторов // Стекло и керамика. 2000. № 12. 21 с.
24. Shi Z. M., Liang K. M., Gu S. R. Effects of  $CeO_2$  on phase transformation towards cordierite in  $MgO-Al_2O_3-SiO_2$  system // Journal of Tsinghua University. 2001. Vol. 41, Iss. 10. P. 1–4.
25. Влияние добавок оксидов переходных металлов на прочность, фазовый состав и микроструктуру кордиеритовой керамики / А. А. Гусев [и др.] // Стекло и керамика. 2001. № 1. С. 23–25.
26. Терещенко И. М., Попов Р. Ю. Пути снижения энергоемкости процесса производства кордиеритовых изделий // Весці Нац. Акад. навук Беларусь. Сер. хімічных навук. 2005. № 3. С. 94–97.
27. Терещенко И. М., Попов Р. Ю., Кравчук А. П. Оценка содержания кристаллических фаз в кордиеритсодержащей керамике // Материалы, технологии, инструменты. 2010. Т. 15, № 2. С. 44–52.

## References

1. Azhgirevich L. F., Grishko A. I., Gudak S. P., Gurinovich A. I., Davydov M. N., Dankevich I. V., Dashkevich V. P., Il'kevich G. I., Karpovich N. Ja., Karpuk V. V., Kirichenko N. V., Bambalov N. N., Kisluk V. Z. *Poleznye iskopaemye Belorussii* [Mineral resources of Belarus]. Minsk, Adukacyja i vyhavanne, 2002, 528 p. (In Russ.).
2. Mahnach A. A. *Vvedenie v geologiju Belarusi* [Introduction to the geology of Belarus]. Minsk, In-t geol. Nauk NAN Belarusi, 2004, 198 p. (In Russ.).
3. Mahnach A. S., Gareckij R. G., Najdenkov I. V., Aksamentova N. V., Arhipova A. A., Pap A. M., Veretennikov N. V., Shkuratov V. I., Zinovenko G. V., Abramenko V. I., Piskun L. V., Pushkin V. I., Kruchek S. A. *Osnovy geologii Belarusi* [Fundamentals of the geology of Belarus]. Minsk, In-t geol. Nauk NAN Belarusi, 2004, 392 p. (In Russ.).
4. Popov R. Ju., Gula I. R., Djatlova E. M., Shimanskaja A. N., Bogdan E. O., Kulish I. A. Perspektivy ispol'zovanija glinistogo syr'ja mestorozhdenija "Krupejskij sad" dlja poluchenija termostojkikh keramicheskikh izdelij [Prospects for the use of clay raw materials from the "Krupeysky Sad" deposit for the production of heat-resistant ceramic products]. *Steklo i keramika* [Glass and Ceramics], 2021, No. 9, pp. 24–32. (In Russ.).
5. Sergievich O. A., Popov R. Ju., Djatlova E. M., Sobachevskii A. St. Thermal and deformative characteristics of kaolin raw deposits of the republic of Belarus. *Engineering structures and technologies*, 2015, No. 7 (2), pp. 93–98.
6. Avakumov G. N., Gusev A. A. *Kordierit — perspektivnyj keramicheskij material* [Cordierite is a promising ceramic material]. Novosibirsk, Nauka, 1999, 167 p. (In Russ.).
7. Ester Pires de Almeida, Igor Pereira de Brito, Heber Carlos Ferreira, Helio De L. Lira, Lisiane Santana, Gelmires de Araújo Neves Cordierite obtained from compositions containing kaolin waste, talc and magnesium oxide. *Ceramics International*, 2018, Vol. 44, Iss. 2, pp. 1719–1725.
8. Zhang L., Jia Y., Shu H. Wen X., Luo M., Wang Yu., Xu D. Application of surfactant-modified cordierite-based catalysts in denitration process. *Fuel*, 2020, Vol. 268, p. 11.
9. Balkevich V. L. *Tehnicheskaja keramika* [Technical ceramics]. Moscow, Strojizdat, 1984, 256 p. (In Russ.).
10. Pavlov V. F., Alekseeva L. L., Mitrohin B. C. Issledovanie processa obrazovanija kordierita iz nizkotemperaturnyh mass pri skorostnom obzhige [Investigation of the formation of cordierite from low-temperature masses during high-speed firing]. *Steklo i keramika* [Glass and Ceramics], 1976, No. 9, pp. 21–23. (In Russ.).
11. Pavlov V. F., Alekseeva L. L., Mitrohin B. C. Nizkotemperaturnaja kordieritovaja keramika skorostnogo rezhima obzhiga [Low-temperature cordierite ceramics of high-speed firing]. *Steklo i keramika* [Glass and Ceramics], 1975, No. 10, 18 p. (In Russ.).
12. Habas T. A., Vereshhagin V. I., Vakalova T. V., Kirchanov A. A., Kulikovskaja N. A., Kozhevnikova N. G. Nizkotemperaturnyj sintez kordieritovoj fazy v keramicheskikh massah iz prirodnoho [Low-temperature synthesis of the cordierite phase in ceramic masses from natural raw materials]. *Ogneupory i tehničeskaja keramika* [Refractories and technical ceramics], 2002, No. 10, pp. 42–46. (In Russ.).
13. Lebedeva G. A., Popova T. V., Il'ina V. P., Shhipcov V. V. Shihta dlja poluchenija kordieritovoj keramiki [Charge for production of cordierite ceramics]. Patent Ros. Federacija, No 2458886; zajavitel' Uchrezhdenie Rossijskoj akademii nauk Institut geologii Karel'skogo nauchnogo centra Rossijskoj akademii nauk; zajavka No 2010150250/03; zajavl. 07.12.2010; opubl. 20.08.2012, 5 p.
14. Logvinkov S. M., Semchenko G. D., Kobzyeva D. A. Vlijanie periodicheskikh reakcij v sisteme  $MgO-Al_2O_3-SiO_2$  na fazovyj sostav i svoystva kordieritsoderzhashhih materialov [Influence of Periodic Reactions in the  $MgO-Al_2O_3-SiO_2$  System on the Phase Composition and Properties of Cordierite-Containing Materials]. *Ogneupory* [Refractory Materials], 2001, No. 6, pp. 16–22. (In Russ.).
15. Tereshhenko I. M., Popov R. Ju. Sostav shihty dlja izgotovlenija kordieritovoj keramiki [The composition of the charge for the manufacture of cordierite ceramics]. Patent BY, No 8183; zajavitel' Uchrezhdenie obrazovanija "Belorusskij gosudarstvennyj tehnologičeskij universitet"; zajavka No. a20040151; zajavl. 01.03.2004; opubl. 30.09.2005, 5 p.
16. Tereshhenko I. M., Popov R. Ju. Vlijanie glin, sodержashhih gidroslyudistyj komponent, na tehnologiju poluchenija termicheski stojkoj keramiki na osnove prirodnoho syr'ja [Influence of clays containing a hydromica component on the technology of obtaining thermally resistant ceramics based on natural raw materials]. *Nauchnye osnovy himii i tehnologii pererabotki kompleksnogo syr'ja i sinteza na ego osnove funkcional'nyh materialov: materialy Vseros. nauch.-tehn. konf. s mezhdunar. Uchastiem (Apatity, 8–11 apr. 2008 g.)* [Scientific foundations of chemistry and technology for processing complex raw materials and synthesizing functional materials based on it: materials of Vseros. sci.-tech. conf. with international participation]. Apatity, Publ. Kol'skij nauch. centr RAN, 2008, pp. 211–214. (In Russ.).
17. Tereshhenko I. M., Popov R. Ju., Kravchuk A. P. O vozmozhnosti ispol'zovanija importozameshchajushhej tehnologii proizvodstva termostojkikh materialov [On the possibility of using import-substituting technology for the production of heat-resistant materials]. *Stroitel'naja nauka i tehnika* [Construction science and technology], 2009, No. 2, pp.81–85. (In Russ.).



18. Tereshhenko I. M., Popov R. Ju., Kravchuk A. P., Ivashkevich L. S. Ispol'zovanie netradicionnyh syr'evykh materialov dlja poluchenija termostojkoj keramiki [The use of non-traditional raw materials for the production of heat-resistant ceramics]. *Steklo i keramika* [Glass and Ceramics], 2009, No. 4, pp. 14–16. (In Russ.).
19. Djatlova E. M., Podbolotov K. B., Kakoshko E. S., Shishkanova L. G. Sostav shihty dlja poluchenija kordieritovoj keramiki [The composition of the charge for obtaining cordierite ceramics]. Patent BY, No 16163; zajavitel' Uchrezhdenie obrazovanija "Belorusskij gosudarstvennyj tehnologicheskij universitet"; zajavka No a20110004; zajavl. 03.01.2011; opubl. 03.08.2012, 5 p.
20. Stucenko N. V. Shihta dlja poluchenija kordieritovoj keramiki [Charge for production of cordierite ceramics]. Patent Ros. Federacija, No 2494995; zajavitel' Stucenko N. V.; zajavka No. 2011103506/03; zajavl. 02.02.2011; opubl. 10.10.2013, 1 p.
21. Popov R. Ju. *Termostojkie keramicheskie kordieritsoderzhashhie materialy s ponizhennoj temperaturoj spekanija. Diss. kand. tehn. nauk.* [Heat-resistant ceramic cordierite-containing materials with low sintering temperature. PhD (Engineering) dis.]. Minsk, 2011, 180 p. (In Russ.).
22. Salychic O. I., Djatlova E. M. Vlijanie oksidov zheleza (II) i stroncija na strukturu i svojstva magnijaljumosilikatnoj keramiki [Influence of oxides of iron (II) and strontium on the structure and properties of magnesium aluminosilicate ceramics]. *Vesci Nac. Akad. navuk Belarus'. Ser. himichnyh navuk* [Vesti Nats. Acad. Sciences Belarus. Ser. chemical sciences], 2007, No. 3, pp. 104–107. (In Russ.).
23. Djatlova E. M., Minenkova G. Ja., Kolontaeva T. V. Intensifikacija spekanija mullito-kordieritovoj keramiki s primeneniem mineralizatorov [Intensification of sintering of mullite-cordierite ceramics using mineralizers]. *Steklo i keramika* [Glass and Ceramics], 2000, No. 12, 21 p. (In Russ.).
24. Shi Z. M., Liang K. M., Gu S. R. Effects of CeO<sub>2</sub> on phase transformation towards cordierite in MgO–Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>–SiO<sub>2</sub> system. *Journal of Tsinghua University*, 2001, Vol. 41, Iss. 10, pp. 1–4.
25. Gusev A. A., Avvakumov E. G., Vinokurova O. B., Salostij V. P. Vlijanie dobavok oksidov perehodnyh metallov na prochnost', fazovyj sostav i mikrostrukturu kordieritovoj keramiki [Influence of additives of transition metal oxides on the strength, phase composition and microstructure of cordierite ceramics]. *Steklo i keramika* [Glass and Ceramics], 2001, No. 1, pp. 23–25. (In Russ.).
26. Tereshhenko I. M., Popov R. Ju. Puti snizhenija jenergoemkosti processa proizvodstva kordieritovykh izdelij [Ways to reduce the energy intensity of the production process of cordierite products]. *Vesci Nac. Akad. navuk Belarus'. Ser. himichnyh navuk* [Vesti Nats. Acad. Sciences Belarus. Ser. chemical sciences], 2005, No. 3, pp. 94–97. (In Russ.).
27. Tereshhenko I. M., Popov R. Ju., Kravchuk A. P. Ocenka soderzhanija kristallicheskih faz v kordieritsoderzhashhej keramike [Evaluation of the content of crystalline phases in cordierite-containing ceramics]. *Materialy, tehnologii, instrument* [Materials, technologies, tools], 2010, Vol. 15, No. 2, pp. 44–52. (In Russ.).

#### **Информация об авторах**

**Е. М. Дятлова** — кандидат технических наук, доцент;  
**Ф. И. Пантелеенко** — доктор технических наук, профессор;  
**Р. Ю. Попов** — кандидат технических наук, доцент;  
**А. С. Самсонова** — аспирант.

#### **Information about the authors**

**E. M. Dyatlova** — PhD (Engineering), Associate Professor;  
**F. I. Panteleenko** — Dr. Sc. (Engineering), Professor;  
**R. Yu. Popov** — PhD (Engineering), Associate Professor;  
**A. S. Samsonova** — Graduate Student.

Статья поступила в редакцию 28.01.2023; одобрена после рецензирования 31.01.2023; принята к публикации 01.02.2023.  
The article was submitted 28.01.2023; approved after reviewing 31.01.2023; accepted for publication 01.02.2023.