

# ХИМИЧЕСКАЯ ТЕХНОЛОГИЯ

DOI: 10.34031/2071-7318-2020-5-1-62-69

<sup>1</sup>Череватова А.В., <sup>1,\*</sup>Кожухова Н.И., <sup>1</sup>Осадчая М.С., <sup>1</sup>Жерновская И.В., <sup>2</sup>Кожухова М.И.<sup>1</sup>Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова<sup>2</sup>Университет Висконсин-Милуоки, штат Висконсин

\*E-mail: kozhuhovanata@yandex.ru

## ТЕРМИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ НАНОСТРУКТУРИРОВАННОГО ВЯЖУЩЕГО НА ОСНОВЕ ГРАНИТА

**Аннотация.** Среди основных перспективных направлений в материаловедении и строительной отрасли, на которых сосредоточено значительное количество исследований по всему миру, в первую очередь, могут быть выделены материалы, включающие в себя вторичное или мало востребованное сырье, отходы промышленности, а также композиты, синтезируемые с использованием низкотемпературных и экологически чистых технологий. В рамках данного научного исследования было рассмотрено влияние высокотемпературного воздействия на структурно-фазовые трансформации матрицы гранитного наноструктурированного вяжущего (НВ). В качестве аналитического инструментария, подтверждающего это предположение, были использованы рентгенофазовый (РФА) анализ и дериватографический (ДТА) анализ, а также расчетная оценка объема ячеек кристаллических решеток минеральных фаз. Установлено, что термическое воздействие в диапазоне температур от 20 до 900 °С приводит к минеральным трансформациям ( $\alpha$ - $\beta$  переход кварца), но при этом объемы ячеек кристаллических решеток практически не изменяются.

Термическая обработка гранитного НВ при 1000 °С способствует кристаллизации в системе новой фазы – лейцита  $K[AlSi_2O_6]$ , который является структурным аналогом минерала цеолитовой группы – анальцима  $Na[AlSi_2O_6] \cdot H_2O$ . Данное явление подтверждает структурное родство гранитного НВ и геополимера.

**Ключевые слова:** бесклинкерные вяжущие системы, низкотемпературный синтез, гранитное НВ, геополимер, структурное родство.

**Введение.** Интерес, проявляемый к технологическим процессам, в основе которых лежит получение бесцементных/бесклинкерных силикатных и алюмосиликатных вяжущих систем с применением низкотемпературного способа синтеза имеет место среди ведущих ученых и научно-исследовательских школ в глобальном масштабе. В виду этого данное материаловедческое направление рассматривается как перспективное и, в силу слабой изученности, как поисковое в строительной отрасли [1–6]. Согласно ранее сформулированному определению [7], низкотемпературный синтез неорганических вяжущих веществ включает в себя технологические переделы, которые не предусматривают стадии направленной высокотемпературной трансформации сырьевых компонентов в отдельности или всех в комплексе.

Предполагается, что вяжущие низкотемпературного синтеза должны обладать структурообразующими механизмами, отличными от гидратационных. В наибольшей степени этому соответствуют силикатные и алюмосиликатные вяжущие поликондесационно-полимеризационного типа твердения с существенной функциональной и структурообразующей ролью наноразмерной компоненты – наноструктурированные вяжущие и геополимеры [7, 8]. Оба типа относятся к бесклинкерным вяжущим системам, но

отличаются основными стадиями технологического процесса. Технология синтеза геополимеров подразумевает затворение алюмосиликатного компонента (преимущественно состоящего из аморфной фазы) щелочным активатором с последующей выдержкой до образования щелочеолюмосиликатного геля и термической сушкой твердеющего сырца [9–11].

Технология получения наноструктурированных вяжущих (НВ) основана на реализации низкотемпературного механохимического процесса в воде (мокрый помол), без вредных побочных продуктов. Это дает право говорить о реализации «зеленой» технологии.

Особенности синтеза НВ, которое характеризуется негидратационным механизмом твердения, дают возможность к использованию широкого спектра сырьевых материалов преимущественно силикатного и алюмосиликатного состава, которые являются довольно доступными. Это преимущество позволяет адаптировать технологию синтеза вяжущего к различным регионам, в зависимости от локализации месторождений.

В ранее проведенных исследованиях [12–14] установлена принципиальная возможность получения НВ на основе кремнеземсодержащих и алюмосиликатных пород различного генезиса

(кварцевые пески, кварцитопесчаники, кварциты, перлит, цеолитизированные туфы).

Задачами настоящей работы являются: доказательство геополимеризационного типа твердения гранитного НВ и обоснование его термостойчивости.

### Химический состав гранитного отсева

SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	SO <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	п.п.п.	Сумма
69,2	15,7	3,35	3,14	0,89	0,09	2,06	4,29	0,75	99,47

**Методы.** Определение минерально-фазового состава гранитного НВ проводилось методом РФА (XRD).

Рентгенограммы образцов были получены на дифрактометре STOE STADI (STOE & Cie GmbH, Германия) на излучении медного анода.

Рентгенометрическая диагностика минеральных фаз проведена на основании дифракционной базы банных PDF-2 с применением программы Crystallographica SearchMatch v 2,0,2,0 (Oxford Cryosystems).

Количественное определение концентраций кристаллических минеральных образований (содержание аморфной фазы не определялось) выполнено полнопрофильным РФА с применением

### Материалы и методы.

**Материалы.** В качестве исходного сырья для получения вяжущего использовался гранитный отсев Полтавского месторождения (Гереевский карьер, Украина).

Химический состав гранитного отсева приведен в таблице 1.

Таблица 1

программы DDM v.1.95d в варианте Derivative Difference Minimization алгоритма [15].

### Экспериментальная часть

Полученные на основе рентгенофазового анализа данные позволяют свидетельствовать о том, что минеральный состав гранитного НВ представлен породообразующими минералами гранита – α-кварцем, Са-альбитом и биотитом. Кроме этого, в его составе обнаружен корунд (результат намола мелющих тел). Результат количественного XRD-анализа кристаллических компонентов исходного гранитного НВ представлен на рис. 1.

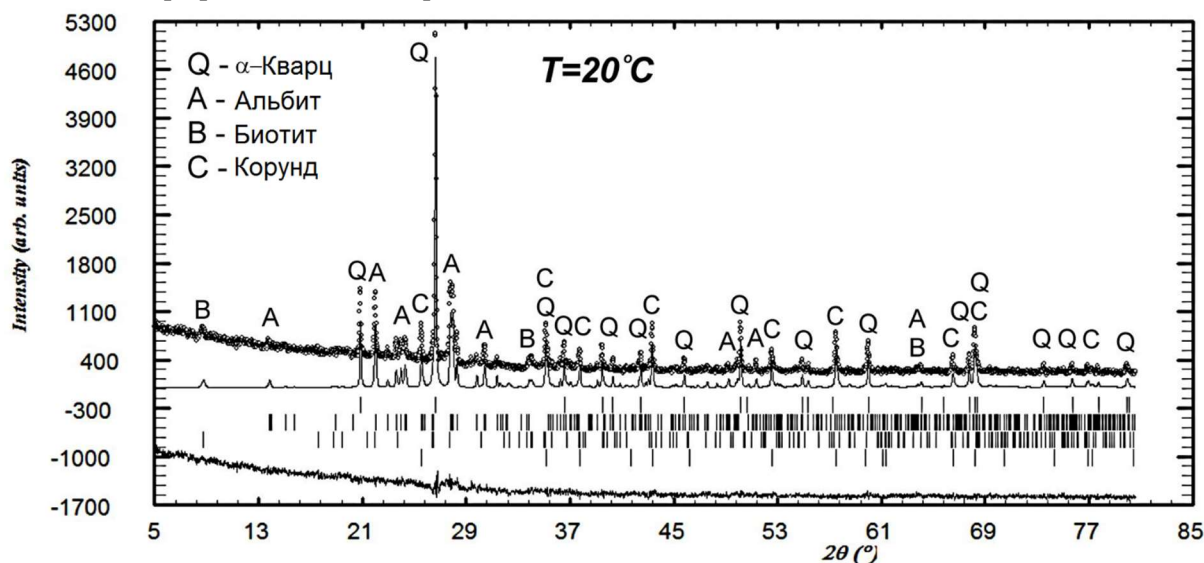


Рис. 1. Количественный минеральный состав гранитного НВ, вес.%

Способ доказательства геополимеризационного типа твердения гранитного НВ основан на предположении о двухфазном составе вяжущего – кристаллической компоненты и аморфной. Аморфная компонента (алюмосиликатный щелочесодержащий гель) является результатом механохимических процессов растворения породообразующих минералов гранита – кварца и полевых шпатов. Принято считать, что алюмосиликатный щелочесодержащий гель

имеет цеолитоподобную структуру, и при кристаллизации геля должны образовываться цеолитоподобные минералы, формирование которых будет является доказательством геополимеризационной природы вяжущего.

Для решения этой задачи выполнено изучение гранитного НВ методом ДТА-анализа на приборе синхронного термического анализа STA 449 F1 Jupiter® фирмы NETZSCH (Германия) в интервале температур от комнатной до 1000 °C (рис. 2).

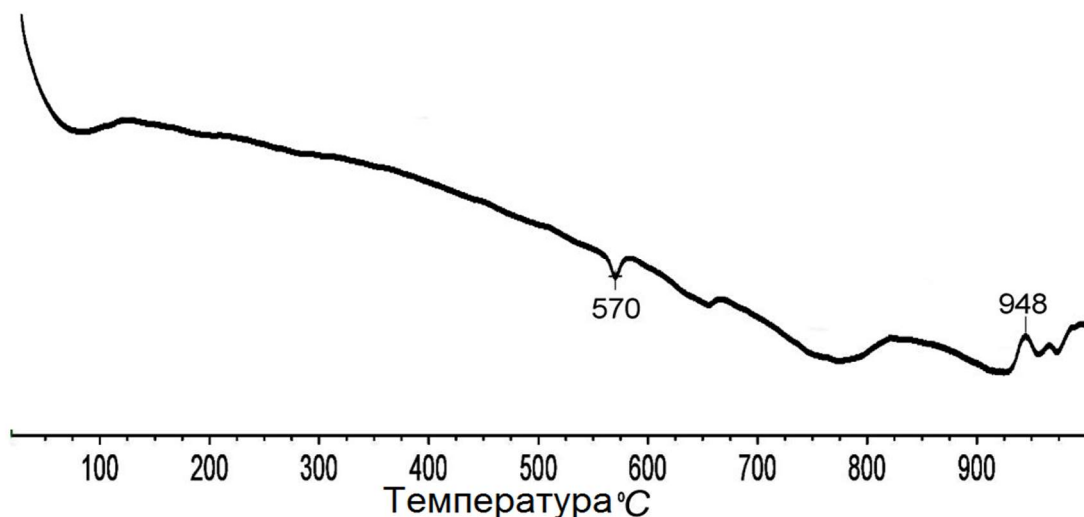


Рис. 2. Кривая ДТА гранитного вяжущего

На кривой ДТА-анализа зафиксирован пик эндоэффекта при 570 °С, что соответствует фазовому  $\alpha$ - $\beta$  переходу кварца, и пик экзоэффекта при 948 °С.

Для определения принадлежности пика экзоэффекта при 948 °С новообразованной кристаллической компоненте и детализации представлений о термической устойчивости наноструктурированного вяжущего на основе гранита проведена высокотемпературная дифрактометрия образцов вяжущего при температурах 600, 900 и 1000 °С с часовой стабилизационной выдержкой на каждой ступени нагрева. Высокотемпературная дифрактометрия проводилась с использованием высокотемпературной приставки фирмы Stoe, позволяющей проводить рентгеновские исследования в диапазоне температур от 25 до 1500 °С.

Следует отметить присутствие на высокотемпературных рентгенограммах гранитного НВ паразитных отражений от Pt-Rh термодпары, находящейся в непосредственной близости от препарата. Несмотря на то, что эти отражения не относились к объекту исследования, Pt-Rh фаза была включена в расчет весовых концентраций кристаллических компонентов вяжущего для большей объективности оценки достоверности количественного рентгенофазового анализа.

Результаты расчетов высокотемпературных рентгенограмм приведены на рис. 3.

Минеральный состав кристаллических компонентов вяжущего при высоких температурах – 600 °С и 900 °С не отличается от минерального состава при комнатной температуре (за исключением изменения полиморфной модификации кварца).

При этом, как следовало из результатов ДТА-кривой гранитного НВ, присутствие пика

экзоэффекта при 948 °С (рис. 2), изменение минерального состава было зафиксировано на рентгенограмме, снятой при 1000 °С (рис. 3). Отражения новой фазы были отнесены к минеральному образованию лейцита ( $K[AlSi_2O_6]$ ) – структурному аналогу цеолита анальцима ( $Na[AlSi_2O_6] \cdot H_2O$ ). Данное явление подтверждает структурное родство гранитного НВ и геополимера, где в составе структурообразующих фаз также присутствуют минералы цеолитовой группы.

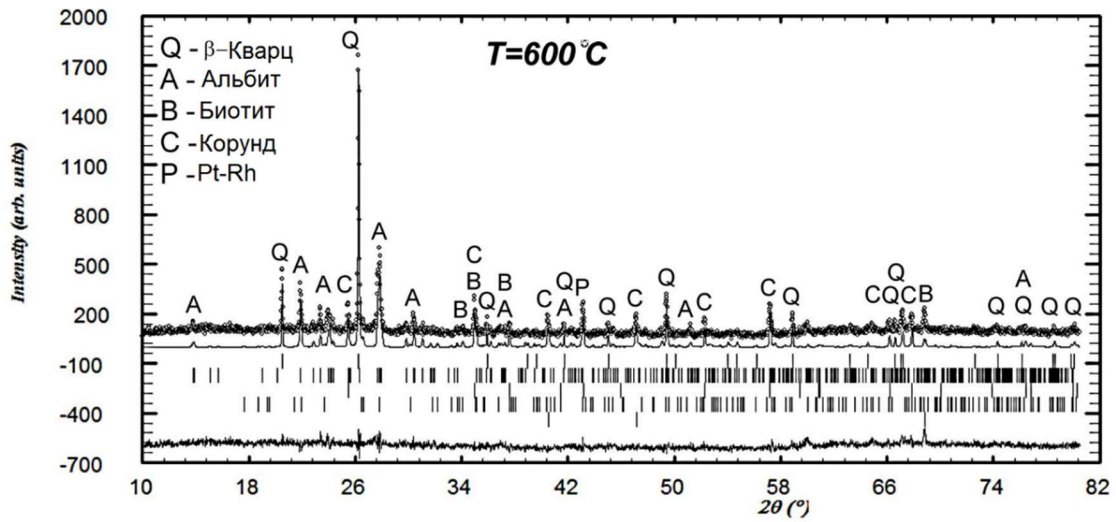
Таким образом, кристаллизация из алюмосиликатного щелочесодержащего геля цеолитоподобного лейцита можно считать доказательством геополимеризационной природы гранитного НВ.

Для обоснования термоустойчивости гранитного НВ целесообразно провести оценку изменения величины удельного объема элементарных ячеек кристаллических компонентов гранитного НВ. Для этого приведен количественный минеральный состав гранитного НВ (исключив из составов влияние Pt-Rh термодпары и выполнив нормировку полученных концентраций к 100 %). Результаты этой операции приведены в таблице 2.

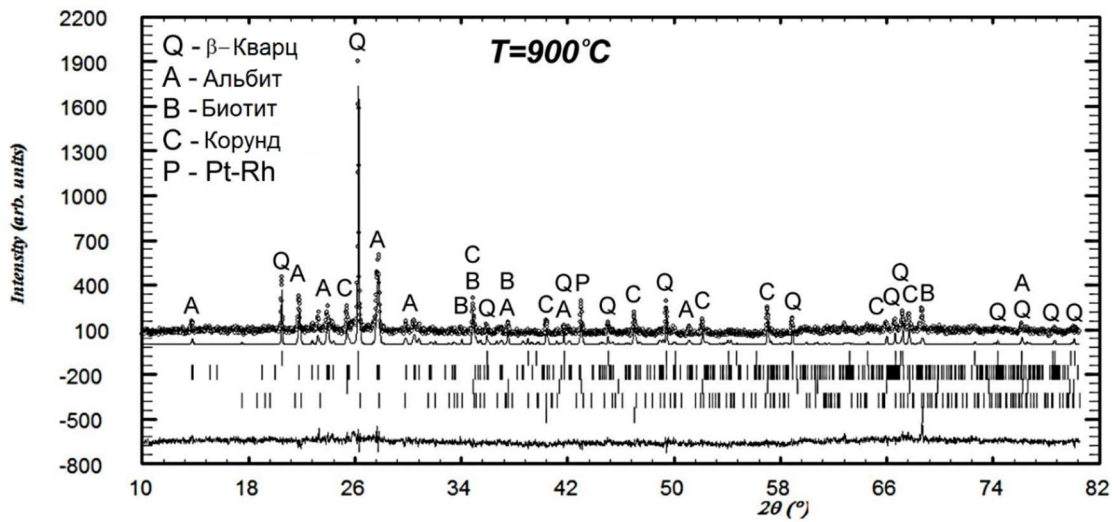
В таблице 3 приведены величины объемов элементарных ячеек минеральных компонентов гранитного НВ, полученные на основании расчетов рентгенограмм, а также величины удельного объема элементарных ячеек (формула 1):

$$V_{\text{удельн.}} = \sum_i C_i \cdot V_i^{\text{Элем.яч.}} \quad (1)$$

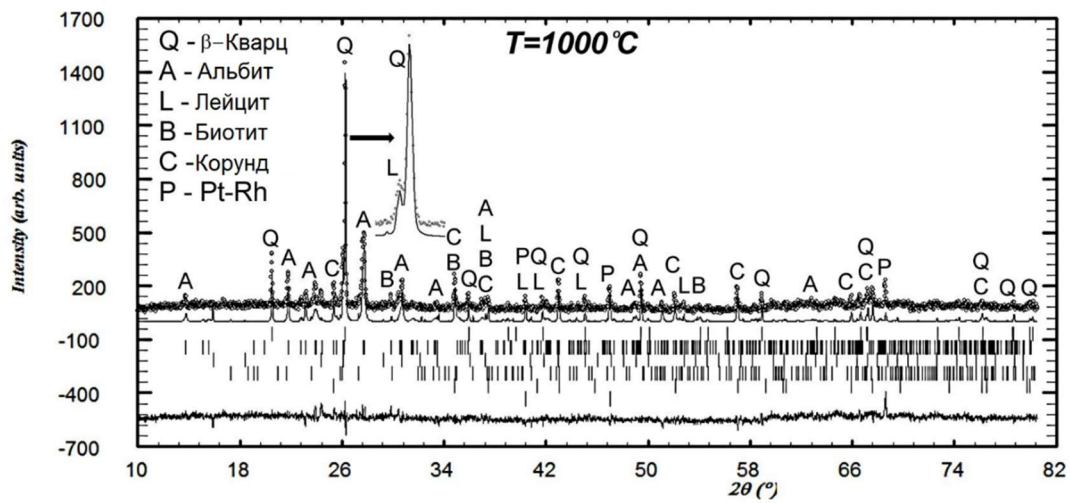
где  $C_i$  – массовые концентрации минеральных фаз вяжущего.



а



б



в

Рис. 3. Количественный минеральный состав гранитного НВ при различных температурах, вес. %.:  
а) 600, б) 900 и в) 1000 °C

Таблица 2

## Минеральный состав гранитного НВ

Минеральные фазы, вес.%					
T °C	Кварц	Альбит	Биотит	Корунд	Лейцит
20	28,98 ± 0,94	46,94 ± 0,91	5,41 ± 0,94	18,67 ± 0,8	–
600	26,86 ± 0,89	48,74 ± 1,11	5,74 ± 0,85	18,65 ± 0,97	–
900	26,04 ± 0,73	49,21 ± 1,27	5,29 ± 0,97	19,46 ± 0,73	–
1000	25,47 ± 0,46	49,17 ± 1,51	2,97 ± 0,77	17,91 ± 0,75	4,39 ± 0,70

Таблица 3

Объемы элементарных ячеек, Å<sup>3</sup>

T °C	Кварц	Альбит	Биотит	Корунд	Лейцит	V <sub>удельн.</sub>
20	112,759	665,41	516,2	254,52	–	420,466
600	117,923	674,13	515,6	258,09	–	437,967
900	117,835	680,5	521,8	260,06	–	443,770
1000	117,684	682,4	534,5	260,72	2535,9	539,421

Согласно данным таблицы 3, обращает на себя внимание аномальное изменение V<sub>э.я.</sub> β-кварца (уменьшение объема элементарной ячейки с увеличением температуры). Следует отметить, что этот феномен типичен для высоко-температурного β-кварца [16].

Как следует из результатов, приведенных в таблице 3, монотонное изменение V<sub>удельн.</sub> вследствие температурного расширения элементарных

ячеек компонентов гранитного НВ происходит до 900 °C. При 1000 °C эта величина резко возрастает из-за кристаллизации лейцита. В качестве количественного показателя изменения удельного объема элементарных ячеек можно использовать отношение V<sub>удельн.</sub> при высокой температуре к V<sub>удельн.</sub> при 20 °C. В результате этих операций получено следующее значение (формула 2):

$$\frac{V_{\text{удельн.}}^{600^{\circ}\text{C}}}{V_{\text{удельн.}}^{20^{\circ}\text{C}}} = 1.042; \quad \frac{V_{\text{удельн.}}^{900^{\circ}\text{C}}}{V_{\text{удельн.}}^{20^{\circ}\text{C}}} = 1.055 \quad \text{и} \quad \frac{V_{\text{удельн.}}^{1000^{\circ}\text{C}}}{V_{\text{удельн.}}^{20^{\circ}\text{C}}} = 1.283 \quad (2)$$

Расчетные величины отношений объемов ячеек кристаллических решеток (формула 2) гранитного НВ согласуются с данными таблицы 3, где соотношение объемов элементарных ячеек вяжущего после температурного воздействия 600 °C и 900 °C к объему ячеек вяжущего без термической обработки (20 °C) ≈ 1, что позволяет говорить о термоустойчивости данной системы в этом диапазоне температур. В тоже время в случае термической обработки НВ при 1000 °C аналогичный показатель составил ≈ 1.3, что позволяет выдвинуть предположение о возможных деструктивных процессах системы в связи с резким увеличением общего объема элементарных ячеек кристаллических решеток вяжущей системы НВ.

**Вывод.** Таким образом, практическое отсутствие (в пределах 5 %) объемного изменения гранитного НВ при 900 °C, позволяет принять эту температуру за величину термоустойчивости гранитного вяжущего.

К этому следует добавить, что экспериментальная оценка термической устойчивости гранитного НВ является темой последующих публикаций.

**Источник финансирования.** Программа развития опорного университета на базе БГТУ им. В.Г. Шухова с использованием оборудования ЦВТ на базе БГТУ им. В.Г. Шухова

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- Muñoz F., Easton T., Dahmen J. Using alkali-activated natural aluminosilicate minerals to produce compressed masonry construction materials // Construction and Building Materials. 2015. Vol. 95. Pp. 86–95
- Kuznetsova E.F., Sobolev G.M., Sobolev K. Self-consolidating green concrete based on metakaolin and aggregate fines // Materials Research Society Symposium. Proceedings. 2014. Vol. 1611. Pp. 75–80.
- Voitovich E.V., Kozhukhova N.I., Cherevatova A.V., Zhernovskiy I.V., Osadchaya M.S. Features of quality control of free of cement binder of non-hydration type // Applied Mechanics and Materials. 2015. Vol. 724. Pp. 39–43.
- Shekhovtsova J., Zhernovskiy I., Kovtun M., Kozhukhova N., Zhernovskaya I., Kearsley E. Estimation of fly ash reactivity for use in alkali-activated cements - A step towards sustainable building

material and waste utilization // Journal of Cleaner Production. 2018. Vol. 178. Pp. 22–33

5. Fengrui Jiang, Laifei Cheng, Yiguang Wang, Xuanxuan Huang Calcium–magnesium aluminosilicate corrosion of barium–strontium aluminosilicates with different strontium content // Ceramics International. 2017. Vol. 43. Issue 1. Part A. Pp. 212–221

6. Череватова А.В., Жерновский И.В., Строкова В.В. Минеральные наноструктурированные вяжущие. Природа, технология и перспективы применения. KG. Saarbrücken: LAM LAMBERT Academic Publishing GmbH & Co, 2011. 170 с.

7. Davidovitz J. Geopolymer. Chemistry and applications. Saint-Quentin: Institute Geopolymer, 2008. 592 p.

8. Davidovits J. Geopolymer chemistry and properties // Proceedings of the 1<sup>st</sup> International Conference on Geopolymer. 1988. Vol. 1. Pp. 25–48

9. Davidovits J. Chemistry of geopolymeric systems, terminology // Geopolymere '99. International Conference. Saint-Quentin, France, 1999. Pp. 9–40.

10. Кожухова Н.И., Строкова В.В., Кожухова М.И., Жерновский И.В. Структурообразование в щелочеактивированных алюмосиликатных вяжущих системах с использованием природного сырья различной кристалличности // Строительные материалы и изделия. 2018. Т. 1. №4. С. 38–43.

11. Barbosa V.F.F., MacKenzie K.J.D., Thaumaturgo C. Synthesis and characterisation of materials based on inorganic polymers of alumina and silica: sodium polysialate polymers // International Journal of Inorganic Materials. 2000. Vol. 2. № 4. Pp. 309–317.

12. Strokova V.V., Cherevatova A.V., Pavlenko N.V., Nelubova V.V. Prospects of application of zero-cement binders of a hydration hardening type // World Applied Sciences Journal. 2013. Т. 25. № 1. Pp. 119–123

13. Kozhuhova N.I., Zhernovskiy I.V., Osadchaya M.S., Strokova V.V., Tchizhov R.V. Revisiting a selection of natural and technogenic raw materials for geopolymer binders // International Journal of Applied Engineering Research (IJAER). 2014. Vol. 9. Pp. 16945–16955.

14. Череватова А.В., Кожухова Н.И., Осадчая М.С., Жерновский И.В. Особенности реотехнологических свойств наноструктурированного алюмосиликатного вяжущего в присутствии комплексных модификаторов различной природы // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2016. № 9. С. 36–39

15. Solovyov L.A. Full-profile refinement by derivative difference minimization // Journal of Applied Crystallography. 2004. 37. Pp. 743–749.

16. Kihara K. An X-ray study of the temperature dependence of the quartz structure // European Journal of Mineralogy. 1990. Vol. 2. Pp. 63–77.

#### Информация об авторах

**Череватова Алла Васильевна**, доктор технических наук, профессор кафедры Технология стекла и керамики. E-mail: cherry\_611@mail.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

**Кожухова Наталья Ивановна**, кандидат технических наук, доцент кафедры материаловедения и технологии материалов. E-mail: kozhuhovanata@yandex.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

**Осадчая Майя Сергеевна**, инженер. E-mail: мус87@mail.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

**Жерновская Ирина Васильевна**, старший преподаватель кафедры высшей математики. E-mail: ziv\_1111@mail.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

**Кожухова Марина Ивановна**, кандидат технических наук, научный сотрудник кафедры гражданского строительства и охраны окружающей среды, Школа инжиниринга и прикладных наук, инженер кафедры материаловедения и технологии материалов. E-mail: kozhuhovamarina@yandex.ru. Университет Висконсин-Милуоки, штат Висконсин. P.O. Box 413, Милуоки, WI 53201, США. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

---

Поступила в январе 2020 г.

© Череватова А.В., Кожухова Н.И., Осадчая М.С., Жерновская И.В., Кожухова М.И., 2020



<sup>1</sup>Cherevatova A.V., <sup>1,\*</sup>Kozhukhova N.I., <sup>1</sup>Osadchaya M.S., <sup>1</sup>Zhernovskaya I.V.,  
<sup>2</sup>Kozhukhova M.I.

<sup>1</sup>Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov

<sup>2</sup>University of Wisconsin-Milwaukee

\*E-mail: kozhuhovanata@yandex.ru

## THERMAL CHARACTERISTICS OF GRANITE-BASED NANOSTRUCTURED BINDERS

**Abstract.** Among the main promising research areas in materials science and construction industry, where a significant amount of studies is concentrated in the world, it is, primarily, the materials those contain a secondary or low-demand raw materials, industrial wastes. As well as it can be composites synthesized using low-temperature and environmentally friendly technologies. In this study, the influence of high-temperature effects on the structural phase transformations in matrix of granite-based nanostructured binder (NB) was considered. As an analytical tool, confirming this assumption, X-ray phase (XRD) analysis and derivative (DTA) analysis, as well as a calculated estimate of the volume of the cells of the crystal lattices of the mineral phases were applied. It was established that thermal exposure in the temperature range from 20 to 900 °C leads to mineral transformations ( $\alpha$ - $\beta$  transition of quartz) in granite-based NB, but the cell volumes changing of the crystal lattices was not found.

Thermal exposure of granite-based NB at 1000 °C initiates a new crystal phase formation – Leucite  $K[AlSi_2O_6]$ , that is structurally identical to zeolite-type mineral such as Analcime  $Na[AlSi_2O_6] \cdot H_2O$ . This phenomenon confirms a structural affinity of between granite-based NB and geopolymer.

**Keywords:** free-of-clinker binding systems, low-temperature synthesis, granite-based NB, geopolymer, structural affinity

### REFERENCES

- Muñoz F., Easton T., Dahmen J. Using alkali-activated natural aluminosilicate minerals to produce compressed masonry construction materials. *Construction and Building Materials*. 2015. Vol. 95. Pp. 86–95.
- Kuznetsova E.F., Sobolev G.M., Sobolev K. Self-consolidating green concrete based on metakaolin and aggregate fines. *Materials Research Society Symposium. Proceedings*. 2014. Vol. 1611. Pp. 75–80.
- Voitovich E.V., Kozhukhova N.I., Cherevatova A.V., Zhernovsky I.V., Osadchaya M.S. Features of quality control of free of cement binder of non-hydration type. *Applied Mechanics and Materials*. 2015. Vol. 724. Pp. 39–43.
- Shekhovtsova J., Zhernovsky I., Kovtun M., Kozhukhova N., Zhernovskaya I., Kearsley E. Estimation of fly ash reactivity for use in alkali-activated cements - A step towards sustainable building material and waste utilization. *Journal of Cleaner Production*. 2018. Vol. 178. Pp. 22–33.
- Fengrui Jiang, Laifei Cheng, Yiguang Wang, Xuanxuan Huang Calcium–magnesium aluminosilicate corrosion of barium–strontium aluminosilicates with different strontium content. *Ceramics International*. 2017. Vol. 43. Issue 1. Part A. Pp. 212–221
- Cherevatova A.V., Zhernovsky I.V., Strokova V.V. Mineral nanostructured binders. Origin, technology and perspectives of application [Mineralnye nanostrukturirovannye vyazhushchie. Priroda, tehnologia i perspektivy primeneniya]. KG. Saarbrücken: LAM LAMBERT Academic Publishing GmbH & Co, 2011. 170 p. (rus)
- Davidovitz J. *Geopolymer. Chemistry and applications*. Saint-Quentin: Institute Geopolymer, 2008. 592 p.
- Davidovits J. *Geopolymer chemistry and properties. Proceedings of the 1<sup>st</sup> International Conference on Geopolymer*. 1988. Vol. 1. Pp. 25–48.
- Davidovits J. *Chemistry of geopolymeric systems, terminology. Geopolymere '99. International Conference, Saint-Quentin, France, 1999*. Pp. 9–40.
- Kozhukhova N.I., Strokova V.V., Kozhukhova M.I., Zhernovsky I.V. Structure formation in alkali activated aluminosilicate binding systems using natural raw materials with different crystallinity degree [Strukturoobrazovanie v shelocheaktivirovannykh aluminosilikatnykh vyazhushchikh sistemakh s ispolzovaniem syryia razlichnoy kristallichnosti]. *Construction Materials and Products*. 2018. Vol. 1. Issue 4. Pp. 38–43. (rus)
- Barbosa V.F.F., MacKenzie K.J.D., Thaumaturgo C. Synthesis and characterisation of materials based on inorganic polymers of alumina and silica: sodium polysialate polymers. *International Journal of Inorganic Materials*. 2000. Vol. 2. No 4. Pp. 309–317.
- Strokova V.V., Cherevatova A.V., Pavlenko N.V., Nelubova V.V. Prospects of application of zero-cement binders of a hydration hardening type. *World Applied Sciences Journal*. 2013. Vol. 25. No 1. Pp. 119–123

13. Kozhuhova N.I., Zhernovskiy I.V., Osadchaya M.S., Strokova V.V., Tchizhov R.V. Revisiting a selection of natural and technogenic raw materials for geopolymer binders. *International Journal of Applied Engineering Research (IJAEER)*. 2014. Vol. 9. Pp. 16945–16955.

14. Cherevatova A.V., Kozhukhova N.I., Osadchaya M.S., Zhernovskiy I.V. Features of rheological properties of nanostructured aluminosilicate binder containing complex modifiers of different origin [Osobennosti reotekhnologicheskikh svoistv

nanostrukturirovannogo aluminosilikatnogo vyazhushchego v prisutstvii kompleksnykh modifikatorov razlichnoy prirody]. *Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov*. 2016. No 9. Pp. 36–39. (rus)

15. Solovyov L.A. Full-profile refinement by derivative difference minimization. *Journal of Applied Crystallography*. 2004. Vol. 37. Pp. 743–749.

16. Kihara K. An X-ray study of the temperature dependence of the quartz structure. *European Journal of Mineralogy*. 1990. Vol. 2. Pp. 63–77.

#### *Information about the authors*

**Cherevatova, Alla V.** DSc, Professor. E-mail: cherry\_611@mail.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, Kostukov St., 46

**Kozhukhova, Natalia I.** PhD, Assistant professor. E-mail: kozhuhovanata@yandex.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, Kostukov St., 46.

**Osadchaya, Maya S.** Engineer. E-mail: myc87@mail.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, Kostukov St., 46.

**Zhernovskaya, Irina V.** Senior lecturer. E-mail: ziv\_1111@mail.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, Kostukov St., 46.

**Kozhukhova, Marina I.** PhD, Post-Doctoral Associate. E-mail: kozhuhovamarina@yandex.ru. University of Wisconsin-Milwaukee. 3200 N Cramer Street, Milwaukee, WI 53211, USA. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, Kostukov St., 46.

---

*Received in January 2020*

#### **Для цитирования:**

Череватова А.В., Кожухова Н.И., Осадчая М.С., Жерновская И.В., Кожухова М.И. Термические особенности наноструктурированного вяжущего на основе гранита // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2020. № 1. С. 62–69. DOI: 10.34031/2071-7318-2020-5-1-62-69

#### **For citation:**

Cherevatova A.V., Kozhukhova N.I., Osadchaya M.S., Zhernovskaya I.V., Kozhukhova M.I. Thermal characteristics of granite-based nanostructured binders. *Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov*. 2020. No. 1. Pp. 62–69. DOI: 10.34031/2071-7318-2020-5-1-62-69