



Строительные материалы и изделия  
Construction Materials and Products








ISSN  
2618-7183

journal homepage: <https://bstu-journals.ru>

DOI: 10.58224/2618-7183-2023-6-1-60-73



## Разработка щелочеактивированных вяжущих на основе техногенных волокнистых материалов

Клюев А.В. \* <sup>1</sup>, Кашапов Н.Ф. <sup>2</sup>, Клюев С.В. <sup>1,2</sup>,  
Лесовик Р.В. <sup>1</sup>, Агеева М.С. <sup>1</sup>, Фомина Е.В. <sup>1</sup>, Аюбов Н.А. <sup>3</sup>

<sup>1</sup> Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, Россия,

<sup>2</sup> Казанский (Приволжский) федеральный университет, Россия,

<sup>3</sup> Комплексный научно-исследовательский институт им. Х.И. Ибрагимова Российской академии наук

\**Ответственный автор E-mail: [Klyuyevav@yandex.ru](mailto:Klyuyevav@yandex.ru)*

**Аннотация:** в статье рассмотрены вопросы разработки щелочеактивированных вяжущих на основе техногенных волокнистых материалов. Предложен подход к вторичному использованию техногенных волокнистых материалов в качестве наполнителя композиционных вяжущих. Установлены свойства отходов минеральной ваты. Изучена микроструктура тонкомолотых волокнистых частиц. Были разработаны составы щелочеактивированных вяжущих, при помоле отходов производства базальтового утеплителя до удельной поверхности 300-330 м<sup>2</sup>/кг с последующим формированием вяжущего по первому способу с уплотнением штыкованием и по второму – прессованием сырьевой смеси вяжущего при давлении 10 МПа. Разработанные составы щелочеактивированного вяжущего прессованием с пределом прочности при сжатии 22,8 МПа, и при уплотнении с последующей штыковкой – 11,8 МПа.

**Ключевые слова:** щелочеактивированные вяжущие, техногенный волокнистый материал, отходов, фибробетон, переработка

**Для цитирования** Клюев А.В., Кашапов Н.Ф., Клюев С.В., Лесовик Р.В., Агеева М.С., Фомина Е.В., Аюбов Н.А. Разработка щелочеактивированных вяжущих на основе техногенных волокнистых материалов // Строительные материалы и изделия. 2023. Том 6. № 1. С. 60 – 73. DOI: 10.58224/2618-7183-2023-6-1-60-73

## Development of Alkali-activated Binders based on Technogenic Fibrous Materials

Klyuev A.V. \* <sup>1</sup>, Kashapov N.F. <sup>2</sup>, Klyuev S.V. <sup>1,2</sup>,  
Lesovik R.V. <sup>1</sup>, Ageeva M.S. <sup>1</sup>, Fomina E.V. <sup>1</sup>, Ayubov N.A. <sup>3</sup>

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

<sup>2</sup> Kazan (Volga Region) Federal University, Russia,

<sup>3</sup> Kh. Ibragimov Complex Research Institute of the Russian Academy of Sciences

\*Corresponding author E-mail: Klyuyevav@yandex.ru

**Abstract:** the paper discusses the development of alkali-activated binders based on technogenic fibrous materials. An approach to the secondary use of technogenic fibrous materials as a filler of composite binders is offered. The properties of mineral wool waste have been established. The microstructure of finely ground fibrous particles has been studied. Compositions of alkali-activated binders were developed, when grinding basalt insulation production waste to a specific surface of 300-330 m<sup>2</sup>/kg, followed by the formation of a binder according to the first method with rod tamping sealing and, according to the second, by pressing a raw binder mixture at a pressure of 10 MPa. The developed compositions of alkali-activated binder by pressing with a compressive strength of 22.8 MPa, and when compacted with subsequent rod tamping – 11.8 MPa.

**Keywords:** alkali-activated binders, technogenic fibrous material, waste, fiber concrete, recycling

**Please cite this article as:** Klyuev A.V., Kashapov N.F., Klyuev S.V., Lesovik R.V., Ageeva M.S., Fomina E.V., Ayubov N.A. Development of alkali-activated binders based on technogenic fibrous materials. Construction Materials and Products. 2023. 6 (1). P. 60 – 73. DOI: 10.58224/2618-7183-2023-6-1-60-73

### ВВЕДЕНИЕ

Темпы развития инновационных технологий современного бетона ускоряют трансдисциплинарные подходы с разработкой многокомпонентных вяжущих [1]. Сложность рецептур и высокая цена большинства компонентов являются важными проблемами совместной работы компонентов при достижении необходимых эксплуатационных свойств. За счет оптимизации состава с применением определенных видов природного и техногенного сырья, модифицированные строительные материалы могут сочетать в себе высокие прочностные, защитные и экологические характеристики. Кроме того, они обладают более высокими технологическими свойствами и являются при использовании экономически целесообразными [2-4].

Перспективы их применения для многих отраслей современной стройиндустрии, направленной на эксплуатацию зданий и сооружений в экстремальных условиях и поддержание комфорта человека [3-5]. Среди различных стратегий, используемых для соответствия техническим и экологическим критериям, можно выделить два подхода: повторное использование материалов для производства экологически чистых строительных материалов и разработка "умных" бетонов для мониторинга состояния конструкций [6-10].

Первая стратегия заключается в использовании переработанных материалов и побочных продуктов промышленных процессов для замены первичного сырья, используемого для производства блоков, керамики, строительных растворов и бетона.

Известно, что утилизация отходов техногенного волокнистого материала (ТВМ) в строительной сфере идет по пути вторичного использования при производстве утеплителя либо как компонент в составе сырьевых смесей для производства стройматериалов [11-13].

## МЕТОДЫ И МАТЕРИАЛЫ

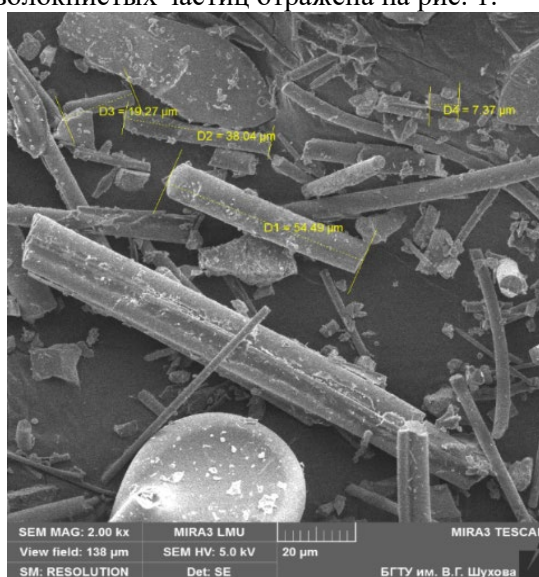
В работе были проведены эксперименты по получению щелочно-активированных вяжущих из отходов производства базальтового утеплителя.

Термическая история образования минеральной ваты, а также механическая переработка: измельчение, классификация, сепарация обуславливает изменения ее свойств. Физические свойства техногенного сырья представлены в табл. 1.

**Таблица 1.** Физические свойства отхода минеральной ваты  
**Table 1.** Physical properties of mineral wool waste

Насыпная плотность, кг/м <sup>3</sup>	Истинная плотность, кг/м <sup>3</sup>	Удельная поверхность, м <sup>2</sup> /кг
1100–1300	2800–2890	160-210

Кроме того, должны учитываться геометрические параметры техногенного сырья. Микроструктура тонкомолотых волокнистых частиц отражена на рис. 1.



**Рис. 1.** Микроструктурный анализ ТВМ  
**Fig. 1.** Microstructural analysis of FFP

С целью подтверждения возможности использования отходов производства базальтовой ваты в качестве сырья для получения щелочно-активированных вяжущих был проведен следующий эксперимент. Отходы высушивали до постоянного веса при температуре 100°C, а затем измельчали до различной удельной поверхности. Далее загружали отходы и щелочной компонент в лабораторный смеситель. Перемешивали в течение 5 минут. Формовали образцы размером 20×20×20 мм. Твердение происходило при выдержке 2 часа в камере влажного твердения с последующей сушкой при температуре 80°C в течении 5 часов с постепенным остыванием в закрытой камере в течение 16 часов.

Фазовые превращения при затвердевании композитов, прочность, водостойкость рассматривались как контролируемые свойства.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЯ

Было подготовлено 3 состава с соотношением компонентов ТВМ 60%; Вода+ NaOH 40%. За контрольный принят состав при использовании ТВМ с  $S_{уд} = 160 \text{ м}^2/\text{кг}$ . Образцы были изготовлены в формах 2x2x2 см с уплотнением штыкованием. Результаты исследования представлены в табл. 2.

**Таблица 2.** Характеристика полученных образцов  
**Table 2.** Characteristics of the obtained samples

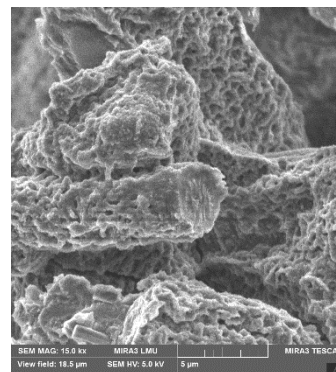
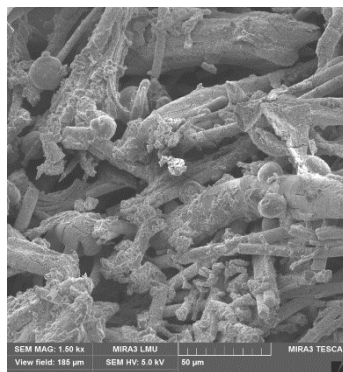
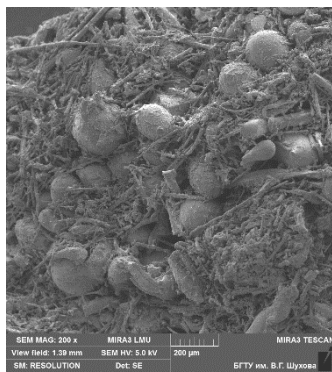
Состав	$S_{уд}$ , м <sup>2</sup> /кг	Концентра- ция NaOH, %	m, г	$\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	Предел прочности при сжатии, МПа	
					1 сут	7 сут
1(фр.0,63 и ниже) (контрольный)	160	8	11,8	1475	0,8	1,11
2	220	8	12,5	1565	2,6	2,9
3	220	10	19,2	1762	2,8	3,2

Анализ результатов показал, что повышение удельной поверхности ТВМ позволяет изменять прочностные показатели. Так при  $S_{уд} = 160$  м<sup>2</sup>/кг прочность вяжущего составила 1 МПа,  $S_{уд} = 220$  м<sup>2</sup>/кг отмечается повышение активности практически в 3 раза ( $R_{сж} = 3,2$  МПа). Увеличение концентрации щелочи не дало значительного прироста прочности.

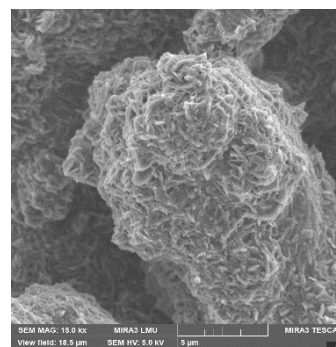
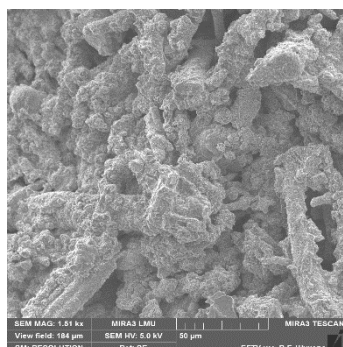
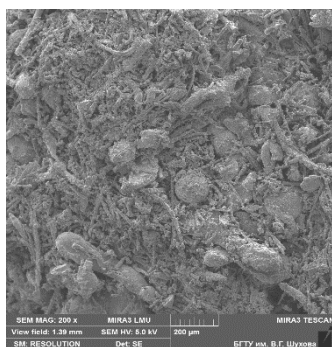
Отмечается, что отходы ТВМ обладают повышенной водопотребностью при смешивании за счет наличия мелких фракций, однако, после формования образцов наблюдается отслаивание воды, что объясняется гидрофобными свойствами материала.

Анализ микроструктуры полученных образцов показал, что все образцы имели достаточно рыхлую структуру, но при этом все составы имели высокую степень полимеризации, что обусловлено оплавлением частиц ТВМ и ростом на них новообразований (рис. 2). Почти вся поверхность частиц покрыта новообразованиями, в основном с пластинчатой структурой, что, скорее всего, имеет отношение к фазе гидротальцита. В порах видны иглообразные новообразования, характерные для кристаллов *C-S-H* (I).

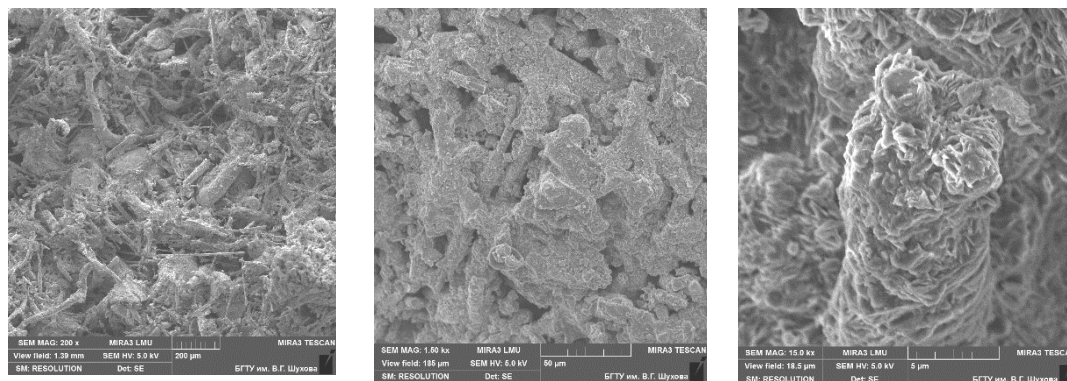
Структура образца состава 1 (рис. 2) наиболее рыхлая, с большим количеством пор и пустот, что свидетельствует о необходимости механоактивации отходов ТВМ. При повышении удельной поверхности частиц (рис. 2, составы 2, 3) микроструктура образцов вяжущего отличается более высокой плотностью, при незначительном количестве незаполненных новообразованиями полостей.



1 состав



2 состав



3 состав

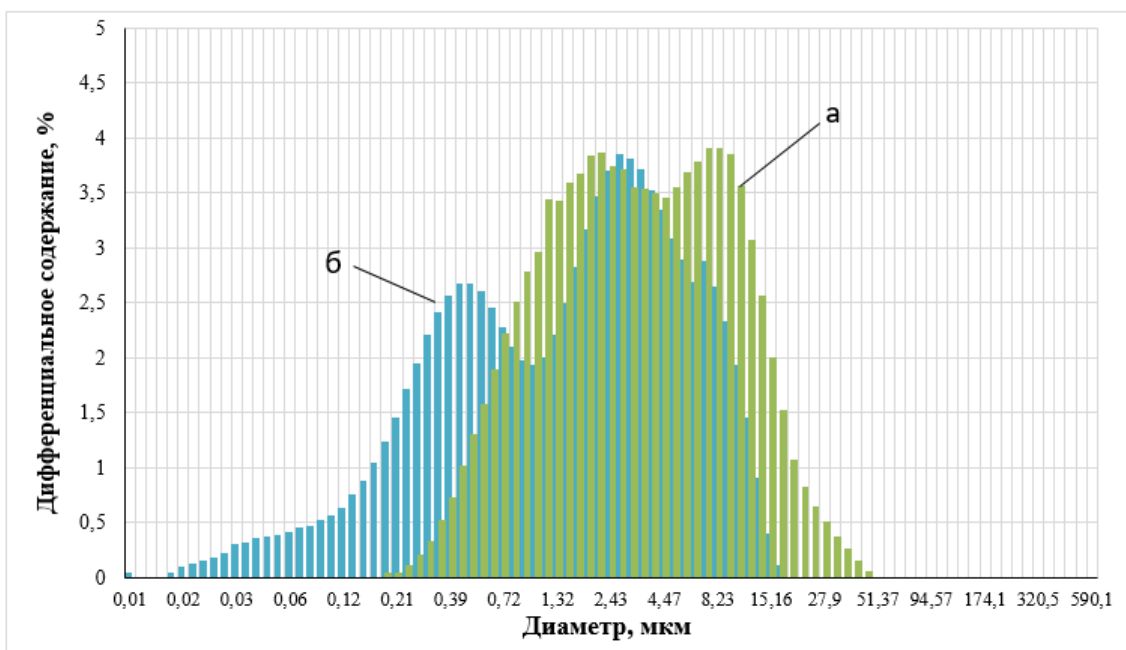
**Рис. 2.** Микроструктура вяжущего в возрасте 28 суток  
Составы в соответствии с таблицей 2  
**Fig. 2.** Microstructure of the binder at the age of 28 days  
Compositions according to Table 2

При оптимизации составов щелочеактивированных вяжущих осуществляли помол отходов производства базальтового утеплителя до 300-330 м<sup>2</sup>/кг с последующим формированием вяжущего по первому способу с уплотнением штыкованием (табл. 3, состав 1). Второй метод заключался в прессовании сырьевой смеси вяжущего при давлении 10 МПа. Выдержка при заданном давлении составляла 1 минута. Процесс прессования основан на использовании полусухой сырьевой смеси, поэтому количество воды снизили до соотношения вода / щелочь 50/50 (состав 2).

**Таблица 3.** Характеристика полученных образцов  
**Table 3.** Characteristics of the obtained samples

Состав	S <sub>уд</sub> , м <sup>2</sup> /кг	Концентрация NaOH, %	m, г	ρ, кг/м <sup>3</sup>	Прочность при сжатии, МПа	
					1 сут	7 сут
1*	300–330	8	13,5	1685	17,7	22,8
2*	300–330	50	19,2	1762	9,7	11,8

Анализ результатов показал значительное увеличение прочности полученных образцов по сравнению с контрольным составом (табл. 3). Так прочность при сжатии образцов полученных формованием увеличилась в 20 раз (22,8 МПа), а прессованных образцов в 10 раз (11,8 МПа). Максимальная прочность 22,8 МПа достигнута формованием при использовании тонко измельченного техногенного сырья.



**Рис. 4.** Распределение частиц отхода ТВМ по размерам: а – Суд = 220 м<sup>2</sup>/кг; б – Суд = 330 м<sup>2</sup>/кг  
**Fig. 4.** The distribution of FFP waste particles by size: a – Ssp = 220 m<sup>2</sup>/kg; b – Ssp = 330 m<sup>2</sup>/kg

На графике распределений частиц по размерам отчетливо видно смещение кривой в область мелких значений при более высокой удельной поверхности с возникновением пика в области 0,1–1 мкм (рис. 4). Наличие тонкодисперсных частиц обеспечивает возрастание поверхности контакта, что значительно активизирует процессы взаимодействия компонентов при твердении.

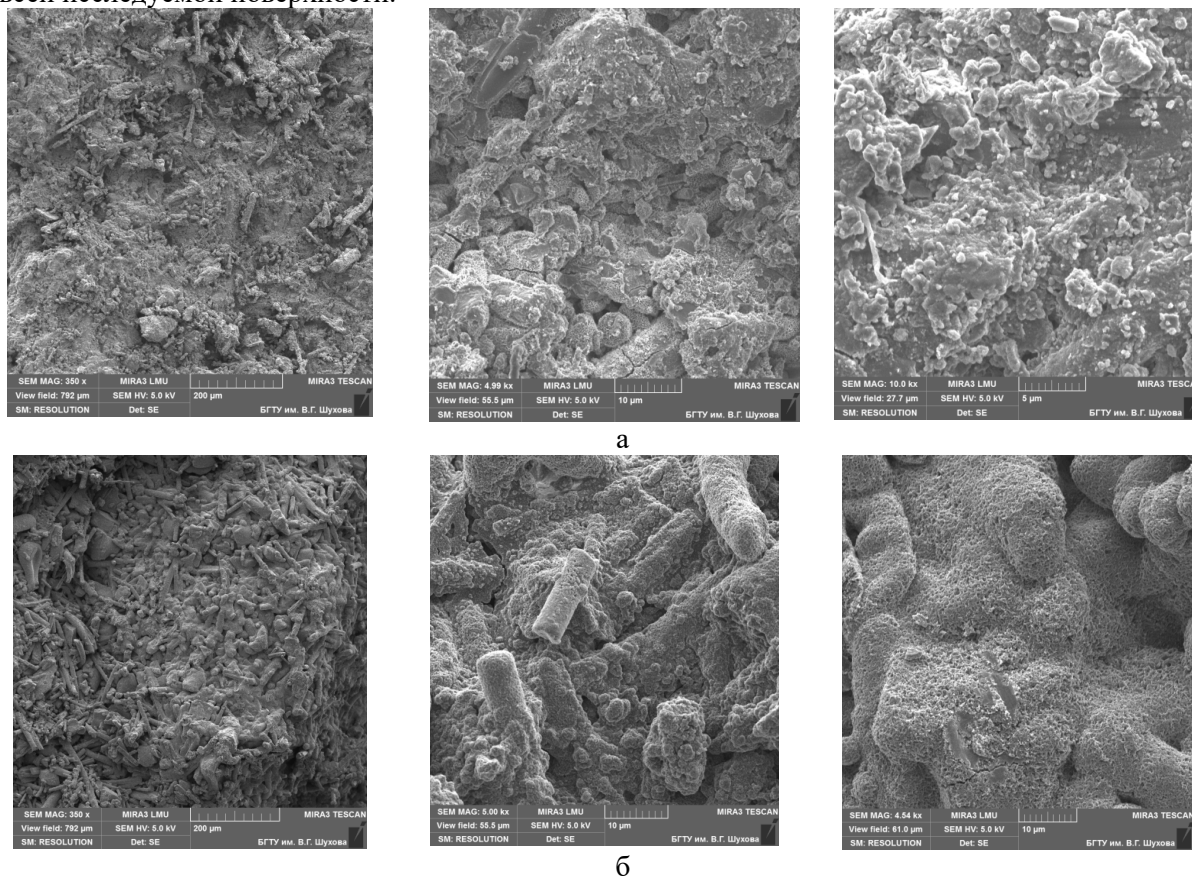


**Рис. 5.** Внешний вид заформованных образцов  
**Fig. 5.** Appearance of molded samples

Однако, с учетом требований предъявляемых к сырьевой смеси, при прессовании в вязущей системе возникает дефицит жидкой фазы, которая распределяясь неравномерно влияет на процессы структурообразования. Образец имел рыхлую структуру в центре и плотную по контуру (рис. 5). Кроме того, избыток щелочи подвергается атмосферной карбонизации с образованием высолов.

Анализ микроструктуры выявил наличие более плотной матрицы во всех случаях по сравнению с составами, полученными при более низкой удельной поверхности ТВМ (рис. 6). При

этом у образца состава 2 волокна практически неразличимы при более невысоких увеличениях в общей массе материала. У прессованного образца отмечается плотная матрица с повышенным количеством контактных зон между частицами, волокна ТВМ отчетливо прослеживаются по всей исследуемой поверхности.



**Рис. 6.** Микроструктура образцов щелочеактивированного вяжущего на основе ТВМ:  
а – формованный уплотнением штыковой; б – формованный прессованием  
**Fig. 6.** Microstructure of samples alkali-activated binder based on FFP:  
a – molded by sealing with a tamping rod; b – molded by pressing

В исследованиях [14] указано, что прочность при сжатии образцов геополимеров из отходов производства минеральной ваты увеличивается в 2,5-3 раза с увеличением модуля кислотности отхода с 1 до 1,4.

Дальнейшее увеличение модуля кислотности до 2 приводит к падению прочности при сжатии почти на 40%. Согласно ГОСТ 4640-2011 модуль кислотности отхода (Мк) составил 1,87. Известно, что с увеличением модуля кислотности от 1,4 до 2 новообразования в геополимерах представлены в основном гелем гидросиликата кальция типа С-А-S-H. Структура этого геля аналогична тобермориту с частичной заменой Са на Al.

Согласно Дж. Давидовичу [15], для получения прочных геополимерных материалов рекомендуется соблюдать следующие условия, соотношения в сырье  $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3 = 3,5 - 4,5$ . В этом случае образуется достаточное количество активного оксида Si и Al в щелочной среде вяжущего. В отходе ТВМ соотношение  $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3 = 3,59$ . Максимальная прочность вяжущего достигается при  $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3 = 3,54$  в смеси (состав 3).

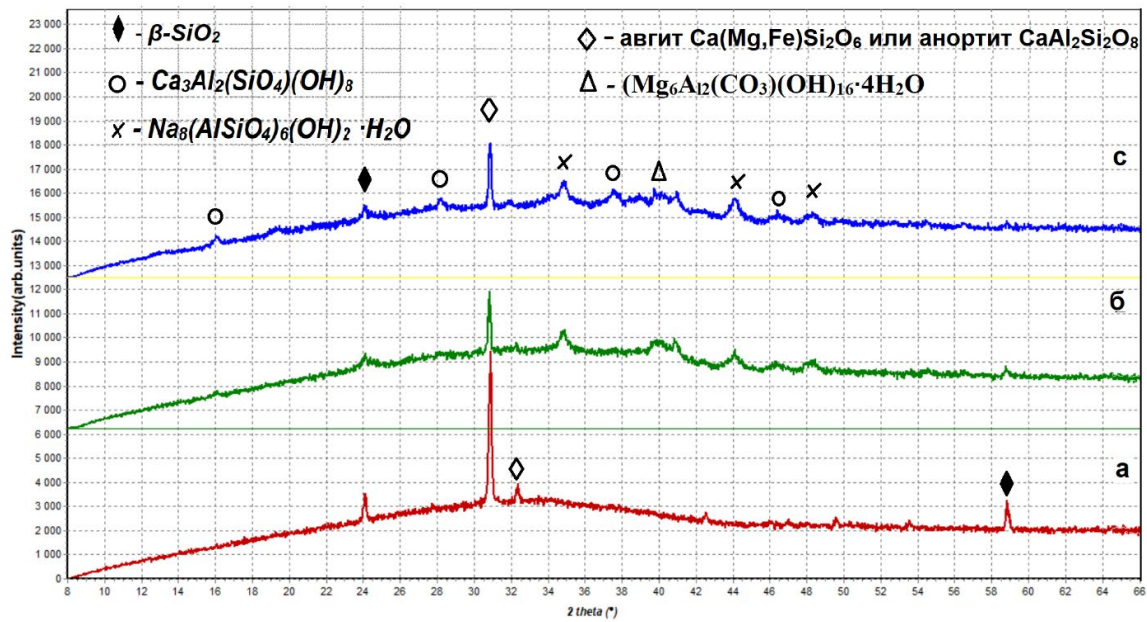
Геополимерные материалы образуются в ходе реакций геополимеризации алюмосиликатных соединений в сильнощелочной среде. Согласно Дж. Давидовичу, реакция получения геополимеров протекает в три стадии [125]:

- на первой стадии происходит растворение оксидов кремния и алюминия в щелочной среде – концентрированном растворе NaOH или KOH;
- на второй – расщепление природных полимерных структур на мономеры;

- на третьей – схватывание и уплотнение в результате превращения мономеров в полимерные материалы.

Согласно традиционным представлениям о полимеризации, на первой стадии кинетика процесса определяется растворением алюмосиликатных соединений и переходом в раствор ионов  $\text{Na}^+$  повышающего pH в начальный период полимеризации. Соединения  $\text{Si-O-Si}$  и  $\text{Al-O-Si}$  разрушаются в высококонцентрированном щелочном растворе и переходят в коллоидное состояние. Затем количество коллоидных частиц возрастает, и в последствии наблюдается их уплотнение в существующем объеме, в результате структура уплотняется.

Анализ рентгенограмм указывает на смещение аморфного галло в область углов отражений  $35-40^\circ 2\theta$ , что соответствует цеолитизации системы. Кристаллические фазы в техногенном сырье представлены цепочечными силикатами пироксенов, которые растворяются в щелочных растворах вяжущего, о чем свидетельствует снижение основного дифракционного отражения авгита или анортита. Снижается интенсивность дифракционных отражений  $\beta\text{-SiO}_2$  (рис. 7 б, с).



**Рис. 7.** Рентгенограммы: а – базальтового волокна; б – геополимер формованный прессованием; с – геополимер формованный уплотнением штыковой

**Fig. 7.** Radiographs: a – basalt fiber; b – geopolymer molded by pressing; c – geopolymer molded by tamping rod seal

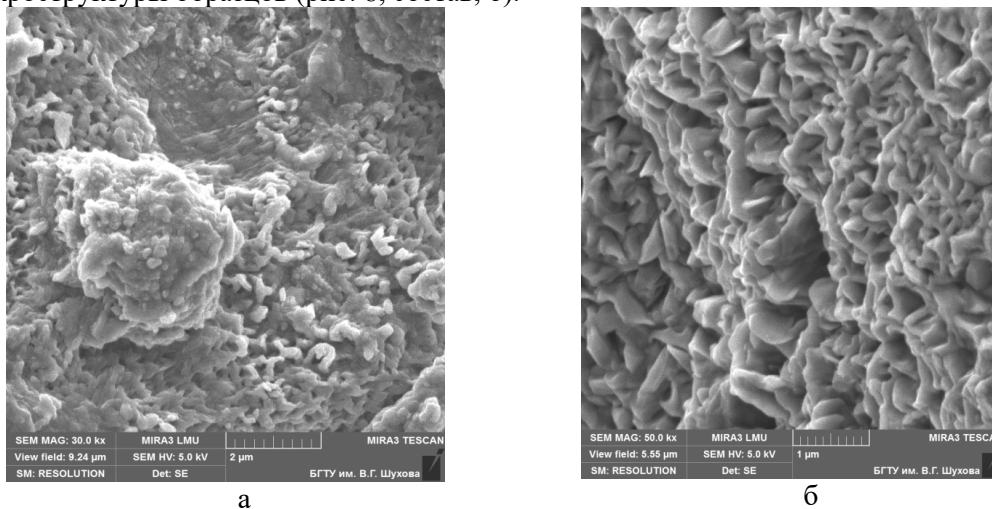
При введении в систему щелочного активатора  $\text{NaOH}$  растворимость кристаллических фаз пироксенов (альбит, анортит) и кварца увеличивается, что отмечается снижением интенсивности дифракционных отражений (рис. 7 б, с). Согласно химического анализа образцов приведенного в табл. 4 основной химический состав в вяжущем представлен оксидами  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ .



**Таблица 4.** Химический состав полученных образцов  
**Table 4.** Chemical composition of the obtained samples

Оксид	Контрольный состав (таблица 2)	Состав 1 (таблица 3)	Состав 2 (таблица 3)
	м/м%	м/м%	м/м%
SiO <sub>2</sub>	30,79	29,84	27,85
Na <sub>2</sub> O	28,07	30,47	34,85
CaO	12,06	11,59	11,03
MgO	9,81	9,07	8,31
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	9,20	8,60	7,86
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	6,87	6,75	6,55
ZnO	1,29	1,71	1,63
TiO <sub>2</sub>	1,00	0,98	0,94
K <sub>2</sub> O	0,58	0,57	0,57
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,10	0,11	0,12
MnO	0,10	0,10	0,10
SO <sub>3</sub>	0,03	0,06	0,05

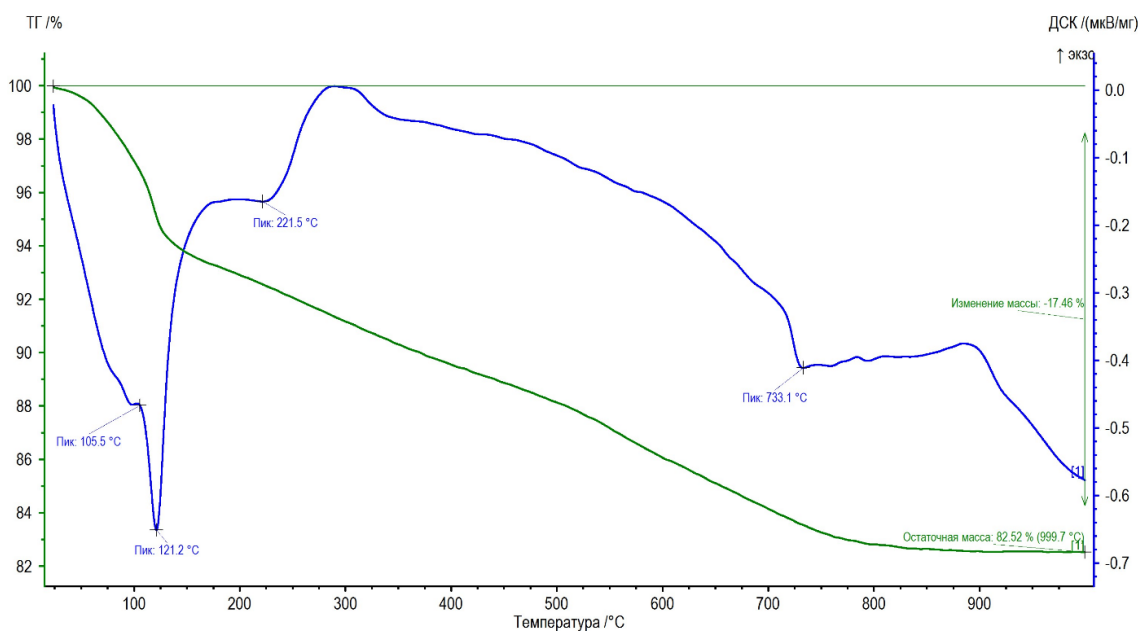
Основные оксиды в вяжущих участвуют в процессах фазообразования и на РФА отмечается увеличение дифракционных отражений характерных для соединения натриевых гидроалюмосиликатов типа содалита  $Na_8(AlSiO_4)_6(OH)_2H_2O$ , а также кальциевых гидроалюмосиликатов типа  $Ca_3Al_2(SiO_4)(OH)_8$ , что свидетельствует о процессе твердения вяжущего по геополимеризационному механизму. Также в составе щелочеактивированных образцов присутствует гидротальцит  $(Mg_6Al_2(CO_3)(OH)_{16} \cdot 4H_2O)$ , слоистые частицы которого идентифицированы при изучении микроструктуры образцов (рис. 8, состав, б).



**Рис. 8.** Микроструктура образцов: а – уплотнение штыкованием,  
 б – уплотнение прессованием  
**Fig. 8.** Microstructure of samples: a – sealing by rod tamping,  
 б – sealing by pressing

Рост цеолитизированных новообразований и гидросиликатных соединений интенсивней происходит в системе, где при приготовлении составов применяли формование с уплотнением штыкованием (рис. 8, а). В этом случае обеспечивается увеличение контактных зон взаимодействия при участии жидкой фазы. При прессовании снижение прочности можно связать с дефицитом жидкой фазы в вяжущей системе.

Наличие в синтезированной системе соединений соединения натрий-кальциевых гидроалюмосиликатов подтверждается дифференциально-термическим анализом (рис. 9). Эндотермический пик при 733°C связан с разложением натрий-кальциевых гидроалюмосиликатов. Пик экзоэффекта при 900 °C связан с кристаллизацией тоберморитоподобных соединений C–A–S–H и C–S–H в волластонит.

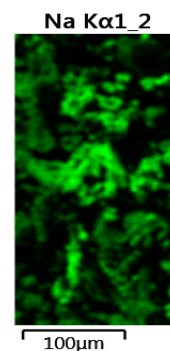
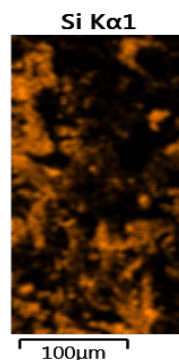


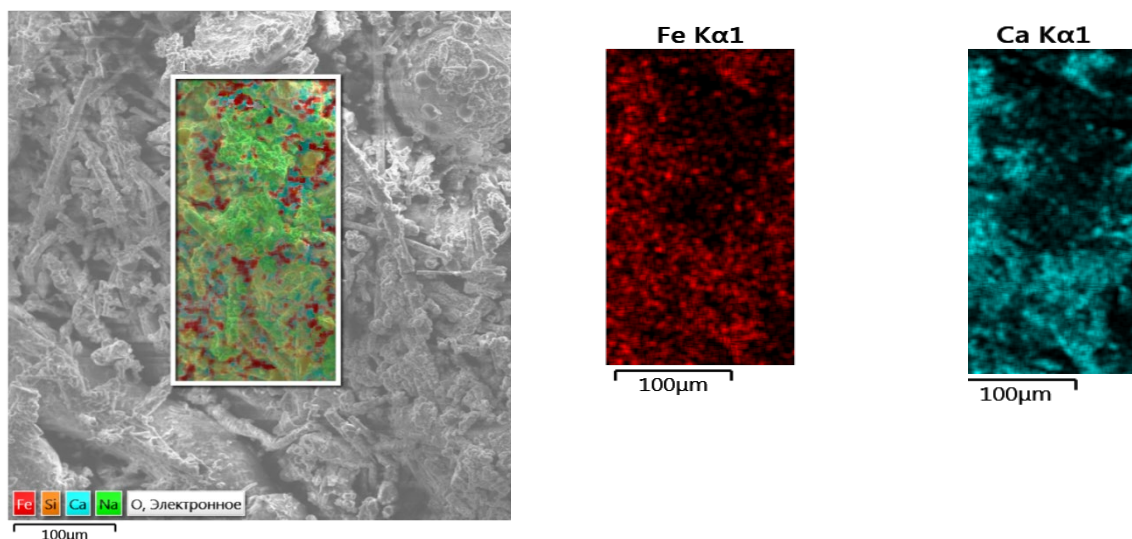
**Рис. 9.** Дифференциально-термический анализ геополимера состав 1 таблица 3  
**Fig. 9.** Differential thermal analysis of geopolymer composition 1 table 3

Самый глубокий эндотермический эффект и значительная потеря массы в интервале температур 30 – 200 °C указывает на потери не связанной воды и дегидратацию гидросиликатных соединений, а также с потерей воды слоистой структуры гидротальцита. Эндоэффект с максимумом при температуре 221,5 °C характеризуется выгоранием органических примесей в отходе и экзоэффект при 350 °C можно отнести к тепловыделению при горении органической смолы используемой при производстве волокнистого утеплителя. Наличие гидросиликатных тоберморитоподобных соединений подтверждается также микроструктурным анализом, где почти вся поверхность частиц отходов покрыта волокнистыми новообразованиями, которые, скорее всего, относятся к гидросиликатам кальция тоберморита типа C–A–S–H (рис. 8 а).

Для определения локального химического состава разработанного вяжущего проведен энергодисперсионный микроанализ, где содержание основных химических компонентов выделены цветом (рис. 10).

Суммарный спектр карты	Вес.%	Сигма Вес.%
O	45.19	0.21
Na	25.25	0.15
Mg	2.00	0.05
Al	2.87	0.05
Si	9.00	0.08
K	0.39	0.04
Ca	7.45	0.08
Ti	0.50	0.06
Fe	4.55	0.13
Zn	2.81	0.26
Сумма	100.00	





**Рис. 10.** Энергодисперсионный микроанализ состав 1 таблица 3  
**Fig. 10.** Energy dispersive microanalysis composition 1 Table 3

Поверхность образца представлена волокнистыми частицами ТВМ и «корольками», где наблюдается равномерное распределение основных химических элементов по всему объему с явно выраженной локализацией соединений натрия.

## ВЫВОДЫ

Подтверждена возможность использования тонкомолотых отходов ТВМ ( $S_{\text{уд.}}=300\text{--}330 \text{ м}^2/\text{кг}$ ) при получении геополимерного вяжущего. Рентгенофазовым и дифференциальным термическим анализом подтверждена цеолитизация системы с синтезом новообразований характерных для соединения натриевых гидроалюмосиликатов типа содалита  $\text{Na}_8(\text{AlSiO}_4)_6(\text{OH})_2\text{H}_2\text{O}$ , гидротальцит  $(\text{Mg}_6\text{Al}_2(\text{CO}_3)(\text{OH})_{16}\cdot 4\text{H}_2\text{O})$ , а также кальциевых гидроалюмосиликатов типа  $\text{Ca}_3\text{Al}_2(\text{SiO}_4)(\text{OH})_8$ .

Рекомендовано формировать щелочеактивированное вяжущее прессованием, при этом прочность при сжатии увеличивается до 22,8 МПа, при уплотнении с последующей штыковкой прочность при сжатии увеличилась до 11,8 МПа в отличие от контрольного состава с  $S_{\text{уд.}} = 160 \text{ м}^2/\text{кг}$  при прочности при сжатии примерно 1 МПа.

## Благодарности

Работа подготовлена при финансовой поддержке в рамках реализации национального проекта «Наука и университеты» новой лаборатории «Ресурсо-энергосберегающие технологии, оборудование и комплексы» (FZWN-2021-0014)

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Лесовик В.С. Геоника (геомиметика). Примеры реализации в строительном материаловедении: монография. Белгород: Изд-во БГТУ, 2014. 206 с.
- [2] Islam M, Lantada A.D, Mager D, Korvink J.G. Carbon-Based Materials for Articular Tissue Engineering: From Innovative Scaffolding Materials toward Engineered Living Carbon // AdvHealthc Mater. 2022. № 11 (1). P. e2101834.
- [3] Khan Z.U., Kausar A., Ullah H., Badshah A., & Khan W.U. A review of graphene oxide, graphenebuckypaper, and polymer/graphene composites: Properties and fabrication techniques // Journal of Plastic Film & Sheeting. 2016. № 32 (4). P. 336 – 379.

- [4] Ali F., Khan M.A., Qurashi M.A., Shah S.A.R., Khan N.M., Khursheed Z., Rahim H.S., Arshad H., Farhan M., Waseem M. Utilization of pyrolytic carbon black waste for the development of sustainable Mater. // *Process*. 2020. № 8 (2). 174 p.
- [5] Rezanian M., Panahandeh M., Razavi M.J., Berto F. Experimental study of the simultaneous effect of nano-silica and nano-carbon black on permeability and mechanical properties of the concrete. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*. 2019. 104 p.
- [6] Rezanian M., Panahandeh M., Razavi M.J., Berto F. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*. 2019. № 104. P. 102391.
- [7] Yuan H.-W., Lu C.-H., Xu Z.-Z., Ni Y.-R., Lan X.-H. Mechanical and thermal properties of cement composite graphite for solar thermal storage materials // *Sol. Energy* 2012. № 86. P. 3227 – 3233.
- [8] Klyuev S.V., Klyuev A.V., Khezhev T.A., Pucharenko Yu.V. Technogenic sands as effective filler for fine-grained fibre concrete // *Journal of Physics: Conference Series*. 2018. № 1118 (1). P. 012020.
- [9] Shyong Ya.Z., Abd Khalid N.H, Haron Z., Mohamed A. Waste Mineral Wool and Its Opportunities // *A Review/Materials*. 2021. № 14 (19). //doi.org/10.3390/ma14195777
- [10] Yliniemi J., Kinnunen P., Karinkanta P., Illikainen M. Utilization of Mineral Wools as Alkali-Activated Material Precursor // *Materials* 2016. № 9. 312 p. <https://doi.org/10.3390/ma9050312>
- [11] Khezhev T.A., Pukharenko Yu.V., Khezhev Kh.A., Klyuev S.V. Fiber Gypsum Concrete Composites with Using Volcanic Tuff Sawing Waste // *ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences*. 2018. Vol. 13. № 8. P. 2935 – 2946.
- [12] Klyuev S.V., Klyuev A.V., Khezhev T.A., Pucharenko Yu.V. High-Strength Fine-Grained Fiber Concrete with Combined Reinforcement by Fiber // *Journal of Engineering and Applied Sciences*. 2018. № 13 (8 SI). P. 6407 – 6412.
- [13] Klyuev S.V., Klyuev A.V., Vatin N.I. Fine-grained concrete with combined reinforcement by different types of fibers // *MATEC Web of Conferences*. 2018. № 245. P. 03006.
- [14] Ерофеев В.Т., Родин А.И., Якунин В.В., Тувин М.Н. Структура, состав и свойства геополимеров из отходов минеральной ваты // *Инженерно-строительный журнал*. 2019. № 6 (90). С. 3 – 14.
- [15] Joseph Davidovits *Geopolymer Chemistry and Applications*, 5th Ed. Publisher: Geopolymer Institute. 2020. P. 698.

## REFERENCES

- [1] Lesovik V.S. *Geonics (geomimetics). Examples of implementation in building materials science: monograph*. Belgorod: Publishing house of BSTU, 2014. 206 p. (rus.)
- [2] Islam M, Lantada A.D, Mager D, Korvink J.G. Carbon-Based Materials for Articular Tissue Engineering: From Innovative Scaffolding Materials toward Engineered Living Carbon. *AdvHealthc Mater*. 2022. 11 (1). P. e2101834.
- [3] Khan Z.U., Kausar A., Ullah H., Badshah A., & Khan W.U. A review of graphene oxide, graphenebuckypaper, and polymer/graphene composites: Properties and fabrication techniques. *Journal of Plastic Film & Sheeting*. 2016. 32 (4). P. 336 – 379.
- [4] Ali F., Khan M.A., Qurashi M.A., Shah S.A.R., Khan N.M., Khursheed Z., Rahim H.S., Arshad H., Farhan M., Waseem M. Utilization of pyrolytic carbon black waste for the development of sustainable Mater. *Process*. 2020. 8 (2). 174 p.
- [5] Rezanian M., Panahandeh M., Razavi M.J., Berto F. Experimental study of the simultaneous effect of nano-silica and nano-carbon black on permeability and mechanical properties of the concrete. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*. 2019. 104 p.
- [6] Rezanian M., Panahandeh M., Razavi M.J., Berto F. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*. 2019. 104. P. 102391.

- [7] Yuan H.-W., Lu C.-H., Xu Z.-Z., Ni Y.-R., Lan X.-H. Mechanical and thermal properties of cement composite graphite for solar thermal storage materials. *Sol. Energy* 2012. 86. P. 3227 – 3233.
- [8] Klyuev S.V., Klyuev A.V., Khezhev T.A., Pucharenko Yu.V. Technogenic sands as effective filler for fine-grained fibre concrete. *Journal of Physics: Conference Series*. 2018. 1118 (1). P. 012020.
- [9] Shyong Ya.Z., Abd Khalid N.H, Haron Z., Mohamed A. Waste Mineral Wool and Its Opportunities. *A Review/Materials*. 2021. 14 (19). //doi.org/10.3390/ma14195777
- [10] Yliniemi J., Kinnunen P., Karinkanta P., Illikainen M. Utilization of Mineral Wools as Alkali-Activated Material Precursor. *Materials* 2016. 9. 312 p. <https://doi.org/10.3390/ma9050312>
- [11] Khezhev T.A., Pucharenko Yu.V., Khezhev Kh.A., Klyuev S.V. Fiber Gypsum Concrete Composites with Using Volcanic Tuff Sawing Waste. *ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences*. 2018. 13 (8). P. 2935 – 2946.
- [12] Klyuev S.V., Klyuev A.V., Khezhev T.A., Pucharenko Yu.V. High-Strength Fine-Grained Fiber Concrete with Combined Reinforcement by Fiber. *Journal of Engineering and Applied Sciences*. 2018. 3 (8 SD). P. 6407 – 6412.
- [13] Klyuev S.V., Klyuev A.V., Vatin N.I. Fine-grained concrete with combined reinforcement by different types of fibers. *MATEC Web of Conferences*. 2018. 245. P. 03006.
- [14] Erofeev V.T., Rodin A.I., Yakunin V.V., Travin M.N. Structure, composition and properties of biopolymers from mineral wool waste. *Civil Engineering Journal*. 2019. 6 (90). P. 3 – 14. (rus.)
- [15] Joseph Davidovits *Geopolymer Chemistry and Applications*, 5th Ed. Publisher: Geopolymer Institute. 2020. R. 698.

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ / INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

**Клюев А.В.**, e-mail: [Klyuyevav@yandex.ru](mailto:Klyuyevav@yandex.ru), тел. +7(929)003-58-18, ORCID ID: 0000-0003-0845-8414  
SCOPUS ID:  
<https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=56567996100>, Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, кафедра теоретической механики и сопротивления материалов, кандидат технических наук, доцент

**Klyuev A.V.**, e-mail: [Klyuyevav@yandex.ru](mailto:Klyuyevav@yandex.ru), tel.: +7(929)003-58-18, ORCID ID: 0000-0003-0845-8414  
SCOPUS ID:  
<https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=56567996100>, Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov, Department of Theoretical Mechanics and Resistance of Materials, Candidate of Engineering Sciences (Ph.D.), Associate Professor

**Кашапов Н.Ф.**, e-mail: [kashramiln@gmail.com](mailto:kashramiln@gmail.com), тел. +7(843)233-75-76, ORCID ID: 0000-0002-1185-4605,  
SCOPUS ID:  
<http://www.scopus.com/authid/detail.url?authorId=6602262381>, Казанский (Приволжский) федеральный университет, кафедра «Технической физики и энергетики», заведующий кафедрой, директор Инженерного института, доктор технических наук, профессор

**Kashapov N.F.**, e-mail: [kashramiln@gmail.com](mailto:kashramiln@gmail.com), tel.+7(843)233-75-76, ORCID ID: 0000-0002-1185-4605,  
SCOPUS ID:  
<http://www.scopus.com/authid/detail.url?authorId=6602262381>, Kazan (Volga Region) Federal University, Department of "Technical Physics and Power Engineering", Head of Department, Director of Engineering Institute, Doctor of Engineering Sciences (Advanced Doctor), Professor

**Клюев С.В.**, e-mail: [Klyuyev@yandex.ru](mailto:Klyuyev@yandex.ru), тел. +7(951)139-63-27, ORCID ID: 0000-0002-1995-6139, SCOPUS ID:  
<https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=57212454175>, Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, кафедра теоретической механики и сопротивления материалов, кандидат технических наук, доцент, Казанский (Приволжский) федеральный университет, ведущий научный сотрудник

**Klyuev S.V.**, e-mail: [Klyuyev@yandex.ru](mailto:Klyuyev@yandex.ru), tel. +7(951)139-63-27, ORCID ID: 0000-0002-1995-6139, SCOPUS ID:  
<https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=57212454175>, Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov, Department of Theoretical Mechanics and Resistance of Materials, Candidate of Engineering Sciences (Ph.D.), Associate Professor, Kazan (Volga Region) Federal University, Leading Research Officer

**Лесовик Р.В.**, e-mail: ruslan\_lesovik@mail.ru, тел. +7(910)320-68-81, ORCID ID: 0000-0001-5707-1289, SCOPUS ID:

<https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=55934372500>, Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, кафедра строительного материаловедения изделий и конструкций, доктор технических наук, профессор

**Агеева М.С.**, e-mail: ageevams@yandex.ru, тел. +7(910)322-93-46, ORCID ID: 0000-0002-3114-7078, SCOPUS ID:

<https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=56333430100>, Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, кафедра строительного материаловедения изделий и конструкций, кандидат технических наук, доцент

**Фомина Е.В.**, e-mail: fomina.katerina@mail.ru, тел. +7(905)879-76-16, ORCID ID: 0000-0003-0542-0963, SCOPUS ID:

<https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=55857656600>, Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, кафедра строительного материаловедения изделий и конструкций, кандидат технических наук, доцент

**Аюбов Н.А.**, e-mail: yrekly@mail.ru, +7-928-226-97-32, ORCID ID: 0009-0001-8129-9598, SCOPUS ID:

<https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=57221326693>, Комплексный научно-исследовательский институт им. Х.И. Ибрагимова Российской академии наук, кандидат экономических наук, профессор

**Lesovik R.V.**, e-mail: ruslan\_lesovik@mail.ru, tel. +7(910)320-68-81, ORCID ID: 0000-0001-5707-1289, SCOPUS ID:

<https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=55934372500>, Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov, Department of Building Materials Science of products and Structures, Doctor of Engineering Sciences (Advanced Doctor), Professor

**Ageeva M.S.**, e-mail: ageevams@yandex.ru, tel. +7(910)322-93-46, ORCID ID: 0000-0002-3114-7078, SCOPUS ID:

<https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=56333430100>, Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov, Department of Building Materials Science of products and Structures, Candidate of Engineering Sciences (Ph.D.), Associate Professor

**Fomina E.V.**, e-mail: fomina.katerina@mail.ru, tel. +7(905)879-76-16, ORCID ID: 0000-0003-0542-0963, SCOPUS ID:

<https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=55857656600>, Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov Department of Building Materials Science of products and Structures, Candidate of Engineering Sciences (Ph.D.), Associate Professor

**Ayubov N.A.**, e-mail: yrekly@mail.ru, +7-928-226-97-32, ORCID ID: 0009-0001-8129-9598, SCOPUS ID:

<https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=57221326693>, Kh. Ibragimov Complex Research Institute of the Russian Academy of Sciences, Candidate of Economic Sciences (Ph.D.), Professor

Поступила в редакцию 10 июля 2022 г.  
Принята в доработанном виде 1 октября 2022 г.  
Одобрена для публикации 4 декабря 2022 г.

Received: July 10, 2022  
Revised: October 1, 2022.  
Accepted: December 4, 2022.