

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH PAPER

УДК 691.335

DOI: 10.22227/1997-0935.2025.3.409-418

Исследование активности отходов тепловых электростанций с позиции применения в составе минеральных вяжущих

Ирина Юрьевна Маркова, Маргарита Андреевна Степаненко,
Валерия Валерьевна Строкова, Никита Олегович Лукьяненко

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова (БГТУ им. В.Г. Шухова);
г. Белгород, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Для эффективного использования отходов в составе минеральных вяжущих и получения заданных характеристик конечных материалов на их основе необходимо учитывать одну из наиболее важных характеристик сырьевого компонента — активность. Выполнен анализ активности зол-уноса (ЗУ) различного состава с применением физико-химических методов, позволяющих определить возможность их использования в составе вяжущих систем на базе цемента. Получение минеральных вяжущих с применением отходов различных производств требует особого внимания ввиду специфики их получения, хранения и изменения свойств под воздействием внешних факторов. Комплексный подход при определении активности таких материалов позволит установить характер и механизмы взаимодействия ЗУ с компонентами вяжущего.

Материалы и методы. Проведен анализ активности отходов тепловых электростанций (ТЭС) в виде ЗУ разного состава: основной ЗУ Назаровской ТЭС; кислой ЗУ Рефтинской ГРЭС. Для анализа активности использован комплекс следующих методов: содержание свободного оксида кальция ($\text{CaO}_{\text{св}}$) ускоренным методом (ГОСТ 25818–2017); тест Фраттини (EN 196-5:2011); метод Чапеля (NF P18-513); оценка теплоты гидратации методом дифференциальной калориметрии (авторская методика).

Результаты. На основании комплексной оценки активности отходов ТЭС установлено, что оба они являются активными. В свою очередь, основная ЗУ Назаровской ТЭС обладает одновременно вяжущими свойствами и в значительно меньшей степени пуццолановой активностью, а кислая ЗУ Рефтинской ГРЭС — лишь пуццолановой активностью.

Выводы. Ввиду своей активности ЗУ могут быть использованы как вспомогательные компоненты в составе цементных композиций, так и взамен части цемента при рационально подобранном количестве компонентов. Для установления характера взаимодействия, а также скорости и интенсивности протекания реакций в процессе структурообразования цементной матрицы в присутствии ЗУ необходим комплексный подход с применением физико-химических методов.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: минеральные вяжущие, зола-уноса, цементные системы, активность, кинетика тепловыделения

Благодарности. Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-19-00796 (URL: <https://rscf.ru/project/23-19-00796/>) с использованием оборудования Центра высоких технологий на базе БГТУ им. В.Г. Шухова.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Маркова И.Ю., Степаненко М.А., Строкова В.В., Лукьяненко Н.О. Исследование активности отходов тепловых электростанций с позиции применения в составе минеральных вяжущих // Вестник МГСУ. 2025. Т. 20. Вып. 3. С. 409–418. DOI: 10.22227/1997-0935.2025.3.409-418

Автор, ответственный за переписку: Ирина Юрьевна Маркова, irishka-31.90@mail.ru.

Study of the activity of thermal power plant waste from the point of application in mineral binders

Irina Yu. Markova, Margarita A. Stepanenko, Valeria V. Stroкова,
Nikita O. Lukyanenko

Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov (BSTU named after V.G. Shukhov)

ABSTRACT

Introduction. For the efficient use of waste in mineral binders and obtaining the specified characteristics of the final materials based on them, it is necessary to take into account one of the most important characteristics of the raw material component — activity. The analysis of the activity of fly ash of different composition using various physicochemical methods, allowing to determine the possibility of their use in cement-based binder systems, was carried out. Obtaining mineral binders using waste from various industries requires special attention due to the specifics of their production, storage and change in properties under the influence of external factors. A comprehensive approach in determining the activity of such materials will allow us to establish the nature and mechanisms of interaction of fly ash with binder components.

Materials and methods. The paper analyzes the activity of thermal power plant waste in the form of fly ash of various compositions: basic fly ash of the Nazarovskaya TPP; acid fly ash of the Reftinskaya SDPP. The following set of methods was

used to analyze the activity: accelerated CaO content (GOST 25818–2017); Frattini test (EN 196-5:2011); Chapelle method (NF P18-513); assessment of the heat of hydration by differential calorimetry (proprietary technique).

Results. Based on a comprehensive assessment of the activity of the waste from the thermal power plant, it was established that both of them are active. In turn, the main fly ash from the Nazarovskaya TPP has both binding properties and, to a much lesser extent, pozzolanic activity, while the acidic fly ash from the Reftinskaya SDPP has only pozzolanic activity.

Conclusions. Due to its activity, fly ash can be used as auxiliary components in cement compositions, as well as to replace part of the cement with a rationally selected amount of components. To establish the nature of the interaction, as well as the speed and intensity of reactions in the process of structure formation of the cement matrix in the presence of fly ash, a comprehensive approach using physicochemical methods is necessary.

KEYWORDS: mineral binders, fly ash, cement systems, activity, heat release kinetics

Acknowledgements. The research was carried out at the expense of the grant of the Russian Science Foundation No. 23-19-00796 (URL: <https://rscf.ru/project/23-19-00796/>) using the equipment of the High Technology Centre at BSTU named after V.G. Shukhov.

FOR CITATION: Markova I.Yu., Stepanenko M.A., Strokova V.V., Lukyanenko N.O. Study of the activity of thermal power plant waste from the point of application in mineral binders. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2025; 20(3):409-418. DOI: 10.22227/1997-0935.2025.3.409-418 (rus.).

Corresponding author: Irina Yu. Markova, irishka-31.90@mail.ru.

ВВЕДЕНИЕ

Строительная отрасль является крупнейшим потребителем минеральных сырьевых ресурсов. Объемы производства минеральных вяжущих, получаемых из высококачественного дорогостоящего природного сырья, ежегодно возрастают. Лидирующую позицию среди всех видов вяжущих веществ занимает цемент, так как используется практически во всех областях строительства. Согласно имеющимся данным производство бетонов на основе цемента составляет более 10 млрд м³ в год [1]. Снижение затрат на получение цементного вяжущего возможно за счет использования минеральных компонентов, эквивалентных по своей активности применяемому сырью. Ввиду больших скоплений и, как следствие, необходимости утилизации или повторного применения, интерес представляют отходы в виде золы-уноса (ЗУ) тепловых электростанций (ТЭС), полученные при сжигании различных видов углей. Кроме того, актуальность использования указанных отходов определена реализацией ряда стратегических задач строительной отрасли в целом, дорожно-строительной отрасли в частности, а также энергетической отрасли. Однако этот вид сырья характеризуется непостоянством свойств, что обусловлено влиянием совокупности следующих факторов: состав сжигаемого угля; технология сжигания; технология удаления; условия хранения.

Опыт применения ЗУ в составе цементных систем имеет практически вековую историю, но исследования в этом направлении активно продолжаются [2–6]. На сегодняшний день существует несколько классификаций этих материалов по их активности [7–9], отмечается широкое разнообразие композиций на основе цементных систем с их применением [10–14], разработаны рекомендации по их использованию [7].

В нашей стране применение ЗУ в строительной отрасли регламентируется следующими нормативными документами: ГОСТ Р 56196–2014 «Добавки активные минеральные для цементов. Общие тех-

нические условия»; ГОСТ 25818–2017 «Золы-уноса тепловых электростанций для бетонов. Технические условия»; ГОСТ Р 70196–2022 «Дороги автомобильные общего пользования. Комплексные минеральные вяжущие для стабилизации и укрепления грунтов. Технические условия». Несмотря на богатый опыт изучения отходов ТЭС и сформированную общую методологию их практического применения, использование зол в каждом конкретном случае требует индивидуального подхода с учетом особенностей получения конечного продукта и его заданных свойств.

Форсайт-анализ различных источников относительно определения свойств отходов топливно-энергетических предприятий в виде ЗУ показал, что наиболее значимым среди прочих является их активность. На сегодняшний день известно 9 методов определения активности, регламентируемых как отечественной, так и зарубежной нормативной документацией, а также авторских [7, 15–21]. Все методы условно можно разделить на две основные группы: физико-механические (косвенные) и физико-химические (прямые). Часто применения одного из методов бывает недостаточно в связи с малой информативностью, тогда как комплексный подход позволяет произвести многокритериальную оценку ЗУ в качестве активных компонентов в составе минеральных вяжущих на основе цемента. Так, например, анализ активности ЗУ с применением комплекса физико-механических методов позволил выявить согласованность полученных результатов, определить информативность используемых методик с учетом специфики применения вяжущей системы и их экспрессность. В этой связи представляется актуальным определение активности техногенного сырья в виде зольных отходов ТЭС с применением комплекса физико-химических методов.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В рамках данного исследования объект изучения — алюмосиликатное техногенное сырье в виде

ЗУ различного состава. Зола-уноса Назаровской ТЭС является продуктом сжигания бурого угля Ирша-Бородинского месторождения с применением сухой технологии сжигания и удаления, обладает основным составом — содержание оксида кальция 37,8 %. Зола-уноса Рефтинской ГРЭС — продукт сжигания каменного угля Экибастузского месторождения с применением сухой технологии сжигания и удаления, обладает кислым составом — суммарное содержание оксида алюминия, кремния и железа более 90 %.

Для изучения активности ЗУ физико-химическими методами контрольным образцом служил портландцемент марки ЦЕМ I 42,5 Н производства ЗАО «Белгородский цемент» (г. Белгород, Россия).

Химический и минеральный состав ЗУ представлен в табл. 1, 2. Определение количественного химического и минерально-фазового состава сырья производилось с помощью рентгенофлуоресцентного спектрометра ARL 9900 WorkStation, рентгеновского дифрактометра ARL X'TRA.

Активность ЗУ, как минеральной добавки для вяжущих систем на основе цемента, определялась различными физико-химическими методами.

Содержание свободного оксида кальция ($\text{CaO}_{\text{св}}$) ускоренным методом проводили по стандартной методике, применяемой для ЗУ, в соответствии с ГОСТ 25818–2017.

Тест Фраттини, регламентируемый EN 196-5:2011, предполагает определение концентраций CaO^{2+} и OH^- , содержащихся в портландцементе и исследуемых минеральных добавках. Согласно методике 20 г пробы смешивали со 100 мл воды. Затем

закрытые емкости помещали в сушильный шкаф при 40 °С и хранили 8 сут. После чего растворы охлаждали при комнатной температуре и фильтровали. Далее в 50 мл отфильтрованного раствора добавляли 5 капель индикатора — метилового оранжевого и определяли общую щелочность с помощью 0,1 М HCl . Окончание титрования оценивали визуально в результате изменения цвета с желтого на оранжевый. После титрования в растворы добавляли NaOH для повышения pH среды до 12,5.

Содержание гидроксильной группы рассчитывали по формуле:

$$[\text{OH}^-] = \frac{1000 \cdot 0,1 \cdot V_3 \cdot f_2}{50},$$

где V_3 — объем раствора HCl , используемого для титрования, мл; f_2 — коэффициент 0,1 М раствора HCl .

Концентрацию оксида кальция определяли фотометрическим методом. В растворы добавляли 2–3 капли индикатора эриохром Т, затем помещали в кюветы спектрофотометра. После каждого измерения добавляли раствор этилендиаминтетрауксусной кислоты (ЭДТА) с шагом 0,5 мл, измеряя оптическую плотность при $\lambda = 522$ нм. Построив кривые на графике зависимости объема раствора ЭДТА от полученной оптической плотности, устанавливали пик, характеризующий максимальный объем ЭДТА, использованный для титрования.

Содержание оксида кальция рассчитывали по формуле:

$$[\text{CaO}] = 0,6 \cdot V_4 \cdot f_1,$$

где V_4 — объем раствора ЭДТА, используемого для титрования, мл; f_1 — коэффициент раствора ЭДТА.

Табл. 1. Химический состав ЗУ

Table 1. Chemical composition of fly ash

Производитель зола-уноса Fly ash producer	Содержание оксидов, мас. % / Oxide content, wt. %								
	SiO_2	Al_2O_3	CaO	Fe_2O_3	SO_3	MgO	Na_2O	K_2O	LOI
Назаровская ТЭС Nazarovskaya TPP	31,55	8,84	37,80	8,99	4,40	6,31	0,76	0,20	3,15
Рефтинская ГРЭС Reftinskaya SDPP	60,20	30,92	1,28	3,35	0,15	0,58	0,53	0,75	1,90

Табл. 2. Минерально-фазовый состав ЗУ

Table 2. Mineral-phase composition of fly ash

Производитель зола-уноса Fly ash producer	Содержание компонентов, мас. % / Content of components, wt. %											
	RAS	Кварц Quartz	Мулит Mullit	Магнетит Magnetite	Альбит Albite	Ангидрит Anhydrite	Кальцит Calcite	Портландит Portlandite	Известь Lime	Периклаз Periclase	C_3A	C_4AF
Назаровская ТЭС Nazarovskaya TPP	49,24	7,61	–	1,56	–	7,02	0,69	3,47	4,09	0,85	21,35	4,12
Рефтинская ГРЭС Reftinskaya SDPP	62,6	6,3	25,6	1,8	3,9	–	–	–	–	–	–	–

Активной следует считать добавку, которая находится ниже кривой изотермы растворимости.

Определение концентраций Ca^{2+} и OH^- также производили методом поглощения добавкой извести из известкового раствора. Методика представляет собой упрощенный тест Фраттини и заключается в том, что 1 г добавки добавляли к 75 мл насыщенного раствора извести. Образцы выдерживали в сушильном шкафу при 40 °С в течение 1, 3, 7 и 28 сут для дальнейшего титрования. Расчет Ca^{2+} и OH^- выполняли по методике, указанной в описании теста Фраттини.

Снижение содержания $\text{Ca}(\text{OH})_2$ при взаимодействии с кремнистыми и алюмосиликатными материалами устанавливали методом Чапеля согласно стандарту NF P18-513. По методике 1 г минеральной добавки добавляли к 250 мл дистиллированной воды, содержащей 2 г извести. Смесь непрерывно перемешивали в течение 16 ч при 90 °С. После перемешивания в растворы добавляли по 250 мл сахарозы, перемешивали 10 мин и отбирали для титрования 25 мл каждой пробы.

Пуццолановую активность рассчитывали по формуле:

$$PA = 2 \frac{V_1 - V_2}{V_1} \cdot \frac{74}{56} \cdot 1000,$$

где V_1 — объем HCl , используемый для титрования 25 мл контрольного раствора, мл; V_2 — объем HCl , используемый для титрования 25 мл раствора с добавкой, мл.

Оценку теплоты гидратации цемента с ЗУ проводили посредством дифференциального калориметра с изменяющейся температурой анероида.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Анализ данных о содержании $\text{CaO}_{\text{св}}$ ускоренным методом позволил сделать следующие выводы (табл. 3). По содержанию $\text{CaO}_{\text{св}}$ рассматриваемые материалы существенно отличаются, так ЗУ Назаровской ТЭС содержит 14,05 % $\text{CaO}_{\text{св}}$, что в 7 раз превышает значения, нормируемые ГОСТ 25818–2017, тогда как кислая ЗУ Рефтинской ГРЭС содержит лишь 0,075 % $\text{CaO}_{\text{св}}$. Таким образом, ЗУ Назаровской ТЭС характеризуется высокой активностью. При использовании ее в составе цементных систем следует контролировать сроки схватывания и твердения смесей, так как она может значительно ускорять процессы

структурообразования и приводить к саморазрушению в результате избыточного роста кристаллических структур.

Согласно данным теста Фраттини (рис. 1) с учетом состава исследуемых зол-уноса отмечается логичный результат — ЗУ Рефтинской ГРЭС проявляет пуццолановую активность в 8 и 15 сут за счет высокого содержания рентгеноаморфной фазы, состоящей преимущественно из кремнезема (SiO_2 60,20 %), в то время как цемент и ЗУ Назаровской ТЭС (SiO_2 31,55 %) находятся выше кривой растворимости, что свидетельствует о практическом отсутствии их пуццолановой активности.

По результатам проведенного анализа методом поглощения добавок в виде ЗУ извести из известкового раствора (табл. 4, рис. 2) установлено, что обе добавки обладают высокой способностью к поглощению в первые сутки. При этом наиболее высокой способностью к поглощению характеризуется кислая ЗУ Рефтинской ГРЭС — суммарное значение концентрации поглощенных CaO^{2+} и OH^- более чем на 10 единиц превышает эти значения, характеризующие вяжущее без добавки (цемент) и основную ЗУ Назаровской ТЭС. В дальнейшем на 3-и и 7-и сут процесс поглощения извести золами-уноса характеризуется спадом. Так, по сравнению с цементом концентрация поглощенных CaO^{2+} и OH^- как у основной, так и у кислой золы на 3-и сут ниже в среднем на 50 %, а на 7-е сут — более чем на 60 %. На 28-е сут концентрация поглощенной извести свидетельствует о незначительном повышении показателя, характеризующего цемент по сравнению с 7 сут (практически на 3,5 ммоль/л), тогда как значения исследуемого показателя для добавок в виде ЗУ несколько снижаются (не более чем на 2 ммоль/л). Такой характер поглощения извести из раствора с течением времени закономерен для рассматриваемых ЗУ, учитывая их химический состав. Ввиду своей высокой основности ЗУ Назаровской ТЭС характеризуется относительно невысокой концентрацией поглощенной извести на начальном этапе эксперимента (1-е сут), а с течением времени значения исследуемого показателя плавно снижаются. В случае же с кислой золой, напротив, — на начальном этапе (1-е сут) происходит гораздо более активное поглощение извести, а затем уже на 3-и сут концентрация поглощенных CaO^{2+} и OH^- ниже по сравнению с основной ЗУ. Получен-

Табл. 3. Содержание $\text{CaO}_{\text{св}}$ ускоренным методом

Table 3. The content of CaO_{sv} by the accelerated method

Производитель золы-уноса Fly ash producer	Содержание $\text{CaO}_{\text{св}}$, % / The content of the f- CaO , %	
	Фактические значения Actual values	Норма по ГОСТ 25818–2017 The norm according to GOST 25818–2017
Назаровская ТЭС Nazarovskaya TPP	0,075	–
Рефтинская ГРЭС Refinskaya SDPP	14,050	2

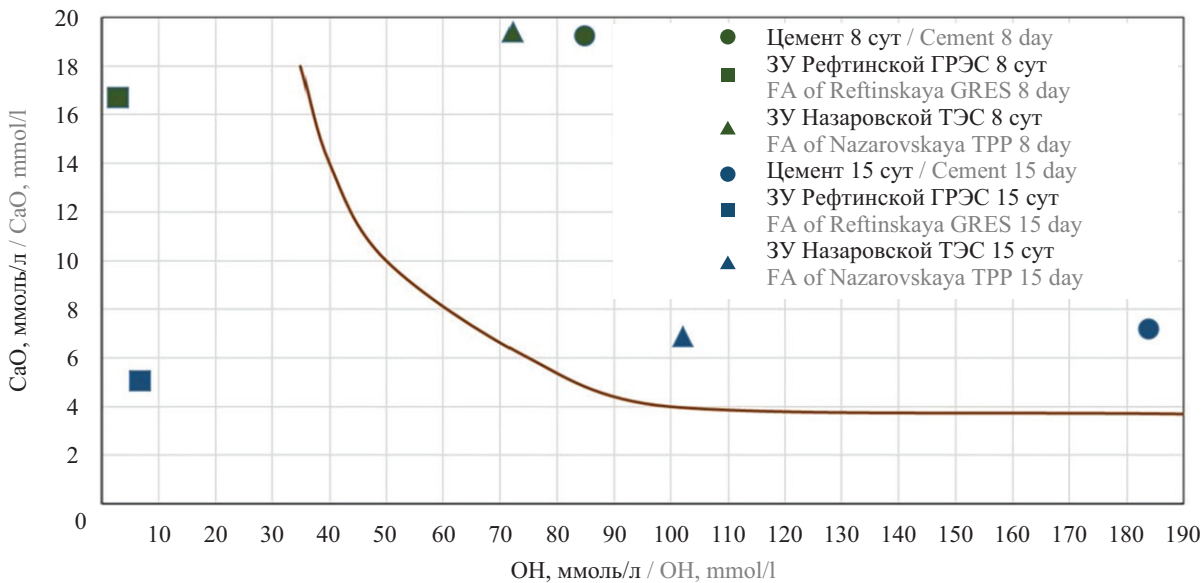


Рис. 1. Результаты теста Фраттини

Fig. 1. Results of the Frattini test

Табл. 4. Определение поглощенного Ca(OH)₂

Table 4. Determination of absorbed Ca(OH)₂

Добавка	Концентрация, ммоль/л / Concentration, mmol/l							
	1		3		7		28	
	ОН ⁻	CaO ²⁺	ОН ⁻	CaO ²⁺	ОН ⁻	CaO ²⁺	ОН ⁻	CaO ²⁺
Цемент / Cement	19,024	4,996	20,336	7,492	29,521	7,493	35,422	4,993
ЗУ Назаровской ТЭС FA of Nazarovskaya TPP	18,368	6,245	16,411	2,498	14,431	2,494	9,841	4,990
ЗУ Рефтинской ГРЭС FA of Reftinskaya SDPP	24,931	7,493	13,124	1,253	5,904	6,245	4,592	6,243

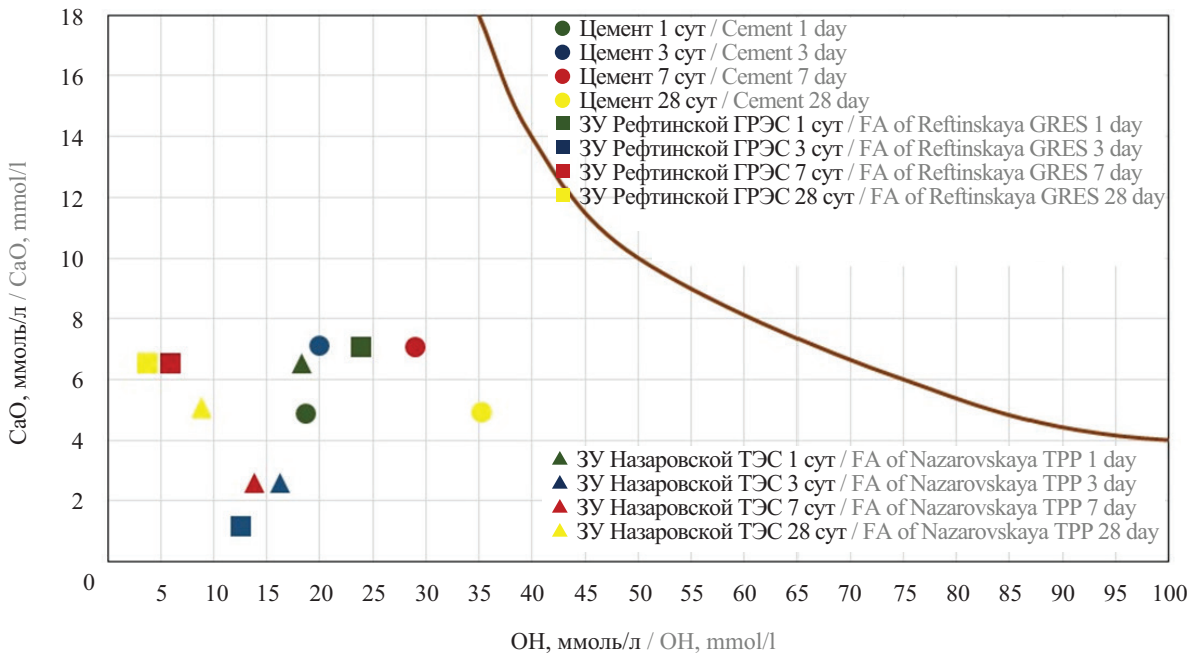


Рис. 2. Определение поглощенного Ca(OH)₂

Fig. 2. Determination of absorbed Ca(OH)₂

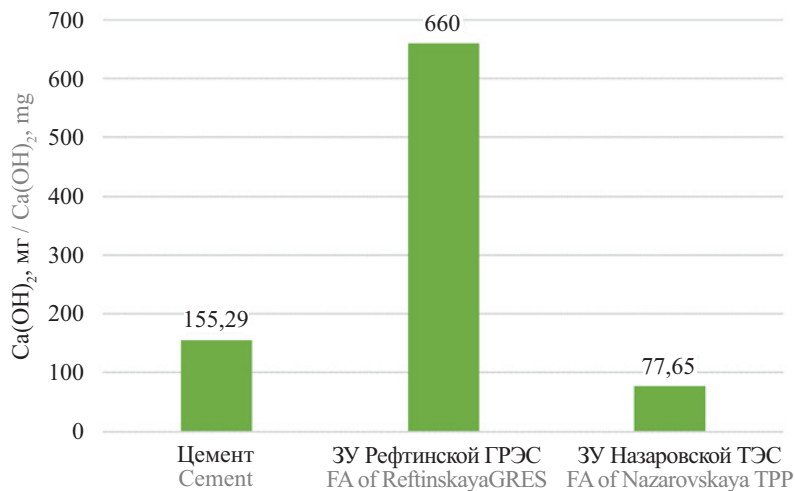


Рис. 3. Результаты пуццолановой активности по тесту Чапеля

Fig. 3. Results of pozzolan activity according to the Chapelle test

ные результаты согласуются с результатами других исследователей.

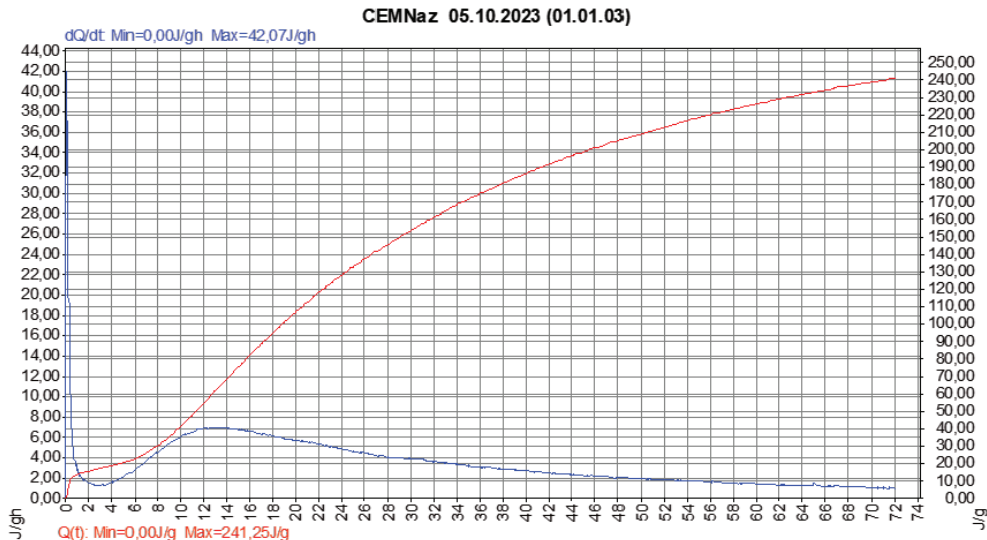
Учитывая специфику метода Чапеля, следует отметить, что применяемый в ходе эксперимента раствор сахарозы обладает способностью растворять алюминатную и ферритную фазу, оставляя силикаты и второстепенные фазы, что может существенно повысить поглощающую способность ЗУ. Так, в результате экспериментальных исследований установлено (рис. 3), что наибольшей активностью обладает кислая ЗУ Рефтинской ГРЭС, количество поглощенного $\text{Ca}(\text{OH})_2$ при изотермическом нагреве для которой в течение 16 ч составило 660 мг, что в 4 раза выше по сравнению с цементом и в 8,5 раз выше по сравнению с основной ЗУ Назаровской ТЭС. Такие значения объясняются тем, что суммарное содержание оксидов алюминия и железа для ЗУ Рефтинской ГРЭС составляет 34,27 %.

Анализ термокинетических кривых процессов гидратации цемента с ЗУ Назаровской ТЭС и Реф-

тинской ГРЭС при температуре 27 °С с длительностью измерений 3 сут показывает основные периоды твердения (рис. 4).

Цемент с ЗУ Назаровской ТЭС после взаимодействия с водой проявляет химическую реакцию (через 21 с), а через 7 мин 22 с фиксируется первый пик тепловыделения 42,07 Дж/г·ч с количеством выделившегося тепла 3,55 Дж/г, обусловленный происходящей гидратацией. Затем скорость тепловыделения снижается до 1,28 Дж/г·ч, что означает окончание первой стадии гидратации и происходит процесс набора прочности. Дальнейший подъем характеризуется ускоренной гидратацией последующим индукционным периодом. Максимальное количество выделившегося тепла наблюдали на 3-и сут — 240,68 Дж/г.

Цемент с ЗУ Рефтинской ГРЭС после взаимодействия с водой проявляет химическую реакцию (через 29 с), а через 7 мин 31 с, так же как у цемента с ЗУ Назаровской ТЭС, фиксируется первый пик тепло-



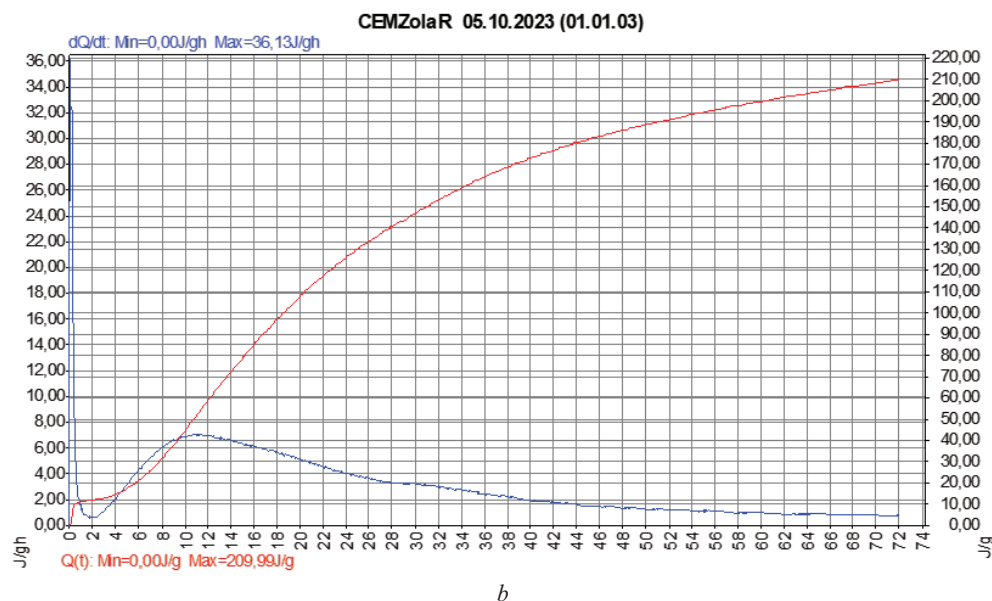


Рис. 4. Теплота гидратации цемента: *a* — с ЗУ Назаровской ТЭС; *b* — с ЗУ Рефтинской ГРЭС

Fig. 4. The heat of hydration of cement: *a* — with fly ash from the Nazarovskaya TPP; *b* — with fly ash from the Reftinskaya SDPP

выделения 36,13 Дж/г·ч с количеством выделившегося тепла 3,11 Дж/г. Затем скорость тепловыделения снижается до 0,56 Дж/г·ч и наступает период схватывания и набор прочности. Также у смеси наблюдали ускоренный процесс гидратации с последующим индукционным периодом. Максимальное количество выделившегося тепла наблюдали на 3-и сут — 209,96 Дж/г.

Применение ЗУ Рефтинской ГРЭС взамен части цемента приводит к меньшему тепловыделению, чем с ЗУ Назаровской ТЭС, что объясняется отсутствием в ее минерально-фазовом составе клинкерных минералов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ результатов экспериментальных исследований активности ЗУ различного состава с применением комплекса физико-химических методик показал, что каждая из применяемых в работе методик позволяет определить различные параметры и дает возможность предусмотреть характер и механизмы взаимодействия техногенного сырья с цементом. На основании комплексной оценки активности отходов ТЭС установлено, что оба они являются активными. В свою очередь, по данным теста Чапеля основная ЗУ Назаровской ТЭС обладает одновременно вяжущими свойствами и в значительно меньшей степени пуццолановой активностью, а кислая ЗУ Рефтинской ГРЭС — лишь пуццолановой активностью.

В виду своей активности ЗУ могут быть использованы как вспомогательные компоненты в составе цементных композиций, так и взамен части цемента при рационально подобранном количестве компонентов с учетом особенностей взаимодействия с продуктами гидратации цемента для обеспечения заданных прочностных характеристик.

Кроме того, по данным методики, регламентированной ГОСТ 25818–2017, содержание $\text{CaO}_{\text{св}}$ у основной ЗУ Назаровской ТЭС в 7 раз превышает предельное значение нормы, что ограничивает ее применение в составе бетонов на основе цемента. Ее применение может повлиять на ускорение сроков твердения цемента и набор прочности. Об этом также свидетельствуют результаты анализа теплоты гидратации пробы цемента с содержанием этой ЗУ. Так, например, для дорожно-строительной отрасли это является весомым фактором, ограничивающим время осуществления технологических операций при устройстве функциональных слоев.

В заключение следует отметить, что для установления возможности и целесообразности применения ЗУ в составе цементных композитов достаточно применения методики, нормируемой отечественным стандартом, однако для определения характера взаимодействия, а также скорости и интенсивности протекания реакций в процессе структурообразования цементной матрицы в присутствии ЗУ необходим комплексный подход.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Володин В.В., Тараканов О.В., Низина Т.А., Кяшкин В.М., Балыков А.С. Гидратация цементных вяжущих с минеральными добавками на основе глинистых и карбонатных пород // Вестник МГСУ. 2024. Т. 19. № 8. С. 1317–1327. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.8.1317-1327. EDN AOVNKP.
2. Бедарев В.В., Бедарев Н.В., Бедарев А.В. Применение золы ТЭС для получения высокопрочных бетонов и снижения расхода цемента // Бетон и железобетон. 2022. № 2 (610). С. 3–7. DOI: 10.31659/0005-9889-2022-610-2-3-7. EDN SLHTXZ.
3. Макаренко С.В., Хохлаков О.В., Хозин В.Г., Беляков А.Ю. Цементы низкой водопотребности — эффективные строительные материалы для утилизации золошлаковых смесей ТЭЦ // Инженерный вестник Дона. 2023. № 10 (106). С. 524–532. EDN QSOEBO.
4. Истомина К.Р., Бургунтдинов А.М., Хусаинова К.А. Возможные технологии использования золы уноса // Транспорт. Транспортные сооружения. Экология. 2022. № 1. С. 36–44. DOI: 10.15593/24111678/2022.01.05. EDN FZTEOA.
5. Strokov V.V., Markova I.Y., Markov A.Y., Stepanenko M.A., Nerovnaya S.V., Bondarenko D.O. et al. Properties of a Composite Cement Binder Using Fuel Ashes // Key Engineering Materials. 2022. Vol. 909 KEM. Pp. 184–190. DOI: 10.4028/p-tm4y4j. EDN DZHXTS.
6. Марков А.Ю., Безродных А.А., Маркова И.Ю., Строкова В.В., Дмитриева Т.В., Степаненко М.А. Прогнозирование прочности портландцемента в присутствии топливных зол // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2020. № 3. С. 26–33. DOI: 10.34031/2071-7318-2020-5-3-26-33. EDN HPFLJZ.
7. Путилин Е.И., Цветков В.С. Применение зол уноса и золошлаковых смесей при строительстве автомобильных дорог: обзорная информация отечественного и зарубежного опыта применения отходов от сжигания твердого топлива на ТЭС. М. : Союздорнии, 2003. 58 с. EDN QNXXJH.
8. Королев Е.В. Нанотехнология в строительном материаловедении. Анализ состояния и достижений. Пути развития // Строительные материалы. 2014. № 11. С. 47. EDN SYSIMT.
9. Галибина Е.А. Классификация пылевидных зол в зависимости от вещественного состава, обеспечивающего их рациональное направление использования для производства строительных материалов // Исследования по строительству. Строительная теплофизика. Долговечность конструкций. Талин, 1981.
10. Кожухова Н.И., Данакин Д.Н., Жерновский И.В. Особенности получения геополимерного газобетона на основе золы-уноса Новотроицкой ТЭЦ // Строительные материалы. 2017. № 1–2. С. 113–117. EDN XXHXF.
11. Choudhary R., Gupta R., Nagar R. Impact on fresh, mechanical, and microstructural properties of high strength self-compacting concrete by marble cutting slurry waste, fly ash, and silica fume // Construction and Building Materials. 2020. Vol. 239. P. 117888. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.117888
12. Лам Т.В., Хунг Н.С., Зиен В.К., Чык Н.Ч., Булгаков Б.И., Баженова О.Ю. и др. Влияние водовяжущего отношения и комплексной органоминеральной добавки на свойства бетона для морских гидротехнических сооружений // Промышленное и гражданское строительство. 2019. № 3. С. 11–21. DOI: 10.33622/0869-7019.2019.03.11-21. EDN ZAHMDZ.
13. Баженов Ю.М., Воронин В.В., Алимов Л.А., Бахрах А.М., Ларсен О.А., Соловьев В.Н. и др. Высококачественные самоуплотняющиеся бетоны с использованием отходов сжигания угля // Вестник МГСУ. 2017. Т. 12. № 12 (111). С. 1385–1391. DOI: 10.22227/1997-0935.2017.12.1385-1391. EDN YMEBXK.
14. Балабанов В.Б., Николаенко В.Л. Композитный материал в укатываемом бетоне // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2011. № 12 (59). С. 119–123. EDN ONXUNB.
15. Ватин Н.И., Петросов Д.В., Калачев А.И., Лахтикен П. Применение зол и золошлаковых отходов в строительстве // Инженерно-строительный журнал. 2011. № 4 (22). С. 16–21. EDN NVYMZJ.
16. Бутт Ю.М., Тимашев В.В. Практикум по химической технологии вяжущих материалов. М. : Высшая школа, 1973. 504 с.
17. Потапова Е.Н., Манушина А.С., Зырянов М.С., Урбанов А.В. Методы определения пуццолановой активности минеральных добавок // Строительные материалы, оборудование, технологии XXI века. 2017. № 7–8 (222–223). С. 29–33. EDN XEFJRN.
18. Ferraz E. Pozzolanic activity of metakaolins by the French Standard of the modified Chapelle Test : a direct methodology // Acta Geodynamica et Geomaterialia. 2015. Pp. 289–298. DOI: 10.13168/agg.2015.0026
19. Dolenec S., Ducman V. Evaluation of ash pozzolanic activity by means of the strength activity index test, Frattini test and DTA/TG Analysis // Technical Gazette. 2018. Vol. 25. Issue 6. DOI: 10.17559/tv-2017-1203193229
20. Шахова Л.Д., Кучеров Д.Е., Аксютин Ю.А., Гридчина А.А. Оценка активности минеральных добавок для композиционных цементов // Сухие строительные смеси. 2012. № 4. С. 29–32. EDN THYERN.
21. Donatello S., Tyrer M., Cheeseman C.R. Comparison of test methods to assess pozzolanic activity // Cement and Concrete Composites. 2010. Vol. 32. Issue 2. Pp. 121–127. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2009.10.008

Поступила в редакцию 22 ноября 2024 г.

Принята в доработанном виде 9 декабря 2024 г.

Одобрена для публикации 31 января 2025 г.

ОБ АВТОРАХ: **Ирина Юрьевна Маркова** — кандидат технических наук, доцент, старший научный сотрудник, Инновационный научно-образовательный и опытно-промышленный центр наноструктурированных композиционных материалов (ИНО и ОПЦ НКМ); **Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова (БГТУ им. В.Г. Шухова)**; 308012, г. Белгород, ул. Костюкова, д. 46; РИНЦ ID: 671668, Scopus: 57216581692, ResearcherID: ABG-4964-2021, ORCID: 0000-0002-7569-1825; irishka-31.90@mail.ru;

Маргарита Андреевна Степаненко — инженер, Инновационный научно-образовательный и опытно-промышленный центр наноструктурированных композиционных материалов (ИНО и ОПЦ НКМ); **Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова (БГТУ им. В.Г. Шухова)**; 308012, г. Белгород, ул. Костюкова, д. 46; РИНЦ ID: 1037561, Scopus: 57216581139, ResearcherID: AAU-6977-2020, ORCID: 0000-0002-4130-5703; stepanenko.rita2017@yandex.ru;

Валерия Валерьевна Строчкова — доктор технических наук, профессор, директор, Инновационный научно-образовательный и опытно-промышленный центр наноструктурированных композиционных материалов (ИНО и ОПЦ НКМ); **Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова (БГТУ им. В.Г. Шухова)**; 308012, г. Белгород, ул. Костюкова, д. 46; РИНЦ ID: 111246, Scopus: 6602722133, ResearcherID: B-5343-2013, ORCID: 0000-0001-6895-4511; vvstrokova@gmail.com;

Никита Олегович Лукьяненко — аспирант; **Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова (БГТУ им. В.Г. Шухова)**; 308012, г. Белгород, ул. Костюкова, д. 46; РИНЦ ID: 1037561; niklu03@gmail.com.

Вклад авторов:

Маркова И.Ю. — идея, концепция исследования, научное редактирование текста, итоговые выводы.

Степаненко М.А. — участие в выполнении экспериментов, анализ и обработка полученных результатов, подготовка исходного текста, итоговые выводы.

Строчкова В.В. — научное руководство, концепция исследования, доработка текста, итоговые выводы.

Лукьяненко Н.О. — участие в выполнении экспериментов, сбор полученных данных, подготовка графического материала, итоговые выводы.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

REFERENCES

1. Volodin V.V., Tarakanov O.V., Nizina T.A., Kyashkin V.M., Balykov A.S. Hydration of cement binders with mineral additives based on clay and carbonate rocks. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2024; 19(8):1317-1327. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.8.1317-1327. EDN AOVNKP. (rus.).
2. Bedarev V.V., Bedarev N.V., Bedarev A.V. The use of thermal power plant ash to produce high-strength concrete and reduce cement consumption. *Concrete and Reinforced Concrete*. 2022; 2(610):3-7. DOI: 10.31659/0005-9889-2022-610-2-3-7. EDN SLHTXZ. (rus.).
3. Makarenko S.V., Khokhryakov O.V., Khozin V.G., Belyakov A.Yu. Low water demand cements are effective building materials for recycling ash and slag waste from thermal power plants. *Engineering journal of Don*. 2023; 10(106):524-532. EDN QSOEBO. (rus.).
4. Istomina K., Burgonutdinov A., Khusainova K. Possible technologies for using fly ash. Transport. Transport Facilities. *Ecology*. 2022; 1:36-44. DOI: 10.15593/24111678/2022.01.05. EDN FZTEOA. (rus.).
5. Strokov V.V., Markova I.Y., Markov A.Y., Stepanenko M.A., Nerovnya S.V., Bondarenko D.O. et al. Properties of a Composite Cement Binder Using Fuel Ashes. *Key Engineering Materials*. 2022; 909 KEM:184-190. DOI: 10.4028/p-tm4y4j. EDN DZHXTC.
6. Markov A., Bezrodnykh A., Markova I., Strokov V., Dmitrieva T., Stepanenko M. Forecasting strength of Portland cement in the presence of fuel ashes. *Bulletin of Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov*. 2020; 3:26-33. DOI: 10.34031/2071-7318-2020-5-3-26-33. EDN HPFLJZ. (rus.).
7. Putlin E.I., Tsvetkov V.S. Use of fly ash and ash-slag mixtures in the construction of highways : a review of domestic and foreign experience in the use of waste from the combustion of solid fuel at thermal power plants. Moscow, Soyuzdornii, 2003; 58. EDN QNXXJH. (rus.).
8. Korolev E.V. Nanotechnology in construction materials science. Analysis of the state and achievements. Development paths. *Construction Materials*. 2014; 11:47. EDN SYSIMT. (rus.).
9. Galibina E.A. Classification of dust ash depending on the material composition, ensuring their rational use for the production of building materials. Research in construction. Construction thermal physics. *Durability of structures*. Talin, 1981. (rus.).

10. Kozhukhova N.I., Danakin D.N., Zhernovsky I.V. Features of producing geopolymeric gas concrete on the basis of fly ash of Novotroitskaya TPS. *Construction Materials*. 2017; 1-2:113-117. EDN XXHXF. (rus.).
11. Choudhary R., Gupta R., Nagar R. Impact on fresh, mechanical, and microstructural properties of high strength self-compacting concrete by marble cutting slurry waste, fly ash, and silica fume. *Construction and Building Materials*. 2020; 239:117888. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.117888
12. Lam T.V., Hung N.X., Dien Vu.K., Chuc N.T., Bulgakov B.I., Bazhenova O.Yu. et al. Effect of water-binder ratio and complex organic-mineral additive on properties of concrete for marine hydrotechnical constructions. *Industrial and Civil Engineering*. 2019; 3:11-21. DOI: 10.33622/0869-7019.2019.03.11-21. EDN ZAHMDZ. (rus.).
13. Bazhenov Yu.M., Voronin V.V., Alimov L.A., Bakhrakh A.M., Larsen O.A., Solov'ev V. N. et al. High-quality self-compacting concrete with coal burning waste. *Vestnik MGSU [Proceedings of the Moscow State University of Civil Engineering]*. 2017; 12(12):(111):1385-1391. DOI: 10.22227/1997-0935.2017.12.1385-1391. EDN YMEBXK. (rus.).
14. Balabanov V., Nikolaenko V. Composite material in rolled concrete. *Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2011; 12(59):119-123. EDN ONXUNB. (rus.).
15. Vatin N.I., Petrosov D.V., Kalachev A.I., Lakhtiken P. Use of ashes and ash and slag waste in construction. *Magazine of Civil Engineering*. 2011; 4(22):16-21. EDN NVYMZJ. (rus.).
16. Butt Yu.M., Timashev V.V. *Practical training in chemical technology of binders*. Moscow, Higher School, 1973; 504. (rus.).
17. Potapova E.N., Manushina A.S., Zyryanov S.M., Urbanov A.V. Methods for determining pozzolanic activity of mineral additives. *Construction materials, equipment, technologies of the XXI century*. 2017; 7-8(222-223): 29-33. EDN XEFJRN. (rus.).
18. Ferraz E. Pozzolanic activity of metakaolins by the French Standard of the modified Chapelle Test : a direct methodology. *Acta Geodynamica et Geomaterialia*. 2015; 289-298. DOI: 10.13168/agg.2015.0026
19. Dolenec S., Ducman V. Evaluation of ash pozzolanic activity by means of the strength activity index test, Frattini test and DTA/TG Analysis. *Technical Gazette*. 2018; 25(6). DOI: 10.17559/tv-20171203193229
20. Shakhova L.D., Kuchero D.E., Aksyutin Yu.A., Gridchina A.A. Evaluation of the activity of mineral additives for the composite cements. *Dry Building Mixtures*. 2012; 4:29-32. EDN THYERN. (rus.).
21. Donatello S., Tyrer M., Cheeseman C.R. Comparison of test methods to assess pozzolanic activity. *Cement and Concrete Composites*. 2010; 32(2):121-127. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2009.10.008

Received November 22, 2024.

Adopted in revised form on December 9, 2024.

Approved for publication on January 31, 2025.

B I O N O T E S: **Irina Yu. Markova** — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Senior Researcher, Innovative Scientific, Educational and Experimental Industrial Center of Nanostructured Composite Materials; **Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov (BSTU named after V.G. Shukhov)**; 46 Kostyukova st., Belgorod, 308012, Russian Federation; ID RSCI: 671668, Scopus: 57216581692, ResearcherID: ABG-4964-2021, ORCID: 0000-0002-7569-1825; irishka-31.90@mail.ru;

Margarita A. Stepanenko — engineer, Innovative Scientific, Educational and Experimental Industrial Center of Nanostructured Composite Materials; **Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov (BSTU named after V.G. Shukhov)**; 46 Kostyukova st., Belgorod, 308012, Russian Federation; ID RSCI: 1037561, Scopus: 57216581139, ResearcherID: AAU-6977-2020, ORCID: 0000-0002-4130-5703; stepanencko.rita2017@yandex.ru;

Valeria V. Strokov — Doctor of Technical Sciences, Professor, Director doctor of sciences (engineering), professor, director, Innovative Scientific, Educational and Experimental Industrial Center of Nanostructured Composite Materials; **Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov (BSTU named after V.G. Shukhov)**; 46 Kostyukova st., Belgorod, 308012, Russian Federation; ID RSCI: 111246, Scopus: 6602722133, ResearcherID: B-5343-2013, ORCID: 0000-0001-6895-4511; vvstrokova@gmail.com;

Nikita O. Lukyanenko — postgraduate student; **Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov (BSTU named after V.G. Shukhov)**; 46 Kostyukova st., Belgorod, 308012, Russian Federation; ID RSCI: 1037561; niklu03@gmail.com.

Contribution of the authors:

Irina Yu. Markova — idea, concept of the study, scientific editing of the text, final conclusions.

Margarita A. Stepanenko — participation in the experiments, analysis and processing of the obtained results, preparation of the original text, final conclusions.

Valeria V. Strokov — scientific supervision, concept of the study, revision of the text, final conclusions.

Nikita O. Lukyanenko — participation in the experiments, collection of the obtained data, preparation of graphic material, final conclusions.

The authors declare no conflict of interest.