

ХИМИЧЕСКАЯ ТЕХНОЛОГИЯ



УДК 691.5:666.943

СИНТЕЗ ГЕОПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИЙ НА ОСНОВЕ ЩЕЛОЧНЫХ ТЕХНОГЕННЫХ ПРОДУКТОВ ТОПЛИВНЫХ СТАНЦИЙ

*Д.Д. Бабаев, В.Б. Петропавловская, Т.Б. Новиченкова,
К.С. Петропавловский, М.Ю. Завадько*

Тверской государственный технический университет (г. Тверь)

© Бабаев Д.Д., Петропавловская В.Б., Новиченкова Т.Б.,
Петропавловский К.С., Завадько М.Ю., 2023

Аннотация. Рассмотрена проблема утилизации отходов, образовавшихся в результате работы тепловых электростанций в России. Основное внимание уделено вопросам переработки и уменьшения воздействия на окружающую среду. В качестве одного из решений предложено использовать инновационные технологии – геополимеры. Рассмотрена прочность на сжатие и изгиб геополимерных растворов с добавлением золы класса С, а также влияние условий отверждения на их характеристики. Авторы предложили новый подход к описанию пористой структуры материалов на основе фрактальной геометрии. Результаты показали, что при оптимальном модуле активатора можно достичь максимальной прочности при сжатии и наименьшей пористости. Описано также использование молотого гранулированного доменного шлака в качестве сырьевых материалов для производства геополимеров с добавлением золы-уноса. Исследовано влияние различных факторов, включая активации различными щелочными растворами и температуры отверждения, на механические свойства получаемых материалов. Проведен анализ разных суперпластификаторов в свете их эффективности в геополимерных системах с низким содержанием кальция, а также их стабильности в щелочных активаторах. Было обнаружено, что степень разложения суперпластификаторов зависит от щелочности раствора активатора.

Ключевые слова: геополимеры, золы ТЭС, доменный гранулированный шлак, щелочная активация, промышленные отходы.

DOI: 10.46573/2658-7459-2023-4-83-90

Невозможно представить современный мир без электричества. Тепловые электростанции (ТЭС) производят электроэнергию, сжигая твердое топливо. В России до сих пор большинство электроэнергии вырабатывается на ТЭС, которые используют уголь в качестве исходного топлива, при этом образуется огромное количество тонн отходов. Так, по разным оценкам, в настоящее время на золоотвалах накоплено 1,4–1,8 млрд тонн отходов от сжигания угля, занимающих площадь около 280 км². Однако объем переработки

таких отходов составляет чуть более 10 %, остальная же часть продолжает храниться в отвалах и тем самым наносится вред окружающей среде и человеку [1–3].

Чтобы уменьшить воздействие отходов ТЭС на окружающую среду и снизить потребность в земле для ее утилизации, в 2012 году правительство Российской Федерации поставило несколько задач в документе «Основы государственной политики в области экологического развития Российской Федерации на период до 2030 года» [4]. Наиболее важными из поставленных задач являются следующие: внедрить экологически эффективные инновационные технологии; предотвратить и снизить текущее негативное воздействие на окружающую среду; обеспечить экологически безопасное обращение с отходами. Их решением мы считаем использование вторичных ресурсов, а именно отходов промышленности, в качестве исходного сырья при синтезе геополлимерных вяжущих. К таким отходам можно отнести золу, доменный шлак, красный шлам, отработанное стекло или некоторые природные минералы и горные породы. Наибольший интерес представляют отходы ТЭС в виде золы из-за проявления в них активных пуццолановых свойств.

В зависимости от способа удаления золы делят:

на золу – уноса сухого улавливания, когда зола, поступающая с электрофильтров и из циклонов ТЭС в золоборники, направляется специальным пневмотранспортом в силосные склады либо непосредственно в транспортные средства потребителей;

золошлаковую смесь гидроудаления, когда при очистке золоборников с помощью воды зола и шлак в виде золопulpы удаляются в отвалы [5].

Зола-уноса (летучая зола) более активна по сравнению с золой гидроудаления, содержит меньше несгоревших частиц и зимой не смерзается. Вместе с тем она имеет серьезные недостатки: пыление, возможное содержание частиц непогасившейся извести, а также относительно большое количество свободной серы. По гранулометрическому и химическому составу золы из отвалов гидроудаления, по данным отечественных исследований, крайне неоднородны [6].

Частицы летучей золы обычно имеют сферическую форму, и их размер варьируется от 0,5 до 100 мкм. Гранулометрический состав существенно различается в зависимости от типа сжигаемого угля, условий, регулирования охлаждения и процесса горения [7].

В ГОСТ 25818-2017 «Золы-уноса тепловых электростанций для бетонов. Технические условия» делят золу-уноса в зависимости от содержания оксида кальция на кислую (оксид кальция до 10 мас. %) и основную (оксид кальция более 10 мас. %) [8]. В других зарубежных стандартах различают два класса золы: С и F. Летучая зола класса F (кислая) – пуццолановая зола, образующаяся при сжигании антрацита или битуминозного угля. Общее количество SiO_2 , Al_2O_3 и Fe_2O_3 должно быть более 70 %. Зола класса С (основная) является пуццолановой и цементирующей, получаемой при сжигании суббитуминозного или бурого угля. Общее количество Fe_2O_3 , Al_2O_3 и SiO_2 должно превышать 50 %. Кроме того, мы можем различать классы С и F на базе процентного содержания СаО, причем класс С составляет более 10 %, а F – менее 10 % [9].

Геополлимеры на основе золы класса С показывают меньшее время схватывания и более высокую прочность при температуре окружающей среды, чем на основе золы класса F благодаря образованию гидрата алюмината кальция в ходе реакции гидратации в раннем возрасте. Однако снижение содержания кальция в геополлимерном растворе может увеличить время схватывания и повысить устойчивость геополлимера к химическому воздействию.

В исследовании [11] был сделан вывод, что прочность на сжатие и изгиб геополлимерных растворов с золой класса С при стандартных условиях отверждения в течение

1 дня с последующим отверждением паром при 60 °С в течение 1 дня составляла 92,7–108,7 % и 88,0–115,1 % от прочности при стандартных условиях отверждения в течение 28 дней.

Авторами данной статьи рассматриваются характеристики, факторы и фрактальные размерности пористой структуры геополимерных материалов, изготовленных на основе золы-уноса, метаксаолина и цемента. Предложен новый подход, основанный на фрактальной геометрии, для более точного описания пористой структуры. Результаты исследования показали, что когда модуль активатора увеличивается до 1,2, щелочность раствора активатора относительно снижается. Это явление приводит к самому высокому содержанию геля и прочности при сжатии, что указывает на оптимальные условия для геополимеризации. При этом конкретном значении модуля активатора наиболее вероятные диаметр пор и пористость являются наименьшими в пределах одной и той же группы образцов, что указывает на наиболее плотную структуру пор. Увеличение концентрации активатора с 25 до 40 % значительно изменит характеристики структуры пор геополимера на основе золы-уноса, содержание геля и прочность на сжатие. В частности, соответствующий наиболее вероятный диаметр пор уменьшается со 112 до 12 нм, соответствующая пористость – на 10%, соответствующее содержание геля увеличивается на 27,47 %, прочность на сжатие соответственно улучшается [12].

Устойчивость к хлоридам важна для долговечности геополимеров, используемых в строительстве, особенно в прибрежных и засоленных районах. В исследовании [13] были изучены обрабатываемость, механические характеристики и стойкость к хлоридам геополимерных растворов на основе летучей золы классов С и F. Авторами был сделан вывод, что более высокая прочность при сжатии вовсе не однозначно указывает на лучшую стойкость к хлоридам. Растворы с низкой прочностью по сравнению с геополимерными растворами высокой и средней прочности демонстрируют отличную стойкость к хлоридам. Количество кристаллических фаз, образовавшихся после погружения в раствор NaCl и воду при 80 °С, было больше, чем до воздействия.

Низкие механические свойства твердеющих геополимеров в окружающей среде более выражены для геополимеров на основе золы-уноса класса F из-за низкого содержания кальция. Чтобы решить данную проблему, авторы работы [14] провели экспериментальное исследование: они смешали золу-уноса класса F с небольшим количеством различных минеральных добавок: кальцита, диоксида кремния и цеолита. Они использовались в бинарной системе с золой-уноса класса F для повышения механических свойств. Результаты подтвердили, что сделанные смеси обладают более высокой прочностью на сжатие и изгиб, чем геополимерные, содержащие только золу-уноса класса F. Диоксид кремния был наиболее эффективной в плане увеличения механических свойств минеральной добавкой. Такие минеральные добавки, как кальцит и цеолит также были действенными, но цеолит оказывал большее воздействие на механические свойства геополимерного раствора на основе золы-уноса класса F при отверждении в окружающей среде.

Один из множества сырьевых материалов для производства геополимеров из золы-уноса – это шлак. Более высокое содержание CaO в таких геополимерах способствует образованию C-(A)-S-H, а это может повысить их прочность и долговечность. В настоящее время шлак используется для улучшения обрабатываемости и механических свойств геополимеров на основе зол [15, 16].

Молотый гранулированный доменный шлак является еще одним побочным продуктом с высокой долей стеклообразной фазы, богатой кремнием, глиноземом и

аморфным кальцием, что делает его пригодным для применения в качестве сырья для синтеза геополимеров. Был изучен синергетический эффект бинарных золошлаковых композиций (в соотношении 50/50), активированных NaOH, отвержденных при 25 °С и достигших значений механической прочности при сжатии около 50 МПа через 28 дней реакции. Кроме того, активированные золошлаковые пасты с NaOH были исследованы с минеральной, механической и микроструктурной точек зрения. Полученные результаты продемонстрировали наличие двух продуктов для взаимодействия. Продукт реакции с $Ca / Si = 0,8$, $Al / Ca = 0,6$ и $Si / Al = 2-3$ соответствует гидратированному гелю, богатому Al^{3+} , включающему в свою структуру Na. Другим продуктом гидратации является щелочной алюмосиликат с трехмерной структурой [17, 18].

Авторы работы [19] изучали синергический эффект геополимера на основе летучей золы и шлака при их различных соотношениях (от 20 до 60 мас. %), активированного тремя растворами NaOH (0,5, 1 и 1,5%-м соответственно). Экспериментальные образцы были отверждены через 1, 3, 7 и 28 дней. Было замечено, что с увеличением содержания шлака в геополимере возрастает сопротивление сжатию, что приводит к оптимальной прочности при сжатии около 93 МПа.

В работе [20] было изучено влияние 5 мас. % μ -известняка в смесях гранулированного доменного шлака и золы-уноса, активированных гидроксидом натрия (NaOH) в различных концентрациях, для оценки физических свойств в свежем и затвердевшем состояниях. Добавление μ -известняка изменило заявленные значения прочности при сжатии (с 20 до 45 МПа за 28 дней). С помощью метода атомной абсорбции было обнаружено, что $CaCO_3$ μ -известняка растворился в NaOH, осадив $Ca(OH)_2$ в качестве продукта реакции. Анализ SEM-EDS показал химическое взаимодействие гелей C-A-S-H- и N-A-S-H-типа с $Ca(OH)_2$, образующих гели (N, C)A-S-H- и C-(N)-A-S-H-типа, улучшающие механические характеристики и микроструктурные свойства. Добавление μ -известняка оказалось перспективной и дешевой альтернативой, способствующей улучшению свойств щелочного цемента с низкой молярностью, поскольку оно помогло превысить рекомендованное действующими нормативами для обычного цемента значение, равное 20 МПа.

Основной проблемой при использовании композиционных вяжущих является их огромная потребность в воде, обусловленная высокой тонкостью и удельной поверхностью, что увеличивает вязкость и предел текучести вяжущих. Обычно суперпластификаторы, такие как поликарбоксилатные эфиры или поликонденсаты, применяются для контроля и корректировки термических свойств вяжущих материалов. Когда в вяжущих системах используются суперпластификаторы, между ними и вяжущим возникает адсорбционная конкуренция за суперпластификатор [21, 22].

В работе [23] было систематически изучены различные суперпластификаторы (поликарбоксилатного, метакрилатного, изопренолового и металилового эфира) с точки зрения их стабильности в различных щелочных активаторах (NaOH, KOH, растворах силикатов натрия и калия). Эффективность суперпластификаторов в геополимерных вяжущих с низким содержанием кальция была подтверждена реологическими испытаниями. Исследованные суперпластификаторы показали загущающий эффект в геополимерной системе с указанным содержанием кальция. В зависимости от щелочности раствора активатора у всех изученных суперпластификаторов был обнаружен процесс разложения. Боковые цепи суперпластификаторов отщепляются от основной цепи путем гидролиза основного сложного эфира и простого. Наибольшая степень разложения была

обнаружена в растворах силикатов натрия и калия. В щелочных растворах гидроксида процесс разложения усиливается с повышением щелочности.

Хотелось бы еще раз отметить, что Россия продолжает активно использовать уголь для выработки электроэнергии, однако это приводит к образованию большого количества отходов, занимающих значительные территории и представляющих угрозу для окружающей среды и здоровья человека. Одним из возможных решений данной проблемы является применение вторичных ресурсов, в том числе переработка отходов ТЭС для минимизации негативного воздействия этих отходов на экологию.

Зола-уноса и зола гидроудаления имеют каждая свои преимущества и недостатки. Зола-уноса более активна и содержит меньше несгоревших частиц; ее недостатками являются пыление и возможное содержание непогасившейся извести. Геополимеры на основе основной золы (класса С) быстрее схватываются и обладают более высокой прочностью при комнатной температуре, чем геополимеры на кислой золе (класса F) благодаря образованию гидрата алюмината кальция. Однако геополимеры на основе кислой золы характеризуются более высокой прочностью при повышенных температурах и лучшей стойкостью к коррозии.

Молотый гранулированный доменный шлак также может использоваться как сырье для синтеза геополимеров благодаря высокому содержанию в нем стеклообразной фазы, содержащей кремний, глинозем и аморфный кальций. Шлак применяется для улучшения обрабатываемости и механических свойств геополимеров, так как высокое содержание в нем СаО способствует образованию С-(А)-S-H.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Досмухамедов Н.К., Каплан В.А., Даруеш Г.С. Инновационная технология комплексной переработки золы от сжигания угля // *Уголь*. № 1. С. 58–63.
2. Осокин Н.А., Золотова И.Ю., Никитушкина Ю.В. Снижение антропогенного воздействия дорожного строительства за счет применения золошлаковых отходов // *Экономическая наука современной России*. 2022. № 1 (96). С. 81–93.
3. Пичугин Е.А. Аналитический обзор накопленного в Российской Федерации опыта вовлечения в хозяйственный оборот золошлаковых отходов теплоэлектростанций // *Проблемы региональной экологии*. 2019. № 4. С. 77–87.
4. Основы государственной политики в области экологического развития Российской Федерации на период до 2030 года [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://legalacts.ru/doc/osnovy-gosudarstvennoi-politiki-v-oblasti-ekologicheskogo-razvitiya/> (дата обращения: 06.07.2023).
5. Барыбина Т.А., Голубничий А.А. Применение золошлаковых отходов в строительстве автомобильных дорог на территории РФ // *Форум молодых ученых*. 2017. № 6 (10). С. 134–138.
6. Кошмамат У.К. Перспективы использования вторичного сырья угольной золы тепловых электростанций в строительстве // *Территория науки*. 2016. № 5. С. 40–45.
7. Yousuf A., Manzoor S.O., Youssouf M., Malik Z., Khawaja K.S. Fly Ash: Production and Utilization in India – An Overview // *Journal of Materials and Environmental Science*. 2020. № 11, pp. 911–921.
8. ГОСТ 25818-2017. Золоуноса тепловых электростанций для бетонов. Технические условия [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.status-grunt.ru/upload/bases/26.pdf> (дата обращения: 06.07.2023).

9. Alterary S., Marei N. Fly Ash properties, characterization, and applications: a review // *Journal of King Saud University – Science*. 2021. № 33 (6), p. 101536. URL: https://www.researchgate.net/publication/353033690_Fly_Ash_properties_characterization_and_applications_a_review (дата обращения: 06.07.2023).
10. Nuaklong P., Wongs A., Sata V., Boonserm K., Sanjayan J., Chindaprasirt P. Properties of high-calcium and low-calcium fly ash combination geopolymer mortar containing recycled aggregate // *Heliyon*. 2019. № 5 (9), p. 02513. URL: https://www.researchgate.net/publication/336138519_Properties_of_high-calcium_and_low-calcium_fly_ash_combination_geopolymer_mortar_containing_recycled_aggregate (дата обращения: 06.07.2023).
11. Li X., Wang Z., Jiao Z. Influence of Curing on the Strength Development of Calcium-Containing Geopolymer Mortar // *Materials*. 2013. № 6 (11), pp. 5069–5076.
12. Yang Y., Wang B., Yuan Q., Huang D., Peng H. Characterization, Factors, and Fractal Dimension of Pore Structure of Fly Ash-based Geopolymers // *Journal of Materials Research and Technology*. 2023. № 26, pp. 3395–3407.
13. Zhenzhen J., Xueying L., Qinglin Y., Qinqin Y., Xinchun G., Ping H. Chloride Resistance of Class C/class F Fly Ash-based Geopolymer Mortars with Different Strength Grades // *Case Studies in Construction Materials*. 2023. № 18.
14. Öztürk O. Binary Use of F-Class Fly-ash with Different Aluminosilicates for the Improved Mechanical Properties of Ambient-Cured Geopolymer Mortars // *International Conference on Cement-based Materials Tailored for a Sustainable Future*. In the honour of Prof. Surendra P. Shah and Prof. Turan Özturan. İstanbul. URL: https://www.researchgate.net/publication/352381585_Binary_Use_of_F-Class_Fly-ash_with_Different_Aluminosilicates_for_the_Improved_Mechanical_Properties_of_Ambient-Cured_Geopolymer_Mortars (дата обращения: 06.07.2023).
15. Dehghani A., Aslani F., Panah N.G. Effects of initial $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ molar ratio and slag on fly ash-based ambient cured geopolymer properties // *Construction and Building Materials*. 2021. № 293 (7). URL: https://www.researchgate.net/publication/351512122_Effects_of_initial_SiO2_Al2O3_molar_ratio_and_slag_on_fly_ash-based_ambient_cured_geopolymer_properties (дата обращения: 06.07.2023).
16. Puertas F., Martínez-Ramírez S., Alonso S., Vázquez T. Alkali-activated fly ash/slag cements: Strength behaviour and hydration products // *Cement and Concrete Research*. 2000. URL: <https://www.semanticscholar.org/paper/Alkali-activated-fly-ash-slag-cements%3A-Strength-and-Puertas-Mart%C3%ADnez-Ram%C3%ADrez/cd9a282ef654b0ac0cd7403a7fc70b0eb11545df> (дата обращения: 06.07.2023).
17. Aydın S., Baradan B. Effect of activator type and content on properties of alkali-activated slag mortars // *Composites. Part B: Engineering*. 2014. № 57, pp. 166–172.
18. Rafeet A., Vinai R., Soutsos M., Wei S. Guidelines for Mix Proportioning of Fly Ash/GGBS Based Alkali Activated Concretes // *Construction and Building Materials*. 2017. № 147, pp. 130–142.
19. Wang W.-C., Wang H.-Y., Lo M.-H. The Fresh and Engineering Properties of Alkali Activated Slag as a Function of Fly Ash replacement and Alkali Concentration // *Construction and Building Materials*. 2015. № 84, pp. 224–229.
20. Vázquez-Rodríguez F., Elizondo N., Montes-González M., Rodríguez C., González-Carranza Y., Guzman A.M., Rodríguez E.A. Microstructural and Mechanical Characteristics of Alkali-Activated Binders Composed of Milled Fly Ash and Granulated Blast Furnace Slag with μ -Limestone Addition [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.researchgate.net/>

publication/370864676_Microstructural_and_Mechanical_Characteristics_of_Alkali-Activated_Binders_Composed_of_Milled_Fly_Ash_and_Granulated_Blast_Furnace_Slag_with_-Limestone_Addition (дата обращения: 07.07.2023).

21. Lei L., Chan H.-K. Investigation into the molecular design and plasticizing effectiveness of HPEG-based superplasticizers in alkali-activated slag [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.researchgate.net/publication/342337887_Investigation_into_the_molecular_design_and_plasticizing_effectiveness_of_HPEG-based_polycarboxylate_superplasticizers_in_alkali-activated_slag (дата обращения: 07.07.2023).

22. Lei L., Zhang Y. Preparation of isoprenol ether-based polycarboxylate superplasticizers with exceptional dispersing power in alkali-activated slag: Comparison with ordinary Portland cement // *Composites. Part B: Engineering*. 2021. № 223, p. 109077. URL: <https://www.sci-hub.ru/10.1016/J.COMPOSITESB.2021.109077> (дата обращения: 07.07.2023).

23. Partschefeld S., Tatal A., Halmanseder T., Schneider J., Dimmig-Osburg A. Investigations on Stability of Polycarboxylate Superplasticizers in Alkaline Activators for Geopolymer Binders // *Materials*. 2023. URL: https://www.researchgate.net/publication/372768266_Investigations_on_Stability_of_Polycarboxylate_Superplasticizers_in_Alkaline_Activators_for_Geopolymer_Binders (дата обращения: 07.07.2023).

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

БАБАЕВ Даниил Дмитриевич – магистрант, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», 170026, Россия, г. Тверь, наб. А. Никитина, д. 22. E-mail: dr.d1708@yandex.ru

ПЕТРОПАВЛОВСКАЯ Виктория Борисовна – доктор технических наук, профессор кафедры производства строительных изделий и конструкций, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», 170026, Россия, г. Тверь, наб. А. Никитина, д. 22. E-mail: victoriapetrov@gmail.com

НОВИЧЕНКОВА Татьяна Борисовна – кандидат технических наук, доцент кафедры производства строительных изделий и конструкций, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», 170026, Россия, г. Тверь, наб. А. Никитина, д. 22. E-mail: tanovi.69@mail.ru

ПЕТРОПАВЛОВСКИЙ Кирилл Сергеевич – кандидат технических наук, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», 170026, Россия, г. Тверь, наб. А. Никитина, д. 22. E-mail: kspetrovavlovsky@gmail.com

ЗАВАДЬКО Мария Юрьевна – кандидат технических наук, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», 170026, Россия, г. Тверь, наб. А. Никитина, д. 22. E-mail: 79043517876@yandex.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКАЯ ССЫЛКА

Бабаев Д.Д., Петропавловская В.Б., Новиченкова Т.Б., Петропавловский К.С., Завадько М.Ю. Синтез геополимерных композиций на основе щелочных техногенных продуктов топливных станций // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии». 2023. № 4 (20). С. 83–90.

**SYNTHESIS OF GEOPOLYMER COMPOSITIONS BASED
ON ALKALINE TECHNOGENIC PRODUCTS OF FUEL STATIONS**

*D.D. Babaev, V.B. Petropavlovskaya, T.B. Novichenkova
K.S. Petropavlovskii, M.Yu. Zavadko
Tver State Technical University (Tver)*

Abstract. The problem of waste disposal resulting from the operation of thermal power plants in Russia is considered. The main attention is paid to the issues of recycling and reducing the impact on the environment. As one of the solutions, it is proposed to use innovative technologies – geopolymers. The compressive and bending strength of geopolymer solutions with the addition of ash of class C, as well as the effect of curing conditions on their characteristics, are considered. The authors proposed a new approach to the description of the porous structure of materials based on fractal geometry. The results showed that with an optimal activator module, maximum compressive strength and the lowest porosity can be achieved. The use of ground granulated blast furnace slag as raw materials for the production of geopolymers with the addition of fly ash is also described. The influence of various factors, including activation by various alkaline solutions and the curing temperature, on the mechanical properties of the obtained materials has been investigated.

Keywords: geopolymers, CHP ash, blast furnace granular slag, alkaline activation, industrial waste.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

BABAEV Daniil Dmitrievich – Master's Student, Tver State Technical University, 22, embankment of A. Nikitin, Tver, 170026, Russia. E-mail: dr.d1708@yandex.ru

PETROPAVLOVSKAYA Viktoriya Borisovna – Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Building Materials and Structures, Tver State Technical University, 22, embankment of A. Nikitin, Tver, 170026, Russia. E-mail: victoriapetrop@gmail.com

NOVICHENKOVA Tatiana Borisovna – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Production of Building Products and Structures, Tver State Technical University, 22, embankment of A. Nikitin, Tver, 170026, Russia. E-mail: tanovi.69@mail.ru

PETROPAVLOVSKII Kirill Sergeevich – Candidate of Technical Sciences, Researcher of the Department of Biotechnology, Chemistry and Standardization, Tver State Technical University, 22, embankment of A. Nikitin, Tver, 170026, Russia. E-mail: kspetropavlovsky@gmail.com

ZAVADKO Maria Yurievna – Candidate of Technical Sciences, Tver State Technical University, 22, embankment of A. Nikitin, Tver, 170026, Russia. E-mail: 79043517876@yandex.ru

CITATION FOR AN ARTICLE

Babaev D.D., Petropavlovskaya V.B., Novichenkova T.B., Petropavlovskii K.S., Zavadko M.Yu. Synthesis of geopolymer compositions based on alkaline technogenic products of fuel stations // Vestnik of Tver State Technical University. Series «Building. Electrical engineering and chemical technology». 2023. No. 4 (20), pp. 83–90.