

Научная статья
УДК 666
DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2026-23-1-90-101>
EDN: WSYLVR



КОМПОЗИЦИИ НА ОСНОВЕ ЗОЛОШЛАКОВЫХ ОТХОДОВ ТЭЦ И СИЛИКАТА НАТРИЯ

А.А. Решетова, Э.Н. Медведева ✉, Е.Л. Усова, М.С. Плесовских, О.И. Королева
Тюменский индустриальный университет,
г. Тюмень, Россия
✉ ответственный автор
medvedevaen1@tyuiu.ru

АННОТАЦИЯ

Введение. Главная идея экономики замкнутого цикла заключается в максимальном вовлечении отходов промышленности в производство материалов и снижении доли вовлечения природных ресурсов. Золошлаковые отходы (ЗШО), образующиеся при сгорании угля на теплоэнергетических станциях и складированные в золоотвалах, представляют собой перспективное вторичное сырье для получения искусственных керамических заполнителей.

Материалы и методы. В данной работе исследованы физико-химические свойства ЗШО и подобран оптимальный состав на их основе с применением водного раствора силиката натрия в качестве связующего. Методом пластического формования получены цилиндрические образцы, которые были обожжены при температуре 900–1000.

Результаты. Установлено, что с применением в качестве связующего водного раствора силиката натрия с массовой долей 25% можно получить методом пластического формования образцы с прочностью на сжатие 7–9 МПа и средней плотностью 1200–1250 кг/м³, при температуре обжига 950–1000°C. Полученные характеристики указывают на потенциальную пригодность материала в качестве искусственного керамического заполнителя для бетона.

Обсуждение и заключение. Данный состав впоследствии планируется опробовать в качестве легкого заполнителя в составе бетона.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: экономика замкнутого цикла, золошлаковые отходы, искусственный заполнитель, жидкое стекло, силикат натрия, связующий компонент

Статья поступила в редакцию 27.11.2025; одобрена после рецензирования 21.01.2026; принята к публикации 16.02.2026.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Прозрачность финансовой деятельности: авторы не имеют финансовой заинтересованности в представленных материалах и методах. Конфликт интересов отсутствует.

Для цитирования: Решетова А.А., Медведева Э.Н., Усова Е.Л., Плесовских М.С., Королева О.И. Композиции на основе золошлаковых отходов ТЭЦ и силиката натрия // Вестник СибАДИ. 2026. Т. 23, № 1. С. 90-101. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2026-23-1-90-101>

© Решетова А.А., Медведева Э.Н., Усова Е.Л., Плесовских М.С., Королева О.И., 2026



Контент доступен под лицензией
Creative Commons Attribution 4.0 License.

Original article
DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2026-23-1-90-101>
EDN: WSYLVR

COMPOSITIONS BASED ON ASH AND SLAG WASTE FROM THERMAL POWER PLANTS AND SODIUM SILICATE

Antonina A. Reshetova, Elza N. Medvedeva ✉, **Elena L. Usova, Maksim S. Plesovskih, Olga I. Koroleva**
Industrial University of Tyumen,
Tyumen, Russia
✉ corresponding author
medvedevaen1@tyuiu.ru

ABSTRACT

Introduction. The main idea of the circular economy is to maximize the use of industrial wastes in the production of materials and reduce the use of natural resources. Ash and slag wastes (ASW), generated during coal firing at thermal power plants and stored in ash-disposal dumps is a promising secondary raw material for the production of artificial ceramic aggregates.

Materials and methods. This study investigates the physicochemical properties of ASW classified as Class F according to ASTM C618, an optimal composition based on these wastes is determined, aqueous sodium silicate solution being used as a binder. Cylindrical samples are produced by plastic molding and fired at temperatures of 900–1000°C.

Results. It has been established that using 25% aqueous sodium silicate solution as a binder by plastic molding can produce samples with a compressive strength of 7–9 MPa and density of 1200–1250 kg/m³ at firing temperatures of 950–1000°C. These characteristics indicate the material's potential suitability as an artificial ceramic aggregate for concrete.

Discussion and conclusion. Further research implies testing this composition as lightweight aggregate in concrete.

KEYWORDS: circular economy, ash and slag wastes, artificial aggregate, liquid glass, sodium silicate, binder

The article was submitted: November 27, 2025; approved after reviewing: January 21, 2026; accepted for publication: February 16, 2026.

All authors have read and approved the final manuscript.

Financial transparency: the authors have no financial interest in the presented materials or methods. There is no conflict of interest.

For citation. Reshetova A.A., Medvedeva E.N., Usova E.L., Plesovskih M.S., Koroleva O.I. Compositions based on ash and slag wastes from thermal power plants and sodium silicate. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2026; 23 (1): 90–101. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2026-23-1-90-101>

© Reshetova Antonina A., Medvedeva Elza N., Usova Elena L., Plesovskih Maksim S., Koroleva Olga I., 2026



Content is available under the license
Creative Commons Attribution 4.0 License.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время в мировой практике повторно используется не более 16% золы, полученной от сгорания угля на тепловых электростанциях (ТЭС) [1]. Зола-уноса применяется в качестве компонента для получения различных строительных материалов [2, 3, 4, 5, 6], стеклокерамики [7], керамики на основе карбида кремния [8], в дорожном покрытии [9] в катализе [10, 11], для мелиорации почвы [12], очистки вод от катионов тяжелых металлов [11, 13], синтеза цеолитов [14, 15, 16] и извлечения оксида алюминия [17]. Согласно оценке, представленной в работе [1], к 2030 г. спрос на золу-уноса превысит в 2 раза по сравнению с фактическим объемом получения в 14 млн т. Данное обстоятельство заставляет вовлекать в производство не только золу-уноса, но и золошлаковые отходы, хранящиеся в золоотвалах.

Область применения золы-уноса и золошлаковых отходов определяется их химическим и минералогическим составом. В разных странах существуют различные классификации золы от сгорания угля. В работе [18] представлена обобщенная классификация золы от сгорания угля. Наиболее распространенной является классификация ASTM C618, согласно которой золы по химическому составу подразделяются на классы F и C по суммарному содержанию $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ и уровню CaO. Стандарт ASTM C618 регламентирует применение летучей золы в составах бетонов в качестве непосредственной добавки и не затрагивает золошлаковые отходы, хотя его критерии классификации по содержанию оксидов $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ и CaO используются в зарубежной научной литературе для конкретизации алюмосиликатного состава золы и золошлаковых смесей.

В России для золы-уноса, а также шлаков и золошлаковых смесей тепловых электростанций (ТЭС), вводимых в состав бетона в виде добавок без обжига, действует ГОСТ 25592–2019, а для обжиговых технологий с участием отходов ТЭС применим ГОСТ Р 57789–2017.

Повторное использование золы и золошлаковых материалов в качестве перспективного сырьевого источника соответствует идее экономики замкнутого цикла, цель которой заключается в максимальном вовлечении отходов промышленности в производство новых материалов и снижении доли применения природных ресурсов.

Одним из самых материалоемких отраслей является строительство, где наиболее вос-

требуемым материалом значится бетон на основе цемента [19]. Производство цемента является весьма энергозатратным и сопряжено с большими выбросами углекислого газа в атмосферу [20]. Поэтому замена цемента в составах строительных материалов другими компонентами, в частности золой-уноса, способствует снижению экологической нагрузки, а также себестоимости продукции.

Существует два альтернативных способа введения золы в состав цементных изделий:

- замена собственно цемента золой (применяют золы с высоким содержанием CaO);
- введение пористых заполнителей (применяют золы с низким содержанием CaO).

Пористые заполнители подразделяются на природные, такие как пемза, вулканический туф, отходы деревообрабатывающей промышленности (опил, щепа, стружка) и т.д., и искусственные, представляющие собой вспененный полистирол, пеностекло, керамзитовый гравий и песок [21, 22, 23, 24].

Перспективным является использование пористых заполнителей в составе бетонов при малоэтажном строительстве. Пористый гравий любой природы позволяет улучшить теплотехнические характеристики материала и снизить нагрузку на конструкцию. Керамический заполнитель обладает огнестойкостью и имеет преимущество перед щебнем, который состоит из минералов с различным температурным расширением, что может привести к растрескиванию материала при высоких температурах [25].

Таким образом, цель данного исследования – разработка составов керамического заполнителя на основе золошлаковых отходов ТЭС с применением водного раствора силиката натрия в качестве связующего компонента, а также изучение физико-механических характеристик для потенциального применения в качестве искусственного заполнителя в конструкционных или конструкционно-композиционных бетонах.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В технологии производства керамического заполнителя были использованы золошлаковые отходы Томской ГРЭС-2 (ЗШО). Пробы были отобраны из 5 точек из золоотвала, находящегося рядом с р. Ушайкой. Для оценки пригодности ЗШО определены гранулометрический, минералогический и химический составы, а также была оценена морфология частиц.

Распределение частиц по размерам ЗШО определяли с помощью лазерного анализатора частиц (ANALYSETTE 22 NeXT Nano).

Минералогический состав ЗШО установили методом рентгенофазового анализа на дифрактометре ДРОН-6 при 40 кВ и 40 мА, излучением CuK α с фильтром Ni (k 1,5406 Å).

Морфологию частиц золошлакового материала исследовали с помощью сканирующего электронного микроскопа Jeol JCM-6000 с EDS-приставкой, при помощи которой энергодисперсионным анализом определили элементный состав материала, а по нему рассчитали оксидный состав ЗШО.

Дальнейшее исследование заключалось в подборе оптимальной концентрации силиката натрия в качестве связующего компонента для формирования образцов пористого заполнителя. Готовились водные растворы силиката натрия с массовой долей 5, 10, 25, 50%. С этой целью в состав золошлакового материала в количестве 30 г вводили растворы силиката натрия различной концентрацией объемом 17 мл. В работе использовали силикат натрия фирмы «ОПТИМАСТЕР» (г. Пермь) с плотностью 1,470 г/см³ и силикатным модулем 2,5.

Для каждого состава с содержанием раствора силиката натрия в количестве 5, 10, 25 и 50 мас.% методом пластического формования были изготовлены цилиндрические образцы диаметром и высотой 20 мм (по 5 параллельных образцов на каждый состав и температуру обжига).

Для установления оптимальной концентрации силиката натрия на сухих образцах определяли прочность на сжатие. Образцы с оптимальной прочностью в сухом состоянии обжигались при температурах 900, 950, 1000 °С. После обжига на полученных образ-

цах определяли величину водопоглощения, прочность на сжатие на приборе ПРГ-50.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Рентгенофазовый анализ золошлаковых отходов ТЭС (рисунок 1) выявил наличие кристаллических фаз кварца (JCPDS Card No. 46-1045), муллита (JCPDS Card No. 15-0776) и гематита (JCPDS Card 000-33-0664), а также в интервале углов $2\theta=20-30$ фиксируется широкое диффузионное гало, что свидетельствует о большом присутствии аморфной стеклофазы. Полученные данные хорошо согласуются с данными фазового состава золы, представленные в работах [26, 27, 28].

Микроструктура ЗШО, исследуемая методом сканирующей электронной микроскопии (рисунок 2), состоит из частиц микросфер различного диаметра и частиц неправильной формы. Микросферы имеют гладкую поверхность и представляют собой алюмосиликатное стекло, образующееся при расплавлении породы в печи. Частицы неправильной формы представляют собой остатки несгоревшего угля либо частицы тугоплавких веществ. Полученные данные хорошо согласуются с данными в работе [29].

Энергодисперсионный анализ позволил установить оксидный состав ЗШО: 48–52%, 36–40%, – 3–6%, CaO < 5%, все остальное приходится преимущественно на примесные оксиды щелочных металлов (Na₂O, K₂O).

Потери массы при прокаливании составили около 11 мас.%, что обусловлено сгоранием остаточного угля (несгоревшего топлива) и органических веществ. Содержание соединений серы, в т.ч. сульфидной серы в данной работе не определялось.

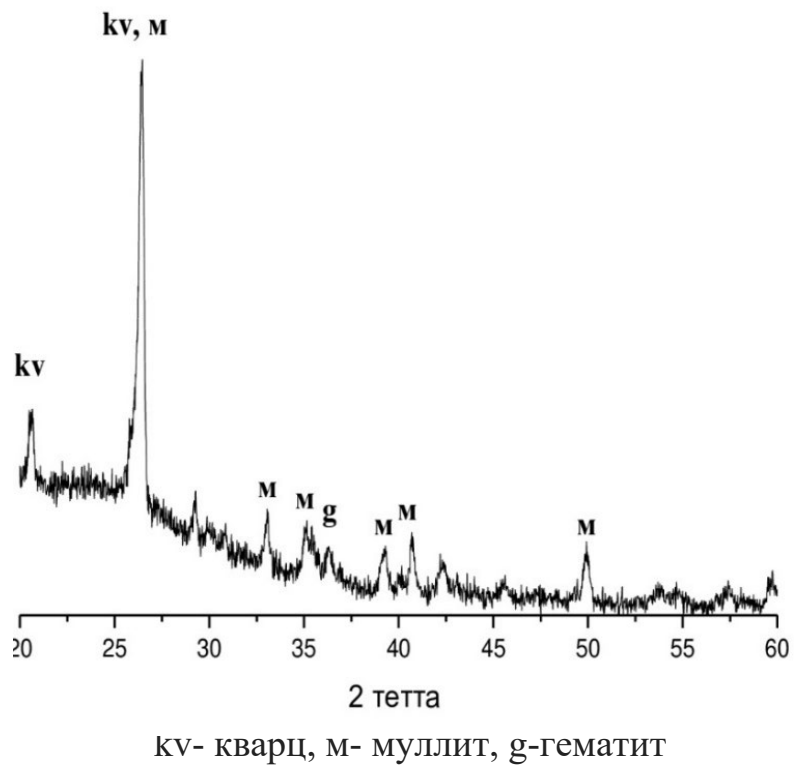


Рисунок 1 – Рентгеновская дифрактограмма исследуемого золошлакового материала
Источник: составлено авторами.

Figure 1 – X-ray diffraction pattern of the ash and slag material under study
Source: compiled by the authors.

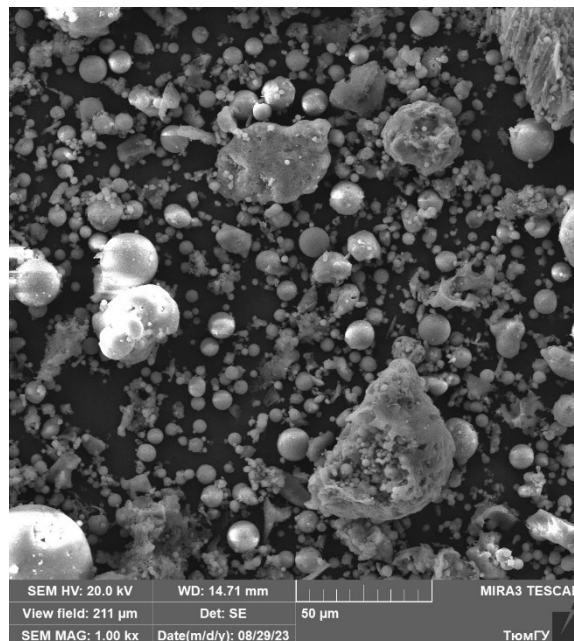


Рисунок 2 – СЕМ снимок золошлакового материала
Источник: составлено авторами.

Figure 2 – Scanning electron microscope image of ash and slag material
Source: compiled by the authors.

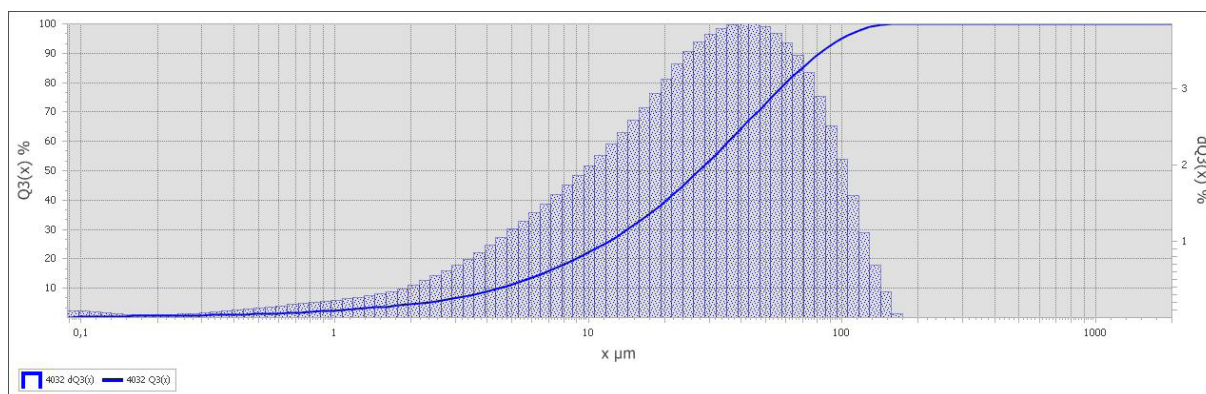


Рисунок 3 – Гранулометрический состав исследуемых ЗШО
Источник: составлено авторами.

Figure 3 – Granulometric composition of the ash and slag waste
Source: compiled by the authors.

Гранулометрический состав золошлакового материала (рисунок 3) позволил установить средний диаметр частиц ЗШО порядка 27 мкм.

Технология получения пористого керамического заполнителя на основе ЗШО включает следующие стадии: сушка ЗШО, при необходимости измельчение, введение связующего компонента, формование гранул, сушки и обжига гранул [30].

Основываясь на полученных данных гранулометрического состава ЗШО (средний диаметр частиц порядка 27 мкм, см. рисунок 3), было установлено, что возможно исключить стадию измельчения материала на подготовительном этапе.

В качестве связующего компонента использовали водный раствор силиката натрия вводимого в количестве 5, 10, 25 и 50 мас.%. Из полученных шихт методом пластического формования были изготовлены цилиндрические образцы диаметром и высотой 20 мм (по 5 образцов на каждый состав). С целью прогнозирования поведения гранулированного материала при транспортировке в печь обжига на сухих цилиндрах определялась прочность на сжатие. Как показано на рисунке 4 прочность сухих образцов закономерно увеличивается при увеличении количества силиката натрия в составе связки, одновременно при этом увеличивается и время сушки материала, что удлиняет цикл получения заполнителя.



Рисунок 4 – Зависимость прочности сухих образцов от концентрации силиката натрия в связке
Источник: составлено авторами.

Figure 4 – Dependence between dry samples strength and sodium silicate concentration in the binder
Source: compiled by the authors.

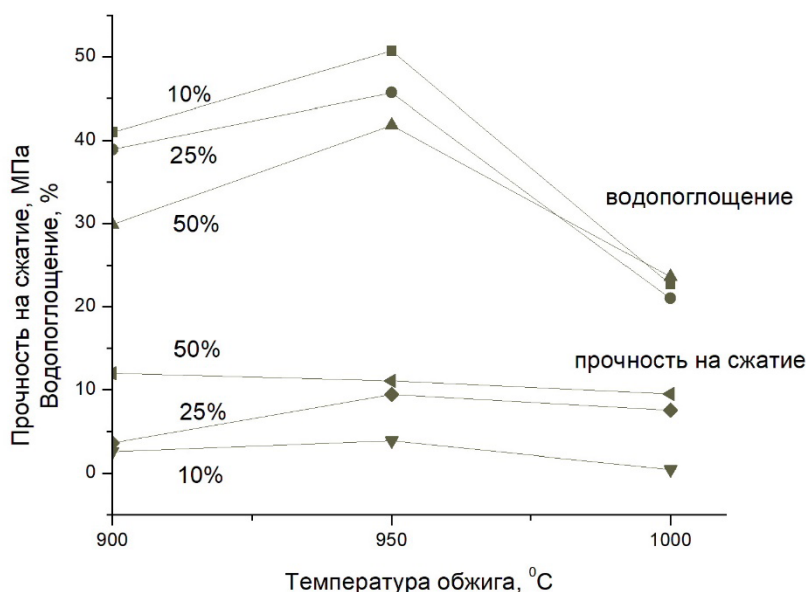


Рисунок 5 – Зависимость величины водопоглощения и прочности на сжатие от температуры спекания и концентрации силиката натрия в составе связки
Источник: составлено авторами.

Figure 5 – Dependence between water absorption, compressive strength and sintering temperature, sodium silicate concentration in the binder
Source: compiled by the authors.

Для последующего обжига были отобраны составы, полученные на связке с концентрациями силиката натрия 10, 25, 50%. Зависимости прочности на сжатие и величины водопоглощения от количества силиката натрия в составе связки при различных температурах обжига представлены на рисунке 5.

Как видно из полученных зависимостей, содержание в составе связки силиката натрия сказывается на свойствах композиций.

Наибольшая разница в величине водопоглощения исследуемых составов отмечается при температуре 900 и 950 °C и практически имеет сопоставимое значение при 1000 °C. При одной и той же температуре обжига составы с меньшей концентрацией силиката натрия имеют большее значение величины водопоглощения. При повышении температуры обжига от 900 до 950 у всех составов отмечается максимальное значение водопоглощения в диапазоне 42–53%, что возможно связано со снижением вязкости образующегося расплава в совокупности с интенсивным выделением газообразных веществ, в т.ч. от сгорания угля.

Образцы, приготовленные с содержанием 50% силиката натрия и обожженные при 1000 °C, имеют оплавленную поверхность. В то время как образцы, содержащие меньше сили-

ката натрия в составе связки, имеют шероховатую поверхность при той же температуре.

Исследование зависимости прочности образцов от температуры обжига и концентрации силиката натрия в связующем показало, что при одинаковых температурах обжига прочность составов увеличивается с увеличением концентрации силиката натрия.

Изменения прочности образцов во всем интервале температур спекания (900–1000 °C) показало, что прочность образцов с различным содержанием силиката натрия практически не изменяется за исключением состава, содержащего 25%. В данном составе прочность образцов при температуре 900 °C сопоставима с составом с меньшим содержанием силиката натрия, а при температуре 950 и 1000 °C прочность сопоставима с прочностью составов с более высоким содержанием силиката натрия. Для составов, полученных при содержании силиката натрия в связующем компоненте 25% и обожженных при температуре 950 и 1000 °C была определена средняя плотность, которая составила 1200 и 1250 кг/м³ соответственно.

ОБСУЖДЕНИЕ

Исследования химико-минералогического состава и морфологии частиц ЗШО подтвер-

дили алюмосиликатный состав с низким содержанием оксида железа, а также щелочных и щелочноземельных оксидов. Содержание следующих оксидов соответствует требованиям ГОСТ Р 57789–2017. Имеются отклонения по содержанию оксида алюминия (36–40%) и количества несгоревшего топлива, оцененного по потере при прокаливании, которая составила около 11%. В ГОСТ Р 57789–2017 предусмотрено отклонение для оксида свыше 20% и для остаточного углерода до 15% в случае получения высокопрочных заполнителей, зольного аглопорита. Таким образом, исследуемый ЗШО, несмотря на отклонения от рекомендуемых значений, соответствует требованиям ГОСТ Р 57789–2017, что предопределяет его применение в качестве сырьевого источника для получения искусственных пористых заполнителей.

Введение в виде связующего вводного раствора силиката натрия разной концентрации на стадии формования образцов оказывает существенный упрочняющий эффект с увеличением содержания силиката натрия до концентрации 50%. Данный факт связан с увеличением солевых мостиков силиката натрия при высыхании связующего. Оптимальное содержание силиката натрия в составе связки должно находиться в пределах 25 мас.%, т.к. повышение количества связки приводит к росту прочности изделия, но способствует появлению излишка связующего на поверхности образцов. Это увеличивает вероятность слипания гранул в процессе гранулирования и при транспортировке, а меньшее количество силиката натрия может привести к разрушению гранул при транспортировке до стадии обжига.

Исследование процесса спекания полученных образцов показал, что увеличение содержания силиката натрия также положительно сказывается на упрочнении и уплотнении образцов. При температуре обжига 950 °С наблюдается рост значения водопоглощения у всех образцов. Данное обстоятельство можно объяснить тем, что при температуре 900 °С образуется расплав, в результате активизируется процесс спекания образцов, и с увеличением температуры до 950 °С количество расплава увеличивается, а его вязкость понижается. Одновременно с этим в массиве образца происходит выделение оксида углерода, молекулы которого разрывают маловязкий расплав и, как следствие, увеличивается открытая пористость образцов. Увеличение температуры обжига до 1000 °С сопровождается дальнейшим

ростом доли расплава и частичного закрытия пор, о чем свидетельствует снижение величины водопоглощения. Оплавление поверхности образцов, полученных с применением связки силиката натрия 50%, косвенно свидетельствует о взаимодействии силиката натрия с кремнеземистыми компонентами золошлакового материала и появлении легкоплавких эвтектик.

Содержание силиката натрия в составе связки существенным образом сказывается на увеличении прочностных характеристик изделий во всем диапазоне температур обжига. При температуре обжига 1000 °С у всех составов наблюдается незначительное снижение прочности, что связано с увеличением доли стеклофазы, по которой, как правило, и идет разрушение материала. При этом необходимо отметить, что прочность образцов при температуре обжига 950 °С, содержащих в составе связки 25 и 50% силиката натрия, отличаются не более чем на 20%, что вероятней всего связано с увеличением количества расплава в составе образцов. Достаточно высокие значения водопоглощения у всех составов при температуре обжига 1000 °С свидетельствуют о незавершении процесса спекания, однако дальнейшее повышение температуры экономически нецелесообразно. В работе [31] авторы приводят информацию, что наличие открытой пористости является преимуществом, т.к. раствор цемента может проникать в поры заполнителя и скреплять его, что также дает увеличение прочности. Таким образом, высокая открытая пористость может потенциально способствовать улучшению сцепления с цементным камнем, но данный аспект в этой работе не исследовался и требует дальнейшего изучения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе был разработан состав керамического заполнителя на основе золошлаковых отходов ТЭС с применением водного раствора силиката натрия в качестве связующего компонента, а также изучены физико-механические характеристики для потенциального применения в качестве искусственного заполнителя в бетонах.

Установлено, что по химическому составу ЗШО пригоден для получения искусственных пористых заполнителей.

Учитывая гранулометрический состав ЗШО (средний размер частиц составляет 27 мкм) возможно исключить стадию предварительного измельчения в технологическом цикле.

Установлено, что оптимальной концентрацией водного раствора силиката натрия является 25%, что обеспечивает достаточную прочность образцов, необходимую для транспортировки сухих образцов, кроме того отсутствие избытка связующего на поверхности снижает риск слипания гранул.

При температуре обжига 950 °С всех составов наблюдается максимальное значение водопоглощения до 40–53%, что связано с влиянием пониженной вязкости расплава и интенсивного газовыделения из-за сгорания остаточного углерода, находящегося в составе ЗШО.

Установлено, что с применением в качестве связующего водного раствора силиката натрия с массовой долей 25% можно получить методом пластического формования образцы с прочностью на сжатие 7–9 МПа и средней плотностью 1200–1250 кг/м³, при температуре обжига 950–1000 °С. Полученные характеристики указывают на потенциальную пригодность материала в качестве искусственного керамического заполнителя для бетона. Данный состав впоследствии планируется опробовать в качестве легкого заполнителя в составе бетона.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Baran P., Sobala J., Szczurowski J., Zarębska K. Management of fly ash to synthesise geopolymers and zeolites // *Energies*. 2023. Т. 16. №. 23: С. 7888. <https://doi.org/10.3390/en16237888>
2. Dash S., Panda L., Mohanty I., Gupta P. Comparative feasibility analysis of fly ash bricks, clay bricks and fly ash incorporated clay bricks // *Magazine of Civil Engineering*. 2022. Т. 115. №. 7: С. 11502. <https://doi.org/10.34910/MCE.115.2>
3. Nayak D.K., Abhilash P.P., Singh R., Kumar R., Kumar V. Fly ash for sustainable construction: A review of fly ash concrete and its beneficial use case studies // *Cleaner Materials*. 2022. Т. 6: С. 100143. <https://doi.org/10.1016/j.clema.2022.100143>
4. Tian Y., Bourtsalas A., Kawashima Sh., Themelis N.J. Using Waste-to-Energy Fine-Combined Ash as Sand or Cement Substitute in Cement Mortar // *Journal of Materials in Civil Engineering*. 2023. Т. 35. №. 11: С. 04023378. <https://doi.org/10.1061/JMCEE7.MTENG-15684>
5. Tian Y. Characterization, stabilization, and utilization of waste-to-energy residues in civil engineering applications. Columbia University, 2022.
6. Vakalova T.V., Revva I. B. Highly porous building ceramics based on «clay-ash microspheres» and «zeolite-ash microspheres» mixtures // *Construction and Building Materials*. 2022. Т. 317: С. 125922. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.125922>
7. Zeng L., Sun H., Peng T., Hui T. Effect of glass content on sintering kinetics, microstructure and mechanical properties of glass-ceramics from coal fly ash and waste glass // *Materials Chemistry and Physics*. 2021. Т. 260: С. 124120. <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2020.124120>
8. Пак А.Я., Губин В.Е., Мамонтов Г.Я. Получение керамики на основе карбида кремния из золошлаковых отходов // *Письма в Журнал технической физики*. 2020. Т. 46, №. 14. С. 21–24. doi.org/10.21883/PJTF.2020.14.49661.18302
9. Zimar Z., Robert D., Zhou A., Giustozzi F., Setunge S., Kodikara J. Application of coal fly ash in pavement subgrade stabilisation: A review // *Journal of Environmental Management*. 2022. Т.312: С. 114926. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.114926>
10. Czuma N., Zarębska K., Motak M., Gálvez M.E., Patrick Da Costa. Ni/zeolite X derived from fly ash as catalysts for CO₂ methanation // *Fuel*. 2020. Т. 267. С. 117139. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.117139>
11. Ochedi F.O., Liu Y., Hussain A. A review on coal fly ash-based adsorbents for mercury and arsenic removal // *Journal of cleaner production*. 2020. Т. 267: С. 122143. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.122143>
12. Estevam S.T., de Aquino, T.F., da Silva, T.D. et al. Synthesis of K-Merlinoite zeolite from coal fly ash for fertilizer application. *Braz. J. Chem. Eng.* 39, 631–643 2022. <https://doi.org/10.1007/s43153-021-00172-9>
13. Усова, Е. Л., Решетова, А. А., Полещук, И. Н., Пимнева, Л. А. Исследование адсорбции ионов меди, никеля и цинка на цеолитсодержащем сорбенте, синтезированном из отходов ТЭС // *Сорбционные и хроматографические процессы*. 2023. Т. 23, № 6. С. 1034–1041. <https://doi.org/10.17308/sorpchrom.2023.23/11864>
14. Кутихина, Е. А., Верещагина, Т. А., Мазурова, Е. В., Буйко, О. В., Фоменко, Е. В., & Аншиц, А. Г. Синтез цеолитных материалов на основе дисперсных микросфер из летучих зол от сжигания угля и их сорбционные свойства в отношении Pb (II) и Cd (II) // *Сорбционные и хроматографические процессы*. 2023. Т. 23, № 5. С. 837–847. <https://doi.org/10.17308/sorpchrom.2023.23/11718>
15. Котова О.Б., Шабалин И.Л., Котова Е.Л. Фазовые трансформации в технологиях синтеза и сорбционные свойства цеолитов из угольной золы-уноса // *Записки горного института*. 2016. Т. 220: С. 526–531. <https://doi.org/10.18454/PMI.2016.4.526>
16. Moudar J., El Fami N., Diouri A., Taibi M. Identification and characterization of faujasite zeolite phase in alkali activated class F fly ash // *Materials Today: Proceedings*. 2022. Т. 58: С. 1447–1451. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.02.475>
17. Liu C., Zheng Sh., Ma Sh., Luo Y., Ding J., Wang X., Zhang Y. A novel process to enrich alumina and prepare silica nanoparticles from high-alumina fly ash // *Fuel Processing Technology*. 2018. Т. 173: С. 40–47. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2018.01.007>
18. Kelly R.P. Parallels and Nonconformities in Worldwide Fly Ash Classification: The Need for a Robust, Universal Classification System for Fly Ash. In *Proceedings of the World of Coal Ash (WOCA) Conference, Nashville, TN, USA, 5–7 May 2015*.

19. Berredjem L., Arabi N., Molez L. Mechanical and durability properties of concrete based on recycled coarse and fine aggregates produced from demolished concrete // *Construction and Building Materials*. 2020. T. 246: C. 118421. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118421>
20. Bekkeri G.B., Shetty K.K., Nayak G. Producing of alkali-activated artificial aggregates by pelletization of fly ash, slag, and seashell powder // *Innovative Infrastructure Solutions*. 2023. T. 8. №. 10: C. 258. doi.org/10.1007/s41062-023-01227-1
21. Uthaichotirat P., Sukontasukkul P., Jitsangiam P., Suksiripattanapong Ch., Sata V., Chindaprasirt P. Thermal and sound properties of concrete mixed with high porous aggregates from manufacturing waste impregnated with phase change material // *Journal of Building Engineering*. 2020. T. 29. C. 101111. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2019.101111>
22. Pasupathy K., Ramakrishnan S., Sanjayan J. Enhancing the mechanical and thermal properties of aerated geopolymer concrete using porous lightweight aggregates // *Construction and Building Materials*. 2020. T. 264: C. 120713. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120713>
23. Schumacher K., Saßmannshausen N., Pritzel Ch., Trettin R. Lightweight aggregate concrete with an open structure and a porous matrix with an improved ratio of compressive strength to dry density // *Construction and Building Materials*. 2020. T. 264.:C. 120167. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120167>
24. Kangning L., ChunYuan J., Tianyi Y., Dingqi-ang F., Juntao K., Yu Rui. Enhancement of impact resistance for low water/binder cementitious composites (LWBCC) based on porous aggregate: from the perspective of macroscopic and microscopic // *Construction and Building Materials*. 2023. T. 376: C. 130952. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.130952>
25. Sahoo S., Selvaraju A. K. Mechanical characterization of structural lightweight aggregate concrete made with sintered fly ash aggregates and synthetic fibres // *Cement and Concrete Composites*. 2020. T. 113: C. 103712. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2020.103712>
26. Gollakota A. R. K., Volli V., Shu C. M. Progressive utilisation prospects of coal fly ash: A review // *Science of the Total Environment*. 2019. T. 672: C. 951–989. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.03.337>
27. Ma B., Su Ch., Ren X., Gao Z., Qian F., Yang W., Liu G., Li H., Yu J., Zhu Q. Preparation and properties of porous mullite ceramics with high-closed porosity and high strength from fly ash via reaction synthesis process // *Journal of Alloys and Compounds*. 2019. (803): C. 981–991. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2019.06.272>
28. Shao P., Hou H., Wenlon Wang, Wenfeng Wang. Geochemistry and mineralogy of fly ash from the high-alumina coal, Datong Coalfield, Shanxi, China // *Ore Geology Reviews*. 2023. T. 158: C. 105476. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2023.105476>
29. Fidanchevski E., Angjusheva B., Jovanov V., Murtanovski P., Vladiceska L., Aluloska N.S., Nikolic J., Ipavec A., Šter K., Mrak M., Dolenc S. Technical and radiological characterisation of fly ash and bottom ash from thermal power plant // *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*. 2021. T. 330: C. 685–694. <https://doi.org/10.1007/s10967-021-07980-w>
30. Zhuginisov Ж., Rakhmetulla A., Oraltayeva, A. Analytical review of research on the technology of light aggregates based on natural and man-made raw materials. *Engineering Journal of Satbayev University*. 2021. T. 143(6), 123–128. <https://doi.org/10.51301/vest.su.2021.i6.16>
31. Romero, M.; Padilla, I.; García Calvo, J.L.; Carballosa, P.; Pedrosa, F.; López-Delgado, A. Development of Lightweight Mortars Using Sustainable Low-Density Glass Aggregates from Secondary Raw Materials. // *Materials*. 2023. T.16, №. 18: p. 6281. <https://doi.org/10.3390/ma16186281>

REFERENCES

1. Baran P., Sobala J., Szczurowski J., Zarębska K. Management of Fly Ash to Synthesise Geopolymers and Zeolites. *Energies*. 2023. № 23 (16). C. 7888. <https://doi.org/10.3390/en16237888>
2. Dash S., Panda L., Mohanty I., Gupta P. Comparative feasibility analysis of fly ash bricks, clay bricks and fly ash incorporated clay bricks 2022. <https://doi.org/10.34910/MCE.115.2>
3. Nayak D. K., Abhilash P.P., Singh R., Kumar R., Kumar V. Fly ash for sustainable construction: A review of fly ash concrete and its beneficial use case studies. *Cleaner Materials*. 2022. (6). C. 100143. <https://doi.org/10.1016/j.clema.2022.100143>
4. Tian Y. Bourtsalas A., Kawashima Sh., Themelis N.J. Using Waste-to-Energy Fine-Combined Ash as Sand or Cement Substitute in Cement Mortar. *Journal of Materials in Civil Engineering*. 2023. № 11 (35). C. 04023378. <https://doi.org/10.1061/JMCEE7.MTENG-15684>
5. Tian Yixi Characterization, Stabilization, and Utilization of Waste-to-Energy Residues in Civil Engineering Applications. 2022
6. Vakalova T.V., Revva I. B. Highly porous building ceramics based on «clay-ash microspheres» and «zeolite-ash microspheres» mixtures. *Construction and Building Materials*. 2022. (317). C. 125922. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.125922>
7. Zeng L., Sun H., Peng T., Hui T. Effect of glass content on sintering kinetics, microstructure and mechanical properties of glass-ceramics from coal fly ash and waste glass. *Materials Chemistry and Physics*. 2021. (260). C. 124120. <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2020.124120>
8. Pak A.Y., Gubin V. E., Mamontov G. Ya. Poluchenie keramiki na osnove karbida kremniya iz zoloshlakovykh otkhodov // *Pisma v zhurnal tekhnicheskoy fiziki*. 2020. No. 14 (46). S. 21. [Production of Silicon Carbide-Based Ceramics from Ash and Slag Waste]. *Letters to the Journal of Technical Physics*. 2020. No. 14 (46). P. 21. (In Russ.) doi.org/10.21883/PJTF.2020.14.49661.18302

9. Zimar Z., Robert D., Zhou A., Giustozzi F., Setunge S., Kodikara J. Application of coal fly ash in pavement subgrade stabilisation: A review // *Journal of Environmental Management*. 2022. T.312: C. 114926. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.114926>
10. Czuma N., Zarębska K., Motak M., Gálvez M.E., Patrick Da Costa. Ni/zeolite X derived from fly ash as catalysts for CO₂ methanation // *Fuel*. 2020. T. 267. C. 117139. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.117139>
11. Ochedi F.O., Liu Y., Hussain A. A review on coal fly ash-based adsorbents for mercury and arsenic removal. *Journal of Cleaner Production*. 2020. (267). C. 122143. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.122143>
12. Estevam S.T. [and others]. Synthesis of K-Merlinoite zeolite from coal fly ash for fertilizer application. *Brazilian Journal of Chemical Engineering*. 2022. № 3 (39). C. 631–643. <https://doi.org/10.1007/s43153-021-00172-9>
13. Usova E.L., Reshetova A.A., Poleshchukl.N., Pimneva L.A. Study of thead sorption-of copper, nickel and zinc ionsonzeolite-containing sorbent synthesized from thermal power plant waste. *Sorbtsionnyei khromatograficheskie protsessy*. 2023.23(6):1034-1041. (In Russ.) <https://doi.org/10.17308/sorp-chrom.2023.23/11864>.
14. Kutikhina E.A., Vereshchagina T.A., Mazurova E.V., Buyko O.V., Fomenko E.V., Anshits A.G. Syn-thesis of zeolite materials based on dispersed microspheres from fly ash from coal combustion and their sorption prop-erties in relation to Pb(II) and Cd(II). *Sorbtsionnye i khromatograficheskie protsessy*. 2023. 23(5): 837-847. (In Russ.). <https://doi.org/10.17308/sorpchrom.2023.23/11718>
15. Kotova O.B., Shabalin I.L., Kotova E.L. Phase transformations in synthesis technologies and sorption properties of zeolites from coal fly ash. *Journal of Mining Institute*. 2016. Vol. 220: p. 526. (In Russ.) <https://doi.org/10.18454/PMI.2016.4.526>
16. Moudar J., El Fami N., Diouri A., Taibi M. Identification and characterization of faujasite zeolite phase in alkali activated class F fly ash // *Materials Today: Proceedings*. 2022. T. 58: C. 1447-1451. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.02.475>
17. Liu C., Zheng Sh., Ma Sh., Luo Y., Ding J., Wang X., Zhang Y. A novel process to enrich alumina and prepare silica nanoparticles from high-alumina fly ash // *Fuel Processing Technology*. 2018. T. 173: C. 40-47. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2018.01.007>
18. Kelly R.P. Parallels and Nonconformities in Worldwide Fly Ash Classification: The Need for a Robust, Universal Classification System for Fly Ash. *In Proceedings of the World of Coal Ash (WOCA) Conference, Nashville, TN, USA, 5–7 May 2015*. (In Russ.)
19. Berredjem L., Arabi N., Molez L. Mechanical and durability properties of concrete based on recycled coarse and fine aggregates produced from demolished concrete // *Construction and Building Materials*. 2020. T. 246: C. 118421. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118421>
20. Bekkeri G.B., Shetty K.K., Nayak G. Producing of alkali-activated artificial aggregates by pelletization of fly ash, slag, and seashell powder // *Innovative Infrastructure Solutions*. 2023. T. 8. №. 10: C. 258. <https://doi.org/10.1007/s41062-023-01227-1>
21. Uthaichotirat P., Sukontasukkul P., Jitsangiam P., Suksiripattanapong Ch., Sata V., Chindaprasirt P. Thermal and sound properties of concrete mixed with high porous aggregates from manufacturing waste impregnated with phase change material // *Journal of Building Engineering*. 2020. T. 29. C. 101111. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2019.101111>
22. Pasupathy K., Ramakrishnan S., Sanjayan J. Enhancing the mechanical and thermal properties of aerated geopolymer concrete using porous lightweight aggregates // *Construction and Building Materials*. 2020. T. 264: C. 120713. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120713>
23. Schumacher K., Saßmannshausen N., Pritzel Ch., Trettin R. Lightweight aggregate concrete with an open structure and a porous matrix with an improved ratio of compressive strength to dry density // *Construction and Building Materials*. 2020. T. 264.:C. 120167. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120167>
24. Kangning L., ChunYuan J., Tianyi Y., Dingqiang F., Juntao K., Yu Rui. Enhancement of impact resistance for low water/binder cementitious composites (LWBCC) based on porous aggregate: from the perspective of macroscopic and microscopic // *Construction and Building Materials*. 2023. T. 376: C. 130952. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.130952>
25. Sahoo S., Selvaraju A. K. Mechanical characterization of structural lightweight aggregate concrete made with sintered fly ash aggregates and synthetic fibres // *Cement and Concrete Composites*. 2020. T. 113: C. 103712. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2020.103712>
26. Gollakota A. R. K., Volli V., Shu C. M. Progressive utilisation prospects of coal fly ash: A review // *Science of the Total Environment*. 2019. T. 672: C. 951-989. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.03.337>
27. Ma B., Su Ch., Ren X., Gao Z., Qian F., Yang W., Liu G., Li H., Yu J., Zhu Q. Preparation and properties of porous mullite ceramics with high-closed porosity and high strength from fly ash via reaction synthesis process // *Journal of Alloys and Compounds*. 2019. (803): C. 981–991. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2019.06.272>
28. Shao P., Hou H., Wenlon Wang, Wenfeng Wang. Geochemistry and mineralogy of fly ash from the high-alumina coal, Datong Coalfield, Shanxi, China // *Ore Geology Reviews*. 2023. T. 158: C. 105476. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2023.105476>
29. Fidanchevski E., Angjusheva B., Jovanov V., Murtanovski P., Vladiceska L., Aluloska N.S., Nikolic J., Ipavec A., Šter K., Mrak M., Dolenc S. Technical and radiological characterisation of fly ash and bottom ash from thermal power plant // *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*. 2021. T. 330: C. 685-694. <https://doi.org/10.1007/s10967-021-07980-w>
30. Zhuginisov Ж., Rakhmetulla A., Oraltayeva, A. Analytical review of research on the technology of light aggregates based on natural and man-made raw materials. *Engineering Journal of Satbayev Universi-*

ty. 2021. T. 143(6), 123–128. <https://doi.org/10.51301/vest.su.2021.i6.16>

31. Romero, M.; Padilla, I.; García Calvo, J.L.; Carballosa, P.; Pedrosa, F.; López-Delgado, A. Development of Lightweight Mortars Using Sustainable Low-Density Glass Aggregates from Secondary Raw Materials. // *Materials*. 2023. T.16, №. 18: p. 6281. <https://doi.org/10.3390/ma16186281>

ЗАЯВЛЕННЫЙ ВКЛАД АВТОРОВ

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Решетова А.А. Постановка цели и задачи исследования, анализ результатов исследования, подготовка и редактирование статьи.

Медведева Э.Н. Анализ результатов исследования, редактирование и оформление статьи.

Усова Е.Л. Проведение экспериментальных исследований, обработка результатов экспериментов.

Плесовских М.С. Проведение экспериментальных исследований.

Королева О.И. Проведение экспериментальных исследований, обработка результатов экспериментов.

COAUTHORS' CONTRIBUTION

The authors contributed equally to this article. The authors declare no conflict of interest.

Reshetova A.A. Setting the research goals and objectives, analyzing the research results, writing the manuscript.

Medvedeva E.N. Analyzing the research results, writing the manuscript.

Usova E.L. Conducting experimental research, processing experimental results.

Plesovskikh M.S. Conducting experimental research.

Koroleva O.I. Conducting experimental research, processing experimental results.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Решетова Антонина Александровна – канд. техн. наук, доц. кафедры «Строительные материалы» Тюменского индустриального университета (625000, г. Тюмень, ул. Володарского, 38).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4251-4814>,

SPIN-код: 4188-4759,

Author ID: 739923,

e-mail: reshetovaaa@tyuiu.ru

Медведева Эльза Назифовна – канд. техн. наук, доц. кафедры «Строительные материалы» Тюменского индустриального университета (625000, г. Тюмень, ул. Володарского, 38).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4912-738X>,

SPIN-код: 2494-4660,

Author ID: 767501,

e-mail: medvedevaen1@tyuiu.ru

Усова Елена Леонидовна – канд. техн. наук, доц. кафедры «Строительные материалы» Тюмен-

ского индустриального университета (625000, г. Тюмень, ул. Володарского, 38).

ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-5277-7157>,

SPIN-код: 5672-4122,

Author ID: 759128,

e-mail: usovael@tyuiu.ru

Плесовских Максим Станиславович – магистрант Тюменского индустриального университета (625000, г. Тюмень, ул. Володарского, 38).

e-mail: PlesovskikhMS@rusgeology.ru

Королева Ольга Игоревна – канд. техн. наук, доц. кафедры «Строительные материалы» Тюменского индустриального университета (625000, г. Тюмень, ул. Володарского, 38).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0178-7509>,

SPIN-код: 6743-4430,

Author ID: 791875,

e-mail: koroljovaoi@tyuiu.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Reshetova Antonina A. – PhD, Associate Professor, Building Materials Department, Federal State Budget Educational Institution of Higher Education «Industrial University of Tyumen» (38, Volodarsogo Street, Tyumen, 625000).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4251-4814>,

SPIN-code: 4188-4759,

Author ID: 739923,

e-mail: reshetovaaa@tyuiu.ru

Medvedeva Elza N. – PhD, Associate Professor, Building Materials Department, Federal State Budget Educational Institution of Higher Education «Industrial University of Tyumen» (38, Volodarsogo Street, Tyumen, 625000).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4912-738X>,

SPIN-code: 2494-4660,

Author ID: 767501,

e-mail: medvedevaen1@tyuiu.ru

Usova Elena L. – PhD, Associate Professor, Building Materials Department, Federal State Budget Educational Institution of Higher Education «Industrial University of Tyumen» (38, Volodarsogo Street, Tyumen, 625000).

ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-5277-7157>,

SPIN-code: 5672-4122,

Author ID: 759128,

e-mail: usovael@tyuiu.ru

Plesovskikh Maksim S. – Post-graduate student, Federal State Budget Educational Institution of Higher Education «Industrial University of Tyumen» (38, Volodarsogo Street, Tyumen, 625001).

e-mail: PlesovskikhMS@rusgeology.ru

Koroleva Olga I. – PhD, Associate Professor, Building Materials Department, Federal State Budget Educational Institution of Higher Education «Industrial University of Tyumen» (38, Volodarsogo Street, Tyumen, 625000).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0178-7509>,

SPIN-code: 6743-4430,

Author ID: 791875,

e-mail: koroljovaoi@tyuiu.ru