

Разработка составов геополимерных бетонов

Александр Александрович Лунёв¹, Александр Викторович Явинский¹,
Сергей Валентинович Голиков², Петр Александрович Саньков²

¹ Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (СибАДИ); г. Омск, Россия;

² Сибирская генерирующая компания (СГК); г. Новосибирск, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Глобальное потепление и значительный вклад цементной промышленности в выбросы углекислого газа (7–8 % от общего объема) делают поиск экологически безопасных альтернатив портландцементу актуальной задачей. Одной из таких альтернатив являются геополимеры — безобжиговые вяжущие материалы, получаемые путем щелочной активации алюмосиликатного сырья. Геополимеры превосходят портландцемент по энергоэффективности, ресурсосбережению и экологичности, а их структура и химический состав принципиально отличаются от традиционных цементов. Использование геополимеров в строительной отрасли может позволить значительно снизить затраты на строительство и улучшить экологическую обстановку в регионах.

Материалы и методы. Рассмотрены зола-уноса, золошлаковая смесь, молотый гранулированный доменный шлак, калиевое и натриевое жидкое стекло, которые использовались для приготовления геополимерного вяжущего. Для определения прочности образцов вяжущего применялся пресс ИР 5081-5. Прочность геополимерного бетона испытывалась с помощью пресса ТП-1-350. Испытание на морозостойкость проводилось по ускоренному методу с использованием климатической камеры. Водонепроницаемость определялась с помощью прибора АГАМА-2РМ.

Результаты. Представлены результаты комплексных испытаний по подбору состава геополимерного вяжущего и бетонов на его основе в качестве альтернативы тяжелому бетону на портландцементном вяжущем. Подобраны составы геополимерного бетона, которые соответствуют классам бетона В15, В20, В22,5, В25, В30. Изучено влияние тепловлажностной обработки (ТВО) на прочность получаемого геополимерного вяжущего.

Выводы. Проведены химические и физико-механические испытания компонентов геополимерного вяжущего. Изучено влияние вида используемого жидкого стекла и ТВО на прочность геополимерного вяжущего. Подобраны рациональные составы геополимерного вяжущего и бетонов на его основе. Получены данные испытаний геополимерного бетона на водонепроницаемость, прочность при сжатии и изгибе, пористость, морозостойкость. У геополимерных смесей измерена осадка конуса. По результатам испытаний можно сделать вывод, что представленные составы геополимерного вяжущего классом до В30 можно использовать в строительной отрасли в качестве альтернативы портландцементным бетонам.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: строительство, геополимерное вяжущее, геополимерный бетон, зола-уноса, молотый гранулированный доменный шлак, вяжущее, морозостойкость, тепловлажностная обработка

Благодарности. Авторы выражают благодарность коллегам и анонимным рецензентам за время, затраченное на рассмотрение статьи.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Лунёв А.А., Явинский А.В., Голиков С.В., Саньков П.А. Разработка составов геополимерных бетонов // Вестник МГСУ. 2025. Т. 20. Вып. 10. С. 1553–1564. DOI: 10.22227/1997-0935.2025.10.1553-1564

Автор, ответственный за переписку: Александр Викторович Явинский, 121qqz@mail.ru.

Development of geopolymer concrete compositions

Aleksandr A. Lunev¹, Alexander V. Yavinskiy¹, Sergey V. Golikov², Petr A. Sankov²

¹ The Siberian State Automobile and Highway University (SibADI); Omsk, Russian Federation;

² Siberian Generating Company; Novosibirsk, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. Global warming and the cement industry's significant contribution to carbon dioxide emissions (7–8 % of the total) make the search for environmentally friendly alternatives to Portland cement an urgent challenge. One of the most promising alternatives is geopolymers — heat-free binders produced through the alkaline activation of aluminosilicate raw materials. Geopolymers outperform conventional cement in terms of energy efficiency, resource conservation, and environmental performance, and their structure and chemical composition fundamentally differ from those of traditional cements. The use of geopolymers in construction can substantially reduce costs and improve the environmental situation in the regions.

Materials and methods. The materials investigated included fly ash, ash-and-slag mixture, ground granulated blast-furnace slag, potassium and sodium silicate solutions used for the preparation of the geopolymer binder. An IR 5081-5 press was employed to determine the strength of the binder specimens, while the strength of geopolymer concrete was tested using a TP-1-350 press. Frost resistance was evaluated using an accelerated method in a climate chamber. Water permeability was determined with an AGAMA-2PM testing apparatus.

Results. The study presents the results of a comprehensive investigation into the selection of geopolymer binder and concrete compositions as alternatives to conventional heavy concrete based on cement binders. The developed geopolymer concrete compositions correspond to concrete strength classes B15, B20, B22.5, B25, and B30. The effect of heat and moisture treatment on the strength characteristics of the geopolymer binder was examined.

Conclusions. Chemical and physico-mechanical analyses of the geopolymer binder components were carried out. The influence of the type of silicate solution and of the heat-and-moisture curing regime on the binder strength was investigated. Rational compositions of geopolymer binders and corresponding concretes were developed. Test results on water resistance, compressive and flexural strength, porosity, and frost resistance were obtained, and the workability of geopolymer mixtures (cone slump) was evaluated. According to the findings, geopolymer binder compositions up to class B30 can be successfully applied in the construction industry as an environmentally friendly alternative to Portland-cement concretes.

KEYWORDS: geopolymer concrete, alkali-activated binder, fly ash, slag, curing regime, compressive strength, sustainable construction materials

Acknowledgements. The authors express their gratitude to the editorial board and anonymous reviewers for their valuable comments and time dedicated to reviewing the paper.

FOR CITATION: Lunev A.A., Yavinskiy A.V., Golikov S.V., Sankov P.A. Development of geopolymer concrete compositions. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2025; 20(10):1553-1564. DOI: 10.22227/1997-0935.2025.10.1553-1564 (rus.).

Corresponding author: Alexander V. Yavinskiy, 121qqz@mail.ru.

ВВЕДЕНИЕ

Глобальное потепление стало одной из ключевых проблем современности. Производство цемента вносит значительный вклад в выбросы углекислого газа (CO_2), занимая второе место среди источников парниковых газов. На его долю приходится около 7–8 % от общего объема выбросов CO_2 в атмосферу [1, 2]. В связи с этим поиск экологически безопасных альтернатив портландцементу становится все более актуальным. Одной из таких альтернатив являются безобжиговые вяжущие материалы, получаемые путем щелочной активации, которые отличаются меньшим воздействием на окружающую среду.

Геополимеры — это разновидность минеральных вяжущих материалов, которые производятся путем щелочной активации алюмосиликатного сырья природного или техногенного происхождения. Они превосходят портландцемент по энергоэффективности, ресурсосбережению и экологичности. Химический состав и структура геополимеров принципиально отличаются от портландцемента. Если портландцементный камень образует кальцево-силикатный гидрогель с тоберморитоподобной слоистой структурой, то геополимерный камень — это каркасный алюмосиликат, состоящий из тетраэдров $[\text{SiO}_4]$ и $[\text{AlO}_4]$, соединенных общими вершинами.

Геополимеры представляют собой синтетические неорганические материалы полимерной структуры, в которых атомы кремния и алюминия чередуются в цепях. В зависимости от последовательности этих атомов выделяют три основных типа геополимеров:

1. Поли(сиалат) ($-\text{Si}-\text{O}-\text{Al}-\text{O}-$).
2. Поли(сиалат-силоксан) ($-\text{Si}-\text{O}-\text{Al}-\text{O}-\text{Si}-\text{O}-$).
3. Поли(сиалат-дисилоксан) ($-\text{Si}-\text{O}-\text{Al}-\text{O}-\text{Si}-\text{O}-\text{Si}-\text{O}-$) [4].

Исследования геополимерных вяжущих начались еще в 1930-х гг., но системный подход к их из-

учению и внедрению в промышленность был разработан только в 1950–1970-х гг. В.Д. Глуховским и его последователями. Позже, в 1980-х гг., Джозеф Давидовиц провел важные исследования, изучая древнеегипетские сооружения из искусственных пород. Его работы легли в основу современной теории геополимерных вяжущих, которые сегодня применяются в археологии, для консервации токсичных отходов и создания геополимерных бетонов [3–5].

Однако исследования Д. Давидовица были сосредоточены на археологических материалах, которые существенно отличаются от современных промышленных отходов, таких как зола-уноса (ЗУ) или шлаки. В частности, он не рассматривал вопросы применения гранулированных шлаков, которые имеют иной минеральный состав по сравнению с доменными шлаками медленного охлаждения. Его работы базировались на изучении ЗУ, которая широко распространена в Европе, но в России встречается в ограниченных количествах.

Современные исследования геополимеров в основном сосредоточены на использовании ЗУ [6], цеолитов [7], метакрилатов [8] и других глинистых материалов [9, 10]. Также изучаются возможности активации отходов мрамора, травертина и вулканического туфа [11]. Однако особенности создания геополимерных вяжущих на основе золошлаковых материалов остаются малоизученными. Это связано с различиями в химическом составе, крупности частиц и других характеристик золошлаков по сравнению с ЗУ. Кроме того, недостаточно исследованы свойства ЗУ различного происхождения.

Часто гибридные вяжущие материалы изготавливаются на основе ЗУ с добавлением молотого доменного гранулированного шлака [12]. Такие добавки повышают прочность и устойчивость геополимеров к водопоглощению благодаря снижению сорбционной способности. Если содержание шлака в составе невелико, высоких прочностных характеристик можно достичь путем пропаривания изделий при темпе-

патуре 60 °С [13]. В качестве активаторов используются силикаты [14], гидроксид натрия [15], гидроксид калия, сульфат натрия [2, 16], фосфорная кислота [17] и другие вещества. Гидроксид натрия ускоряет реакцию и способствует растворению алюмосиликатов, а гидроксид калия улучшает степень полимеризации [18].

Один из недостатков щелочной активации — наличие свободного гидроксида натрия, который может вызывать коррозию металлов [19]. Помимо этого, высокая концентрация углекислого газа также способствует коррозии, что делает использование гибридных вяжущих в сочетании с арматурой нежелательным [20]. Добавка фосфорной кислоты снижает прочность геополимеров, что негативно сказывается на их физико-механических характеристиках [17].

На свойства геополимерных вяжущих влияет несколько факторов:

- соотношение Si/Al в исходном материале;
- тип и количество щелочного активатора;
- температура и условия твердения;
- использование дополнительных добавок для создания пористой структуры, аналогичной пенобетону [18, 21]. Особое внимание уделяется влиянию соотношения Si/Al на свойства вяжущих [22].

Прочность геополимерных материалов может достигать 40–80 МПа, хотя для строительных целей достаточно значений от 25 МПа [23]. Они обладают высокой сульфатостойкостью, что делает их пригодными для использования в качестве альтернативы сульфатостойкому цементу [24].

Таким образом, данные материалы потенциально могут выступать альтернативой портландцементному вяжущему для создания товарных бетонов и бетонных изделий. Учитывая этот факт, а также необходимость реализации комплексного плана по повышению объемов утилизации золошлаковых отходов V класса опасности, утвержденного Распоряжением Правительства Российской Федерации от 15.06.2022 № 1557, цель настоящего исследования — оценить возможность создания геополимер-

ных бетонов на основе ЗУ крупнейшей угольной электростанции РФ Рефтинской ГРЭС.

Для достижения цели были поставлены следующие задачи:

- оценить влияние основных компонентов (ЗУ, молотого гранулированного доменного шлака, гидроксидов щелочного металла и жидкого стекла) на прочность получаемого геополимерного вяжущего в условиях естественного твердения и тепловлажностной обработки;
- оценить влияние вида щелочного активатора на свойства геополимерных вяжущих;
- спроектировать составы бетонов на наиболее прочных составах вяжущего и оценить их свойства.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Золы-уноса (влажная зола-уноса открытого хранения (ВЗУ) с территории золоотвала и ЗУ сухого отбора) предоставлены Рефтинской ГРЭС.

Молотый гранулированный доменный шлак (МГДШ) был предоставлен ООО «Мечел-Материалы» и произведен на ПАО «Челябинский металлургический комбинат». МГДШ не обладает собственной гидравлической активностью.

Для экспериментов использовалось натриевое жидкое стекло (водных щелочных растворов силикатов натрия $Na_2O(SiO_2)_n$) производства ООО НПК «СИЛЕКС» с плотностью 1460 кг/м³, силикатным модулем 2,28, массовой долей диоксида кремния 28,13 % и оксида натрия 12,43 % соответственно. Для сравнения оценена эффективность применения калиевого жидкого стекла с плотностью 1410 кг/м³, силикатным модулем 2,28, массовой долей диоксида кремния 23,65 % и оксида калия 16,24 % соответственно, производства ООО НПК «СИЛЕКС».

В качестве щелочного компонента использовались гранулированные формы NaOH и KOH, которые поставлялись ООО «Омскреактив». Гранулы измельчались в мельнице МГ-1Ф до размеров менее 0,02 мм для удобства дозирования в лаборатории. По степени чистоты использованные гидроксиды натрия и калия — технические, безводные.

Табл. 1. Физические характеристики используемых материалов

Table 1. Physical characteristics of the materials used

Параметр / Parameter	ЗУ / Fly ash	ВЗУ / Wet fly ash	МГДШ / Ground granulated blast furnace slag
Влажность, % / Moisture content, %	1,1	32,2	0,3
Потери при прокаливании, % Losses to calcination, %	3,0	3,5	–
Удельная поверхность, м²/кг / Unit surface, m²/kg	312,0	166,5	518,0
Остаток на сите 008, % / Sieve 008 residue, %	15,4	14,8	3,1
Насыпная плотность, кг/м³ / Bulk density, kg/m³	0,79	0,79	1,68
Истинная плотность, кг/м³ / True density, kg/m³	1,84	1,80	2,31
Индекс активности 28 сут/90 сут 28/90-day activity index	0,77/0,65	0,61/0,51	0,50/0,35

Табл. 2. Результаты определения химического состава

Table 2. Results of chemical composition determination

Материал / Material	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O	Fe ₂ O ₃	MnO	Прочие* / Other*
ЗУ / Fly ash	61,27	26,9	2,10	0,92	0,3	0,72	0,59	4,80	–	2,4
ВЗУ / Wet fly ash	55,61	30,7	2,31	0,54	0,1	0,53	0,45	6,35	–	3,41
МГДШ / Ground granulated blast furnace slag	37,83	8,89	39,87	6,61	0,56	–	–	2,35	3,89	–

Примечание: * — прочие соединения, в том числе потери при прокаливании.

Note: * — other compounds, including losses to calcination.

Для испытаний использовалась водопроводная питьевая вода. Водородный показатель (рН) 7,7, содержание растворимых солей 65 мг/л, в том числе ионы SO₄ — 28,4 мг/л, хлориды — 15 мг/л.

Определили характеристики материалов: влажность по ГОСТ 8735–88; потерю массы при прокаливании по ГОСТ 11022–95; тонкость помола по удельной поверхности по ГОСТ 310.2–76; значения истинной плотности согласно ГОСТ 310.2–76; насыпную плотность в сухом состоянии по ГОСТ 9758–2012; установление индекса активности по приложению Д ГОСТ 25818–2017. Результаты определения физических характеристик сведены в табл. 1.

Определение химического состава проводилось в соответствии с ГОСТ 8269.1–97. Значения показателей химического состава изученных материалов сведены в табл. 2.

Для подбора состава геополимерного бетона использовался песок природный с влажностью 5,2 %, насыпной плотностью 1640 кг/м³, истинной плотностью 2480 кг/м³, пустотностью 0,34 и модулем крупности 3,06, а также гранитный щебень влажностью 1,0 %, насыпной плотностью 1450 кг/м³, истинной плотностью 2630 кг/м³, пустотностью 0,45, маркой по дробимости М1400 с 6 % лещадных частиц.

Методы испытаний

Сущность экспериментов сводилась к приготoвлению вяжущих щелочной активации (активатор из смеси гидроксида щелочного металла (калия или натрия) и жидкого стекла (водного раствора си-

ликата натрия или калия соответственно)) на основе побочных продуктов промышленного производства.

Выполнялось три цикла экспериментальных исследований:

- исследование влияния соотношения компонентов вяжущего на его прочность в условиях твердения в нормальных условиях;
- изучение влияния соотношения компонентов вяжущего на его прочность в условиях тепловлажностной обработки (ТВО);
- исследование возможности получения товарных бетонов с нормируемыми показателями прочности.

Первый цикл. В рамках первого цикла осуществлялся ряд полных факторных экспериментов, в которых варьировалось содержание МГДШ, щелочного компонента и жидкого стекла. Для каждого состава оценивалась прочность образцов геополимерного вяжущего в условиях нормального твердения в возрасте 7 и 28 сут.

В рамках эксперимента по оценке влияния состава вяжущего проводилось изготовление образцов для определения предела прочности на сжатие с различным содержанием компонентов, описанных в табл. 3 (составы 1–8). Для ряда материалов были введены дополнительные составы 9–11, которые выявляли влияние жидкого стекла на образцы.

Смешивание геополимерного вяжущего велось в химически нейтральной посуде (полиэтилен высокой плотности). Для подготовки образцов применялись формы-кубы ФК20-6 размерами 20 × 20 × 20 мм. В целях предотвращения сцепления вяжу-

Табл. 3. Рецептуры исследуемых геополимерных вяжущих

Table 3. Recipes of investigated geopolymer binders

Компонент / Component	Номер состава / Composition number										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
МГДШ, % / Ground granulated blast furnace slag, %	10	10	10	10	30	30	30	30	20	20	20
ЗУ / Fly ash	90	90	90	90	70	70	70	70	80	80	80
NaOH (KOH), %*	1	1	5	5	1	1	5	5	3	3	3
Жидкое стекло, %* Liquid glass, %*	10	30	10	30	10	30	10	30	20	10	30

Примечание: * — компоненты, входящие в щелочной активатор, считались сверх 100 % от массы сухой фазы.

Note: * — alkaline activator ingredients are added to 100 % of dehydrated material.



Рис. 1. Подготовка проб в формах-кубах: *a* — образцы в формах; *b* — испытания образцов
Fig. 1. Preparation of specimens in cubic molds: *a* — specimens in molds; *b* — testing of specimens

щего с формой в качестве смазки-разделителя использовали технический вазелин.

Для равномерного распределения смеси по форме выполнялось уплотнение на вибростоле VIBR-X-15 в течение 2 мин. Формы с материалом помещали в камеру нормального твердения КНТ-1 (рис. 1). Через сутки после формовки проводилась распалубка форм, образцы помещали в камеру нормального твердения для набора прочности при температуре 22 °С.

После выбранного режима подготовки образцов измеряли габаритные размеры образцов с помощью штангенциркуля. Образцы осматривали на предмет наличия дефектов (трещин, лакун и прочего). Пригодные для испытания образцы испытывали для определения предела прочности на сжатие на прессе ИР 5081-5 со скоростью 6 мм/мин (рис. 1).

Для состава с наилучшей прочностью дополнительно определялась нормальная густота цементного теста по ГОСТ 310.3–76. Сроки схватывания устанавливались в соответствии с ГОСТ 30744–2001 и ГОСТ 310.3–76 на приборе Вика. Помимо вяжущих, на основе ЗУ и МГДШ решено дополнительно проверить возможность получения геополимеров без добавления молотого гранулированного доменного шлака.

Второй цикл. Испытания с тепловлажностной обработкой выполняли аналогичным образом с циклом 1 до момента распалубки образцов. После готовности проб к ТВО процедуру выполняли по следующему алгоритму: первые три часа поднимали

температуру до 90 °С, затем в течение шести часов выдерживали при проектной температуре, после чего за три часа снижали температуру до 22 °С.

Третий цикл. На основе ГОСТ 27006–2019 были спроектированы следующие смеси, которые приведены в табл. 4.

Определение удобоукладываемости осуществляли по ГОСТ 10181–2014. Среднюю плотность бетонной смеси характеризуют отношением массы уплотненной бетонной смеси к ее объему в соответствии с ГОСТ 10180–2012. Пористость бетонной смеси оценивали расчетным методом в соответствии с п. 6.4 ГОСТ 10181–2000.

Прочность при сжатии бетона определяли с помощью прессы ТП-1-350 по методике ГОСТ 10180–2012 на образцах-кубах с ребром 10 см (испытанию подвергались серии образцов из 6 шт.). Прочность бетона при изгибе устанавливалась по ГОСТ 10180–2012. Для выявления прочности бетона при изгибе изготавливали образцы призмы квадратного сечения (рис. 2).

Морозостойкость бетона определяли ускоренным методом по ГОСТ 10060–2012. Испытание проводили по второму методу на образцах-кубах с ребром 10 см. Для этого образцы насыщались в 5 %-ном водном растворе хлорида натрия и помещались в климатическую камеру с температурой –50 °С в закрытых емкостях.

Для установления водонепроницаемости подготавливали по шесть образцов-кубов с размером

Табл. 4. Составы геополимерного бетона
Table 4. Compositions of geopolymer concrete

Номер Number	Состав, кг/м³, бетонной смеси / Composition of concrete, kg/m³						
	Песок Sand	Щебень Crushed stone	ЗУ Fly ash	МГДШ / Ground granulated blast- furnace slag	Вода Water	Жидкое стекло Liquid glass	Едкий натр Caustic soda
1	818	1080	247,5	112,5	112,1	112,5	18
2	746,9	1080	297,0	135,0	127,7	135,0	21,6
3	723,2	1080	313,5	142,5	132,9	142,5	22,8
4	691,6	1080	335,5	152,5	139,8	152,5	24,4
5	660	1080	357,5	162,5	146,7	162,5	26



Рис. 2. Определение прочности (а); морозостойкости (b)
Fig. 2. Determination of strength (a); frost resistance (b)

ребра 150 мм. Водонепроницаемость определяли с помощью прибора АГАМА-2РМ.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Результаты исследований геополимерных вяжущих

Результаты испытаний по выявлению предела прочности на сжатие образцов вяжущих на основе сухой ЗУ и МГДШ на натриевом жидком стекле ООО НПК «СИЛЕКС» после твердения приведены в табл. 5.

Были апробированы составы с влажной ЗУ. Результаты испытаний по определению предела прочности на сжатие образцов вяжущих на основе влаж-ВЗУ и МГДШ на натриевом жидком стекле ООО НПК «СИЛЕКС» после твердения представлены в табл. 6.

Данные результаты показывают, что смеси с добавлением МГДШ в нормальных условиях обладают широким потенциалом для применения, поскольку

их прочность обладает значениями, потенциально обеспечивающими создание бетонов марок от В3,5 до В30. В то же время ТВО практически не повышает их прочность и может использоваться как замена твердению в нормальных условиях для целей настоящей работы.

Результаты испытаний по определению предела прочности на сжатие образцов вяжущих на основе сухой и влажной ЗУ и МГДШ на натриевом жидком стекле ООО НПК «СИЛЕКС» показали, что применение влажных ЗУ снижает прочность получаемых геополимерных вяжущих в среднем на 36 %.

Для повышения репрезентативности было принято решение провести сходные испытания не только на жидком стекле ООО НПК «СИЛЕКС», но и на имеющемся аналоге, поставляемом ООО «Омскреактив» (силикатный модуль 2,68, плотность 1480 кг/м³). Результаты испытаний по установлению предела прочности на сжатие образцов вяжущих на основе сухой ЗУ и МГДШ на натриевом

Табл. 5. Результаты определения предела прочности на сжатие вяжущих на основе сухой золы-уноса и МГДШ на натриевом жидком стекле ООО НПК «СИЛЕКС»

Table 5. Determinations of ultimate compressive strength of binders containing dry fly ash and ground granulated blast-furnace slag with sodium liquid glass, produced by R&D company SILEKS Ltd, a limited liability company

Схема подготовки Preparation procedure	Номер состава / Composition number										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
7 сут / 7 days	0,9	10,7	1,4	15,4	1,4	19,2	11,8	22,7	9,7	1,2	16,6
28 сут / 28 days	0,8	18,8	3,8	33,0	1,4	28,5	15,9	44,7	22,9	1,9	32,1
ТВО / Vacuum heat treatment	3,1	18,4	4,3	27,2	1,2	25,1	16,5	38,4	23,1	3,6	27,9

Табл. 6. Результаты определения предела прочности на сжатие вяжущих на основе влажной золы-уноса и молотого гранулированного доменного шлака на натриевом жидком стекле ООО НПК «СИЛЕКС»

Table 6. Determinations of compressive strength of binders containing wet fly ash and ground granulated blast furnace slag with sodium liquid glass produced by R&D company SILEKS Ltd, a limited liability company

Схема подготовки Preparation procedure	Номер состава / Composition number										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
7 сут / 7 days	0,3	7,6	0,6	7,9	1,3	16,1	8,0	25,5	8,5	1,6	16,4
28 сут / 28 days	0,6	13,3	1,4	17,9	1,0	19,6	11,1	37,3	13,3	0,8	24,9
ТВО / Vacuum heat treatment	0,0	11,8	2,2	29,2	0,9	25,1	18,5	37,6	7,4	0,9	21,6

Табл. 7. Результаты определения предела прочности на сжатие вяжущих на основе сухой ЗУ и МГДШ на натриевом жидком стекле ООО «Омскреактив»

Table 7. Determinations of compressive strength of binders containing dry fly ash and ground granulated blast furnace slag with sodium liquid glass produced by Omskreactiv Ltd.

Схема подготовки Preparation procedure	Номер состава / Composition number										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
7 сут / 7 days	1,2	12,0	2,3	20,0	1,9	16,9	14,6	29,5	17,0	2,2	27,9
28 сут / 28 days	2,4	11,3	4,1	17,4	2,8	15,2	14,0	22,9	20,4	3,6	21,8
TBO / Vacuum heat treatment	0,7	7,6	4,3	9,0	1,2	17,9	16,2	21,8	20,5	3,6	28,8

Табл. 8. Результаты определения предела прочности на сжатие вяжущих на основе сухой ЗУ и МГДШ на калиевом жидком стекле ООО НПК «СИЛЕКС»

Table 8. Determinations of compressive strength of binders containing dry fly ash and ground granulated blast furnace slag with potassium liquid glass produced by R&D company SILEKS Ltd, a limited liability company

Схема подготовки Preparation procedure	Номер состава / Composition number							
	1	2	3	4	5	6	7	8
7 сут / 7 days	2,4	12,4	4,4	15,3	4,3	15,9	26,6	28,5
28 сут / 28 days	3,9	15,7	13,6	16,1	9,4	24,0	36,4	36,2
TBO / Vacuum heat treatment	1,6	16,6	13,7	19,2	4,1	17,7	18,1	24,1

жидком стекле ООО «Омскреактив» после твердения приведены в табл. 7.

Данные показывают, что смеси с добавлением МГДШ на жидком стекле ООО «Омскреактив» имеют сходное поведение с вяжущими на жидком стекле ООО НПК «СИЛЕКС». В то же время обладают меньшей прочностью, вероятно, обусловленной большим силикатным модулем.

Результаты испытаний по определению предела прочности на сжатие образцов вяжущих на основе сухой ЗУ и МГДШ на калиевом жидком стекле ООО НПК «СИЛЕКС» после твердения приведены в табл. 8.

Результаты испытаний по определению предела прочности на сжатие образцов вяжущих на основе сухой ЗУ и МГДШ на калиевом жидком стекле ООО НПК «СИЛЕКС» выявили, что применение калиевых активаторов твердения показывает максимальную прочность не выше, чем у тех же составов на натриевом стекле (максимальная прочность на 19 % ниже, чем на натриевом стекле). Учитывая это и повышенную стоимость калиевого стекла, дальнейшие исследования с ним не проводились.

С учетом эффективности применения вяжущих на основе ЗУ и МГДШ было решено дополнительно проверить возможность получения геополимеров без добавления молотого гранулированного доменного шлака. Результаты испытаний по определению предела прочности на сжатие образцов вяжущих на основе ЗУ (без добавления МГДШ) после твердения приведены в табл. 9.

Данные результаты показывают, что смеси без добавления МГДШ с использованием натриевого и калиевого жидкого стекла в нормальных условиях практически не обладают потенциалом для применения, поскольку не позволяют создать бетоны с классом выше В3,5. Тепловлажностная обработка, хотя и повышает прочность составов с использованием натриевого жидкого стекла, не позволяет получить бетоны классом свыше В15.

ТВО повышает их прочность при использовании натриевого жидкого стекла. В то же время для ряда направлений применения такие смеси могут быть пригодны и требуют дальнейшей проработки.

В качестве наилучшего состава, который решено использовать для опытного подбора состава бес-

Табл. 9. Результаты испытаний вяжущих на основе золы-уноса (без МГДШ)

Table 9. Test results of fly ash binders (without ground granulated blast furnace slag)

Компонент / Ingredient	Номер состава (натриевое жидкое стекло) Composition number (sodium liquid glass)					Номер состава (калиевое жидкое стекло) Composition number (potassium liquid glass)				
	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
NaOH (KOH)	1	1	5	5	3	1	1	5	5	3
Жидкое стекло Liquid glass	10	30	10	30	20	10	30	10	30	20
7 сут / 7 days	1,4	–	2,6	–	2,7	2,7	3,9	4,9	–	6,5
28 сут / 28 days	2,5	–	5,0	–	3,2	3,4	5,2	5,4	–	6,2
TBO Vacuum heat treatment	10,0	16,2	16,3	–	21,3	1,1	3,0	1,7	6,0	1,8

Табл. 10. Сводная ведомость результатов оценки свойств геополимерных бетонов

Table 10. Summarized assessment of geopolymer concrete properties

Номер / Number	Прочность на сжатие, МПа Compressive strength, MPa	Прочность на растяжение при изгибе, МПа / Bending tensile strength, MPa	Пористость, % Porosity, %	Средняя плотность, кг/м³ Average density, kg/m³	Водопроницаемость Water resistance	Прочность на сжатие после замораживания, МПа / Compressive strength after freezing, MPa					Осадка, см Settlement, cm
						F75	F100	F150	F200	F300	
1	19,4	4,3	18,5	2033,7	W 2	15,0	14,3	–	–	–	1
2	26,3	4,7	18,0	2084,2	W 4	24,3	24,0	22,5	–	–	1
3	29,0	5,0	14,9	2120,2	W 4	28,2	27,9	24,9	–	–	1
4	32,4	6,2	13,5	2145,1	W 6	30,3	29,4	29,0	27,8	22,8	1
5	39,8	7,4	12,6	2143,9	W 8	42,4	42,1	40,0	40,2	37,2	1

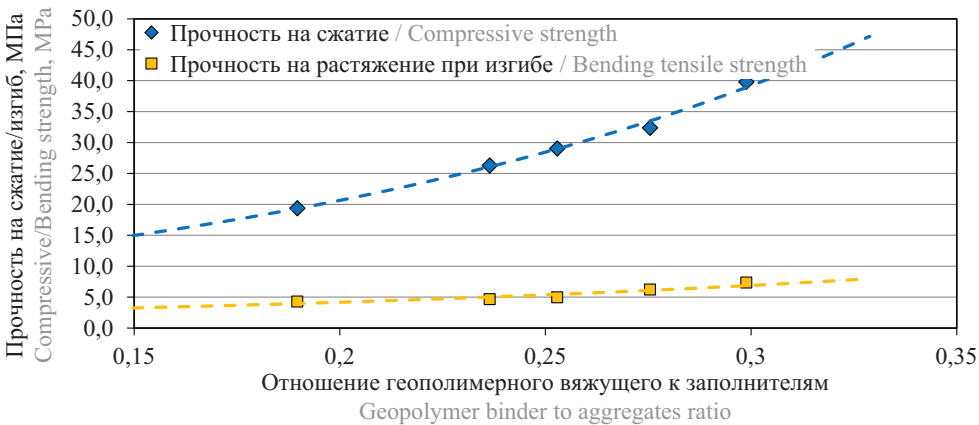


Рис. 3. Зависимость прочности от количества геополимерного вяжущего

Fig. 3. Dependence of strength on the geopolymer binder content

цементного (геополимерного) бетона, применено геополимерное вяжущее в виде состава № 8 (табл. 6) в различных его содержаниях. Данный состав показал, что для него характерна нормальная густота 8,5 %, начало схватывания 31 мин, а конец схватывания 110 мин. Полученные рецептуры геополимерных бетонов приведены в табл. 4.

Результаты исследований геополимерных бетонов. Результаты испытаний бетонных смесей были сведены в табл. 10.

Для всех смесей, как и в работе [25], была отмечена малая осадка конуса, которая говорит о необходимости введения пластификаторов, что является следующей ступенью необходимых исследований. Добавление микрокремнезема также потенциально значительно снижает предел текучести и пластическую вязкость бетонов, что отражено в исследовании [25] и может способствовать улучшению подвижности бетона.

Работа с пластификаторами, вероятно, также позволит получить смеси с большим содержанием золы-уноса в составе (или ВЗУ в качестве запол-

нителя), поскольку более плотная упаковка частиц даст возможность увеличить плотность и прочность бетонной смеси. Поэтому в рамках дальнейших исследований требуется изучение возможности замены части заполнителя (песка) на золошлаковые материалы или ЗУ, что в перспективе может привести к увеличению доли вовлекаемых ВЗУ (опыт работы с традиционными бетонами показывает возможность замены до 40 % песка ВЗУ).

В табл. 10 также приведены составы бетонных смесей, которые обладали проектной прочностью. На рис. 3 показана зависимость количества геополимерного вяжущего и прочность получаемых бетонов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При ТВО геополимерного вяжущего и геополимерного бетона их прочность практически не повышается по сравнению с твердением образцов в нормальных условиях. Таким образом, предлагаемые составы в отличие от многих аналогов не требуют проведения высокоэнергозатратной тепловлажност-

ной обработки и могут использоваться для строительных работ непосредственно на площадке.

Применение ВЗУ снижает прочность получаемых геополимерных вяжущих в среднем на 36 % по сравнению с составами на сухих ЗУ.

Использование калиевого и натриевого жидкого стекла в качестве активаторов твердения показывает сопоставимую прочность получаемых материалов, но с учетом повышенной стоимости калиевых стекол (в 2,0–2,5 раза выше, чем у натриевых) делает его менее целесообразным для промышленного применения.

Смеси без добавления МГДШ в нормальных условиях имеют прочность, не позволяющую создать бетоны с классом выше В3,5. ТВО повышает их прочность при использовании натриевого жидкого стекла, что потенциально дает возможность получить бетоны класса до В15.

Результаты подбора состава показали, что возможно получение составов с классом по прочности: В15, В20, В22,5, В25, В30. Полученные в рамках исследования составы могут быть использованы в виде товарного бетона или для создания бетонных изделий, однако рекомендуется продолжить исследования в области геополимерных бетонов для оптимизации составов, повышения качества матери-

алов и увеличения доли используемых ВЗУ (в том числе для замены заполнителя).

Поскольку значительную долю стоимости геополимеров составляют щелочные активаторы [26], для снижения стоимости получаемых геополимеров требуется провести поиск и оценку возможности применения дешевых аналогов используемых компонентов (гидроксида натрия и жидкого стекла). Наиболее вероятным компонентом, служащим для замены щелочного активатора, может выступать красный шлам [27], который представляет собой щелочной (рН 10–13) отход производства глинозема [26], богатый аморфными фазами кремнезема и глинозема. По этой причине красный шлам может использоваться как в качестве частичной замены активатора, так и в качестве прекурсоров для производства геополимеров [28].

Важным направлением возможных исследований стоит рассмотреть применение геополимерных бетонов для укрепления грунтов в строительной отрасли. Возможность достижения технического эффекта подтверждена результатами работ по стабилизации отходов добычи угля [16], укрепления песчаных грунтов [29] и строительных отходов [30]. А также актуально подробнее исследовать вопросы щелочно-силикатной коррозии геополимерных вяжущих.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Vigneshkumar A., Christy C.F., Muthukannan M., Maheswaran M., Arunkumar K., Devi R.K. Experimental investigations on fresh and mechanical properties of fly ash and ground granulated blast furnace slag self-compacting geopolymer concrete // *Materials Today: Proceedings*. 2024. DOI: 10.1016/j.matpr.2024.01.051
2. Yu J., Ji F., Lv Q., Li W., Lin Z., Peng Y. Mechanical property and microstructure of fly ash-based geopolymer by calcium activators // *Case Studies in Construction Materials*. 2024. Vol. 21. P. e03811. DOI: 10.1016/j.cscm.2024.e03811
3. Ерошкина Н.А., Коровкин М.О., Тымчук Е.И. Структурообразование геополимеров // *Молодой ученый*. 2015. № 7 (87). С. 123–126. EDN TPPJVP.
4. Davidovits J. Geopolymers // *Journal of Thermal Analysis*. 1991. Vol. 37. Issue 8. Pp. 1633–1656. DOI: 10.1007/bf01912193
5. Singh N.B. Fly ash-based geopolymer binder: A future construction material // *Minerals*. 2018. Vol. 8. Issue 7. P. 299. DOI: 10.3390/min8070299
6. John S.K., Nadir Y., Girija K. Effect of source materials, additives on the mechanical properties and durability of fly ash and fly ash-slag geopolymer mortar : a review // *Construction and Building Materials*. 2021. Vol. 280. P. 122443. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2021.122443
7. Kaya M., Koksall F., Gencel O., Munir M.J., Kazmi S.M.S. Influence of micro Fe₂O₃ and MgO on

the physical and mechanical properties of the zeolite and kaolin based geopolymer mortar // *Journal of Building Engineering*. 2022. Vol. 52. P. 104443. DOI: 10.1016/j.jobbe.2022.104443

8. Ma B., Luo Y., Zhou L., Shao Z., Liang R., Fu J. et al. The influence of calcium hydroxide on the performance of MK-based geopolymer // *Construction and Building Materials*. 2022. Vol. 329. P. 127224. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2022.127224

9. Liew Y.M., Heah C.Y., Mustafa A.B.M., Kamarudin H. Structure and properties of clay-based geopolymer cements : a review // *Progress in Materials Science*. 2016. Vol. 83. Pp. 595–629. DOI: 10.1016/j.pmatsci.2016.08.002

10. Lekshmi S., Sudhakumar J. An assessment on the durability performance of fly ash-clay based geopolymer mortar containing clay enhanced with lime and GGBS // *Cleaner Materials*. 2022. Vol. 5. P. 100129. DOI: 10.1016/j.clema.2022.100129

11. Tekin I. Properties of NaOH activated geopolymer with marble, travertine and volcanic tuff wastes // *Construction and Building Materials*. 2016. Vol. 127. Pp. 607–617. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2016.10.038

12. Liu M., Wang C., Wu H., Yang D., Ma Z. Reusing recycled powder as eco-friendly binder for sustainable GGBS-based geopolymer considering the effects of recycled powder type and replacement rate // *Journal*

of Cleaner Production. 2022. Vol. 364. P. 132656. DOI: 10.1016/j.jclepro.2022.132656

13. Ерошкина Н.А., Коровкин М.О., Коровченко И.В. Технология получения геополимерного вяжущего на базе магматических горных пород // Молодой ученый. 2015. № 7 (87). С. 120–123. EDN TPPJVF.

14. Wu X., Shen Y., Hu L. Performance of geopolymer concrete activated by sodium silicate and silica fume activator // Case Studies in Construction Materials. 2022. Vol. 17. P. e01513. DOI: 10.1016/j.cscm.2022.e01513

15. Petrus H.T.B.M., Fairuz F.I., Sa'dan N., Olvianas M., Astuti W., Jenie S.N.A. et al. Green geopolymer cement with dry activator from geothermal sludge and sodium hydroxide // Journal of Cleaner Production. 2021. Vol. 293. P. 126143. DOI: 10.1016/j.jclepro.2021.126143

16. Qin Z., Yuan Y., Chen Z., Li Y., Xia Y. Combined preparation and application of geopolymer pavement materials from coal slurry-slag powder-fly ash mining solid waste: A case study // Construction and Building Materials. 2024. Vol. 441. P. 137510. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2024.137510

17. Pu S., Zhu Z., Wang W., Duan W., Wu Z., Li N. et al. Water resistance of fly ash phosphoric acid-based geopolymer // Developments in the Built Environment. 2022. Vol. 12. P. 100093. DOI: 10.1016/j.dibe.2022.100093

18. Adewuyi Y.G. Recent Advances in Fly-Ash-Based Geopolymers: Potential on the Utilization for Sustainable Environmental Remediation // ACS Omega. 2021. Vol. 6. Issue 24. Pp. 15532–15542. DOI: 10.1021/acsomega.1c00662

19. Ефремов А.Н., Хаустова В.В., Букина Д.Ю. Композиционные шлакощелочные вяжущие на основе гидроксида натрия, доменного граншлака и золошлаковых отходов тепловых электростанций // Вестник Донбасской национальной академии строительства и архитектуры. 2018. № 4–2 (132). С. 177–182. EDN YVCCPM.

20. San Nicolas R.V.R., Walkley B., van Deventer J.S.J. Fly ash-based geopolymer chemistry and behavior // Coal Combustion Products (CCP's). 2017. Pp. 185–214. DOI: 10.1016/b978-0-08-100945-1.00007-1

21. Ullah A., Kassim A., Ahmad S.A.R., Huang Y., Yunus N.Z.M., Zhu C. et al. Strength development of bottom ash based geopolymer and their application in columns to improve soft soil underneath embankment: Achieving sustainability in ground improvement //

Transportation Geotechnics. 2025. Vol. 50. P. 101463. DOI: 10.1016/j.trgeo.2024.101463

22. Wongpa J., Kiattikomol K., Jaturapitakkul C., Chindaprasirt P. Compressive strength, modulus of elasticity, and water permeability of inorganic polymer concrete // Materials & Design. 2010. Vol. 31. Issue 10. Pp. 4748–4754. DOI: 10.1016/j.matdes.2010.05.012

23. Diaz E.I., Allouche E.N., Eklund S. Factors affecting the suitability of fly ash as source material for geopolymers // Fuel. 2010. Vol. 89. Issue 5. Pp. 992–996. DOI: 10.1016/j.fuel.2009.09.012

24. Luo Z., Zhang B., Zou J., Luo B. Sulfate erosion resistance of slag-fly ash based geopolymer stabilized soft soil under semi-immersion condition // Case Studies in Construction Materials. 2022. Vol. 17. P. e01506. DOI: 10.1016/j.cscm.2022.e01506

25. Du W., Ni L., Lv Y., Zheng D., Tang W., Cui H. Role of silica fume in the hydration evolution of fly ash-slag-based geopolymers // Construction and Building Materials. 2024. Vol. 451. P. 138879. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2024.138879

26. Xiaoshuang S., Yanpeng S., Jinqian L., Yuhao Z., Ruihan H. Preparation and performance optimization of fly ash-slag-red mud based geopolymer mortar: Simplex-centroid experimental design method // Construction and Building Materials. 2024. Vol. 450. P. 138573. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2024.138573

27. Qingke N., Haiqing Z., Haipeng Y., Xiangxin J., Rihua Z. Development and field test of Red mud-Fly Ash Geopolymer pile (RFP) // Cleaner Waste Systems. 2024. Vol. 9. P. 100184. DOI: 10.1016/j.clwas.2024.100184

28. Shi Y., Zhao Q., Xue C., Jia Y., Guo W., Zhang Y. et al. Preparation and curing method of red mud-calcium carbide slag synergistically activated fly ash-ground granulated blast furnace slag based eco-friendly geopolymer // Cement and Concrete Composites. 2023. Vol. 139. P. 104999. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2023.104999

29. Zhang J., Li B., Zhang M., Shan Z., Jin Q. Mechanical behavior and microstructure evolution of slag-fly ash based geopolymer stabilized sand // Case Studies in Construction Materials. 2024. Vol. 20. P. e03279. DOI: 10.1016/j.cscm.2024.e03279

30. Doan T., Arulrajah A., Lin Y., Horpibulsuk S., Chu J., Darmawan S. Chemical stabilization of demolition wastes in pavement bases using one-part fly ash and slag based geopolymers // Transportation Geotechnics. 2024. Vol. 45. P. 101192. DOI: 10.1016/j.trgeo.2024.101192

Поступила в редакцию 20 февраля 2025 г.

Принята в доработанном виде 20 июля 2025 г.

Одобрена для публикации 20 июля 2025 г.

ОБ АВТОРАХ: Александр Александрович Лунёв — кандидат технических наук, директор центра компетенций в сфере использования вторичных материальных ресурсов в строительной отрасли; Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (СибАДИ); 644080, г. Омск, пр. Мира, д. 5; SPIN-код: 2836-4151, Scopus: 57198893763, ResearcherID: AAZ-4755-2021, ORCID: 0000-0001-5857-1891; lunev.al.al@gmail.com;

Александр Викторович Явинский — преподаватель кафедры промышленного и гражданского строительства; **Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (СибАДИ)**; 644080, г. Омск, пр. Мира, д. 5; SPIN-код: 4276-7420, ResearcherID: OEO-0235-2025, ORCID: 0000-0003-1717-9302; 121qqz@mail.ru;

Сергей Валентинович Голиков — руководитель проектов; **Сибирская генерирующая компания (СГК)**; 630007, г. Новосибирск, ул. Свердлова, д. 7; GolikovSV@sibgenco.ru;

Петр Александрович Саньков — директор по реализации золошлаков; **Сибирская генерирующая компания (СГК)**; 630007, г. Новосибирск, ул. Свердлова, д. 7; SanykovPA@sibgenco.ru.

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

REFERENCES

1. Vigneshkumar A., Christy C.F., Muthukannan M., Maheswaran M., Arunkumar K., Devi R.K. Experimental investigations on fresh and mechanical properties of fly ash and ground granulated blast furnace slag self-compacting geopolymer concrete. *Materials Today: Proceedings*. 2024. DOI: 10.1016/j.matpr.2024.01.051
2. Yu J., Ji F., Lv Q., Li W., Lin Z., Peng Y. Mechanical property and microstructure of fly ash-based geopolymer by calcium activators. *Case Studies in Construction Materials*. 2024; 21:e03811. DOI: 10.1016/j.cscm.2024.e03811
3. Eroshkina N.A., Korovkin M.O., Tymchuk E.I. Structure formation of geopolymers. *Young Scientist*. 2015; 7(87):123-126. EDN TPPJVP. (rus.).
4. Davidovits J. Geopolymers. *Journal of Thermal Analysis*. 1991; 37(8):1633-1656. DOI: 10.1007/bf01912193
5. Singh N.B. Fly ash-based geopolymer binder: A future construction material. *Minerals*. 2018; 8(7):299. DOI: 10.3390/min8070299
6. John S.K., Nadir Y., Girija K. Effect of source materials, additives on the mechanical properties and durability of fly ash and fly ash-slag geopolymer mortar : a review. *Construction and Building Materials*. 2021; 280:122443. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2021.122443
7. Kaya M., Koksall F., Gencel O., Munir M.J., Kazmi S.M.S. Influence of micro Fe₂O₃ and MgO on the physical and mechanical properties of the zeolite and kaolin based geopolymer mortar. *Journal of Building Engineering*. 2022; 52:104443. DOI: 10.1016/j.job.2022.104443
8. Ma B., Luo Y., Zhou L., Shao Z., Liang R., Fu J. et al. The influence of calcium hydroxide on the performance of MK-based geopolymer. *Construction and Building Materials*. 2022; 329:127224. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2022.127224
9. Liew Y.M., Heah C.Y., Mustafa A.B.M., Kamarudin H. Structure and properties of clay-based geopolymer cements : a review. *Progress in Materials Science*. 2016; 83:595-629. DOI: 10.1016/j.pmatsci.2016.08.002
10. Lekshmi S., Sudhakumar J. An assessment on the durability performance of fly ash-clay based geopolymer mortar containing clay enhanced with lime and GGBS. *Cleaner Materials*. 2022; 5:100129. DOI: 10.1016/j.clema.2022.100129
11. Tekin I. Properties of NaOH activated geopolymer with marble, travertine and volcanic tuff wastes. *Construction and Building Materials*. 2016; 127:607-617. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2016.10.038
12. Liu M., Wang C., Wu H., Yang D., Ma Z. Re-using recycled powder as eco-friendly binder for sustainable GGBS-based geopolymer considering the effects of recycled powder type and replacement rate. *Journal of Cleaner Production*. 2022; 364:132656. DOI: 10.1016/j.jclepro.2022.132656
13. Korovchenko I.V., Korovkin M.O., Eroshkina N.A. Technology of geopolymer binder production on the basis of magmatic rocks. *Young Scientist*. 2015; 7(87):120-123. EDN TPPJVF. (rus.).
14. Wu X., Shen Y., Hu L. Performance of geopolymer concrete activated by sodium silicate and silica fume activator. *Case Studies in Construction Materials*. 2022; 17:e01513. DOI: 10.1016/j.cscm.2022.e01513
15. Petrus H.T.B.M., Fairuz F.I., Sa'dan N., Olvi-anas M., Astuti W., Jenie S.N.A. et al. Green geopolymer cement with dry activator from geothermal sludge and sodium hydroxide. *Journal of Cleaner Production*. 2021; 293:126143. DOI: 10.1016/j.jclepro.2021.126143
16. Qin Z., Yuan Y., Chen Z., Li Y., Xia Y. Combined preparation and application of geopolymer pavement materials from coal slurry-slag powder-fly ash mining solid waste: A case study. *Construction and Building Materials*. 2024; 441:137510. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2024.137510
17. Pu S., Zhu Z., Wang W., Duan W., Wu Z., Li N. et al. Water resistance of fly ash phosphoric acid-based geopolymer. *Developments in the Built Environment*. 2022; 12:100093. DOI: 10.1016/j.dibe.2022.100093
18. Adewuyi Y.G. Recent Advances in Fly-Ash-Based Geopolymers: Potential on the Utilization for Sustainable Environmental Remediation. *ACS Omega*. 2021; 6(24):15532-15542. DOI: 10.1021/acsomega.1c00662
19. Yefremov A., Haustova V., Bukina D. Composite slagalkaline binders based on sodium hydroxide, blastfurnace granulated slag and ashslag waste of thermal power plants. *Proceeding of the Donbas National*

Academy of Civil Engineering and Architecture. 2018; 4-2(132):177-182. EDN YVCCPM. (rus.).

20. San Nicolas R.V.R., Walkley B., van Deventer J.S.J. Fly ash-based geopolymer chemistry and behavior. *Coal Combustion Products (CCP's)*. 2017; 185-214. DOI: 10.1016/b978-0-08-100945-1.00007-1

21. Ullah A., Kassim A., Ahmad S.A.R., Huang Y., Yunus N.Z.M., Zhu C. et al. Strength development of bottom ash based geopolymer and their application in columns to improve soft soil underneath embankment: Achieving sustainability in ground improvement. *Transportation Geotechnics*. 2025; 50:101463. DOI: 10.1016/j.trgeo.2024.101463

22. Wongpa J., Kiattikomol K., Jaturapitakkul C., Chindaprasirt P. Compressive strength, modulus of elasticity, and water permeability of inorganic polymer concrete. *Materials & Design*. 2010; 31(10):4748-4754. DOI: 10.1016/j.matdes.2010.05.012

23. Diaz E.I., Allouche E.N., Eklund S. Factors affecting the suitability of fly ash as source material for geopolymers. *Fuel*. 2010; 89(5):992-996. DOI: 10.1016/j.fuel.2009.09.012

24. Luo Z., Zhang B., Zou J., Luo B. Sulfate erosion resistance of slag-fly ash based geopolymer stabilized soft soil under semi-immersion condition. *Case Studies in Construction Materials*. 2022; 17:e01506. DOI: 10.1016/j.cscm.2022.e01506

25. Du W., Ni L., Lv Y., Zheng D., Tang W., Cui H. Role of silica fume in the hydration evolution of fly ash-

slag-based geopolymers. *Construction and Building Materials*. 2024; 451:138879. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2024.138879

26. Xiaoshuang S., Yanpeng S., Jinqian L., Yuhao Z., Ruihan H. Preparation and performance optimization of fly ash- slag- red mud based geopolymer mortar: Simplex-centroid experimental design method. *Construction and Building Materials*. 2024; 450:138573. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2024.138573

27. Qingke N., Haiqing Z., Haipeng Y., Xiangxin J., Rihua Z. Development and field test of Red mud-Fly Ash Geopolymer pile (RFP). *Cleaner Waste Systems*. 2024; 9:100184. DOI: 10.1016/j.clwas.2024.100184

28. Shi Y., Zhao Q., Xue C., Jia Y., Guo W., Zhang Y. et al. Preparation and curing method of red mud-calcium carbide slag synergistically activated fly ash-ground granulated blast furnace slag based eco-friendly geopolymer. *Cement and Concrete Composites*. 2023; 139:104999. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2023.104999

29. Zhang J., Li B., Zhang M., Shan Z., Jin Q. Mechanical behavior and microstructure evolution of slag-fly ash based geopolymer stabilized sand. *Case Studies in Construction Materials*. 2024; 20:e03279. DOI: 10.1016/j.cscm.2024.e03279

30. Doan T., Arulrajah A., Lin Y., Horpibulsuk S., Chu J., Darmawan S. Chemical stabilization of demolition wastes in pavement bases using one-part fly ash and slag based geopolymers. *Transportation Geotechnics*. 2024; 45:101192. DOI: 10.1016/j.trgeo.2024.101192

Received February 20, 2025.

Adopted in revised form on July 20, 2025.

Approved for publication on July 20, 2025.

B I O N O T E S: **Aleksandr A. Lunev** — Candidate of Technical Sciences, Director of the Competence Center for the Use of Secondary Material Resources in the Construction Industry; **The Siberian State Automobile and Highway University (SibADI)**; 5 Mira avenue, Omsk, 644080, Russian Federation; SPIN-code: 2836-4151, Scopus: 57198893763, ResearcherID: AAZ-4755-2021, ORCID: 0000-0001-5857-1891; lunev.al.al@gmail.com;

Alexander V. Yavinskiy — lecturer at the Department of Industrial and Civil Engineering; **The Siberian State Automobile and Highway University (SibADI)**; 5 Mira avenue, Omsk, 644080, Russian Federation; SPIN-code: 4276-7420, ResearcherID: OEO-0235-2025, ORCID: 0000-0003-1717-9302; 121qqz@mail.ru;

Sergey V. Golikov — project manager; **Siberian Generating Company**; 7 Sverdlova st., Novosibirsk, 630007, Russian Federation; GolikovSV@sibgenco.ru;

Petr A. Sankov — Director for ash and slag sales; **Siberian Generating Company**; 7 Sverdlova st., Novosibirsk, 630007, Russian Federation; SanykovPA@sibgenco.ru.

Contribution of the author: all authors have made an equivalent contribution to the preparation of the publication.

The authors have no conflicts of interest to declare.