



УДК 691.54:669.162.275.2

И. А. ГУЛИН, аспирант, ст. преп. кафедры технологии строительства;
В. В. МЫЛЬНИКОВ, д-р физ.-мат. наук, проф. кафедры технологии строительства; **О. Б. КОНДРАШКИН**, канд. техн. наук, доц., зав. кафедрой технологии строительства

ГЕОПОЛИМЕРНЫЕ БЕТОНЫ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ДОМЕННЫХ ШЛАКОВ

ФГБОУ ВО «Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет».
Россия, 603952, г. Н. Новгород, ул. Ильинская, д. 65.

Тел.: (831) 430-54-92; эл. почта: tsp-nngasu@mail.ru

Ключевые слова: шлак, цемент, глина, смесь, вяжущие, бетон, раствор.

Авторы данной исследовательской работы рассмотрели актуальную проблему утилизации отходов металлургического производства и создания на основе шлаков гидравлического вяжущего вещества с характеристиками, аналогичными портландцементу. Исследование охватывает не только экономический аспект, но и вопросы экологической безопасности, поскольку использование шлаков способствует снижению выбросов углекислого газа в атмосферу. В ходе эксперимента изучали влияние активаторов твердения на прочностные параметры материалов, изготовленных на основе доменных шлаков металлургических предприятий Нижнего Новгорода. Исследуется геополимерный бетон для использования в строительных конструкциях как внутреннего, так и несущего назначения. Были разработаны несколько составов и исследованы деформационные свойства геополимерного вяжущего, что позволило сделать выводы о преимуществах данного материала с точки зрения эксплуатационных характеристик.

Введение

Современная индустрия производит значительные объемы побочных продуктов, следовательно, необходимы дополнительные финансовые затраты на их переработку и утилизацию, что непосредственно отражается на себестоимости конечного изделия. Экологические проблемы, связанные с отходами, побуждают развитие и применение технологий повторного использования, особенно в строительной сфере. Доменные шлаки, которые формируются в больших количествах при выплавке чугуна, являются одними из основных видов металлургических отходов, например, на автомобильных заводах. В процессе плавки чугуна кремниевые и алюминиевые оксиды, содержащиеся в железной руде, взаимодействуют с кальциевыми и магниевыми оксидами, входящими в состав флюсов [1]. Такой реактивный процесс образует раскаленную жидкую смесь – доменные шлаки. Чугун, получаемый из руды, осаждается в нижней части доменной печи при температуре около 1500 °С, при этом плотность расплавленного шлака почти в 2,5–3 раза ниже, чем у чугуна, поэтому он формирует слой, располагающийся над металлом. Каждые несколько циклов шлак удаляется через специальное отверстие – шлаковую летку – и направляется в конвектор, где гранулируется и охлаждается сбросом в водяной резервуар.

Целью данной исследовательской работы является разработка гидравлического вяжущего на основе доменного шлака и оценка его



эксплуатационных характеристик в сравнении с классическим портландцементом [2].

К группе гидравлических вяжущих веществ можно отнести так называемые геоцементы – геополимерные материалы, получаемые из природных алюмосиликатных минералов и отходов металлургического производства. Выпуск геополимеров позволяет существенно снижать затраты на строительство.

Разработка геополимеров связана с именем Джозефа Давидовица. В 1970-х годах он ввел понятие «геополимер» как минерального вещества, чья структура состоит из повторяющихся цепочек кремния и алюминия. В зависимости от степени чередования этих элементов различают полисилаты, полисилато-силокси и дисилокси. Структурные единицы – тетраэдры с кремнием или алюминием в центре и четырьмя кислородами по углам. Они формируют трехмерные полимерные сетки. В результате синтеза образуются диагональные цепочки Si-O-Al-O, которые обеспечивают прочность и физико-механические свойства, сопоставимые с традиционным бетоном [3].

По представлению Давидовица, синтез геополимеров протекает в три этапа. Сначала щелочь (NaOH и/или KOH) растворяет оксиды кремния и алюминия. Затем природные полимерные структуры распадаются на мономеры. Наконец, происходит полимеризация с образованием плотного полимерного материала [4].

Тип и свойства готового материала зависят от атомного отношения кремния и алюминия (Si/Al). Соответственно выделяют:

- Si/Al=1 – огнеупорные материалы, керамика и кирпич;
- Si/Al=2 – вяжущие материалы, экологичный бетон, капсулы для токсичных отходов;
- Si/Al=3 – металлообработка и волокнообразующее стекло;
- Si/Al=4 – герметиковые покрытия.

Геополимеры характеризуются быстрым схватыванием, высокой жесткостью, химической стойкостью и экологичностью.

Геополимеры актуальны как перспективные строительные материалы. В условиях тепловой обработки на этапе формовки могут достигать прочности до 50 МПа. Это сокращает технологические циклы и повышает производительность заводов железобетона. Геополимеры обладают высокой адгезией к металлическим конструкциям и стойки к химическим воздействиям. По цене они конкурентоспособны с портландцементными [5].

Материалы и методы исследований

Исследовали разработанные геополимерные бетоны на основе глинистого сырья месторождений Нижегородской области следующего состава:

1. Афонинская глина, просеянная через сито размером 0,008 мм, химический состав данной глины в соответствии с ГОСТ 23789-79 представлен в табл. 1.
2. Известь строительная ГОСТ 9179-77.
3. Доменный шлак, просеянный через сито 0,008 согласно ГОСТ 3476-74. Химический состав приведен в табл. 1.
4. Стекло натриевое жидкое, химический состав в соответствии с ГОСТ-13078-81 представлен в табл. 1. Содержание воды в жидком стекле составляет 68,4 %.
5. Щелочь натриевая (сухая) ГОСТ-4328-77.
6. Песок природный ГОСТ 8736-93, просеянный через сито размером 0,315 мм.



Таблица 1

Химический состав компонентов геополимерных бетонов

Оксиды, %	Афонинская глина	Доменный шлак	Заполнитель	Известь строительная гашеная	Стекло натриево-жидкое
SiO ₂ , %	36	40,0	96,0	0,12	23,93
Al ₂ O ₃ , %	12,93	7,0	—	—	—
Na ₂ O, %	0,25	—	—	1,1	7,69
K ₂ O, %	2,14	—	—	—	—
CaO, %	33,94	41,0	1,5	1,0	—
MgO, %	1,70	0,6	1,25	0,2	—
TiO ₂ , %	0,63	0,9	0,7	0,3	—
Fe ₂ O ₃ , %	4,04	0,3	0,55	0,4	—
Ca(OH) ₂ , %	—	—	—	98,88	—

При изготовлении геополимерного бетона в качестве связующего использовали геополимерный цемент [5]. Пропорции компонентов смеси устанавливались на основе химического состава глины, так как SiO₂ и Al₂O₃ играют ключевую роль в формировании вяжущей структуры материала. Для приготовления растворного теста определяли количество глины, которое затем смешивали с дозированным жидким стеклом и гидроокисью натрия. Модуль жидкого стекла при этом составлял около 3,6 [6].

Помимо этого, использовали металлургический доменный шлак, хранившийся на полигонах в кусках размером 50–70 мм. Отобранные 10 кг шлака сушили естественным путем в помещении с температурой 22 °С и влажностью 35 % в течение 14 дней. После сушки шлак измельчали в шаровой мельнице с помощью шаровидных и цилиндрических мелющих тел (цельпебс) до порошкообразного состояния. Порошок взвешивали и просеивали через сито № 0,08, при этом оставшийся на сите материал не должен был превышать 15 % от общей массы шлака. В роли заполнителя применяли речной кварцевый песок, просеянный через сито с размером ячеек 5 мм [7].

Глину афонинского месторождения предварительно сушили при 110 °С в сушильных шкафах для удаления избыточной влаги, затем измельчали в шаровой мельнице до мелкодисперсного состояния и просеивали через сито № 0,008. Активатором твердения служила строительная известь по ГОСТ 9179-2018. Все ингредиенты раствора взвешивали и тщательно перемешивали.

Геополимерные бетоны изготавливали с различными составами, формируя кубические образцы размером 7,07×7,07×7,07 см согласно ГОСТ 22685-89. Плотность материала измеряли по ГОСТ 12730.1-78. Механические испытания на одноосное сжатие проводили на прессах ИП-100 и УИМ-30 при выдерживании скорости нагружения 0,6±0,2 МПа/с. Испытания образцов выполняли на 3, 7 и 28-й день после изготовления [8].

Для исследования микроструктуры использовали электронный микроскоп *Quanta 3D 200i*. Минерально-фазовый состав геополимерного бетона определяли путем количественного рентгенофазового анализа, проведенного на рентгеновском дифрактометре *Shimadzu LabX XRD-6100*.

Результаты и их обсуждение

Анализ цементных образцов, в которых использовалось жидкое стекло с известным модулем, показал, что их структура в основном состоит из аморфных фаз, в то время как образцы с низким модулем содержат четко выраженные кристаллические компоненты [9]. Электронные микрофотографии геополимерного бетона, выполненные с увеличением в 2500 и 5000 раз с помощью микроскопа *Quanta 3D 200i* (рис. 1), показывают крупные кристаллы различных форм: игольчатые, трубчатые и пластинчатые структуры. Количественный рентгенофазовый анализ минерально-фазового состава геополимерного бетона и интерпретация спектрограмм (рис. 2) выявили, что основными структурно-фазовыми элементами являются гидросиликаты, гидроалюминаты и гидроферриты кальция [10].

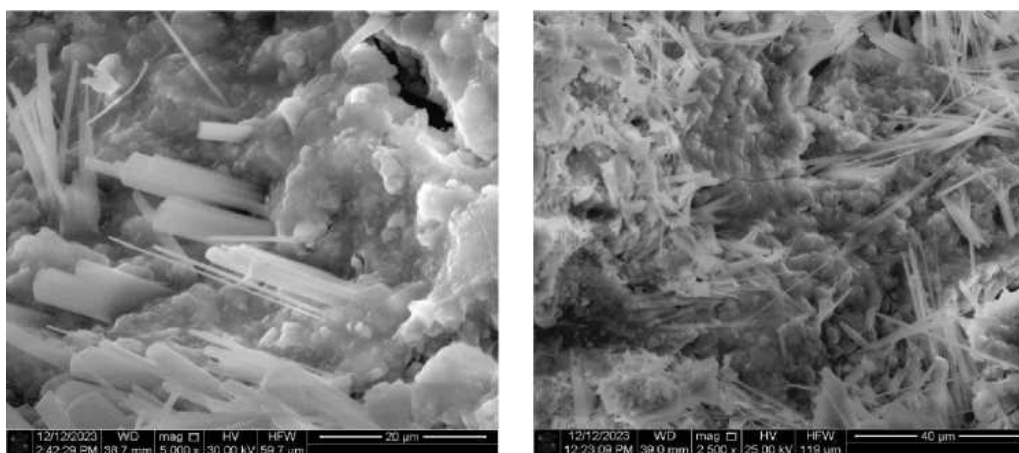


Рис. 1. Микрофотографии образцов мелкозернистого бетона

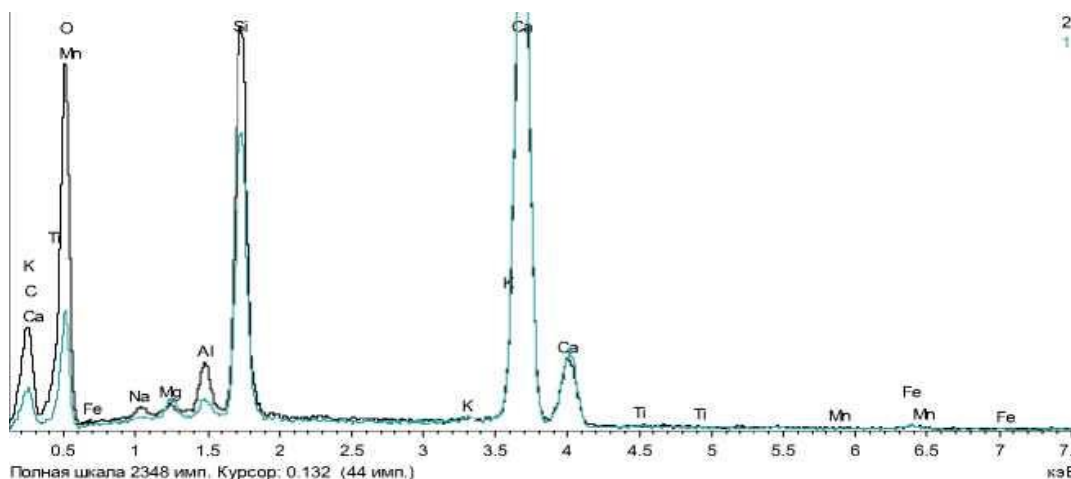


Рис. 2. Спектрограмма образцов геополимерного бетона

Добавление в жидкое стекло раствора гидроксида натрия способствовало понижению его модуля и вязкости, в результате компоненты смеси не только легче перемешивались и повышалась удобоукладываемость, но и увеличивались их прочностные характеристики.



Показатели прочности геополимерных образцов получены после их твердения в естественных условиях при температуре 22 °С и относительной влажности воздуха, равной 90 %, до достижения постоянной массы изделий (табл. 2–4). Влажность, при которой масса образца не изменяется, называется равновесной.

Таблица 2

**Результаты испытания образцов геополимерного бетона
в возрасте 3 суток**

Серия обр.	Состав по объему: шлак, известь, глина, заполнитель	Объем выборки, шт.	Объем Н ₂ O	Плот- ность ρ , кг/м ³	Водо- поглоще- ние, %	Класс бетона	V , %
С-1	1:0,4:2,5:1	6	65 %	3,3	40	B15	1,7
С-2	1:0,3:2,3:1	6	65 %	3,25	38	B12,5	1,6
С-3	1:0,25:2,2:1	6	65 %	3,15	37	B10	1,5
С-4	1:0,22:2,0:1	6	65 %	3,1	35	B7,5	1,8
С-5	1:0,2:1,8:1	6	65 %	3,05	32	B5	2,0
С-6	1:0,18:1,5:1	6	65 %	2,95	30	B7,5	2,1

Таблица 3

**Результаты испытания образцов геополимерного бетона
в возрасте 7 суток**

Серия обр.	Состав по объему: шлак, известь, глина, заполнитель	Объем выборки, шт.	Объем Н ₂ O	Плотность ρ , кг/м ³	Водо- погло- щение, %	Класс бетона	V , %
С-1	1:0,4: 2,5:1	6	65 %	3,25	40	B20	1,7
С-2	1:0,3:2,3:1	6	65 %	3,20	38	B15	1,6
С-3	1:0,25:2,2:1	6	65 %	3,18	37	B12,5	1,5
С-4	1:0,22:2,0:1	6	65 %	3,15	35	B10	1,8
С-5	1:0,2:1,8:1	6	65 %	3,10	32	B7,5	2,0
С-6	1:0,18:1,5:1	6	65 %	3,00	30	B10	2,1

Таблица 4

**Результаты испытания образцов геополимерного бетона
в возрасте 28 суток**

Серия обр.	Состав по объему: шлак, известь, глина, заполнитель	Объем выборки, шт.	Объем Н ₂ O	Плотность ρ , кг/м ³	Водо- погло- щение, %	Класс бетона	V , %
С-1	1:0,4:2,5:1	6	65 %	3,1	40	B22,5	1,7
С-2	1:0,3:2,3:1	6	65 %	3,05	38	B20	1,6
С-3	1:0,25:2,2:1	6	65 %	3,00	37	B15	1,5
С-4	1:0,22:2,0:1	6	65 %	2,95	35	B12,5	1,8
С-5	1:0,2:1,8:1	6	65 %	2,9	32	B10	2,0
С-6	1:0,18:1,5:1	6	65 %	2,85	30	B12,5	2,1

На рис. 3 продемонстрирован процесс разрушения кубических образцов из разработанного геополимерного бетона.

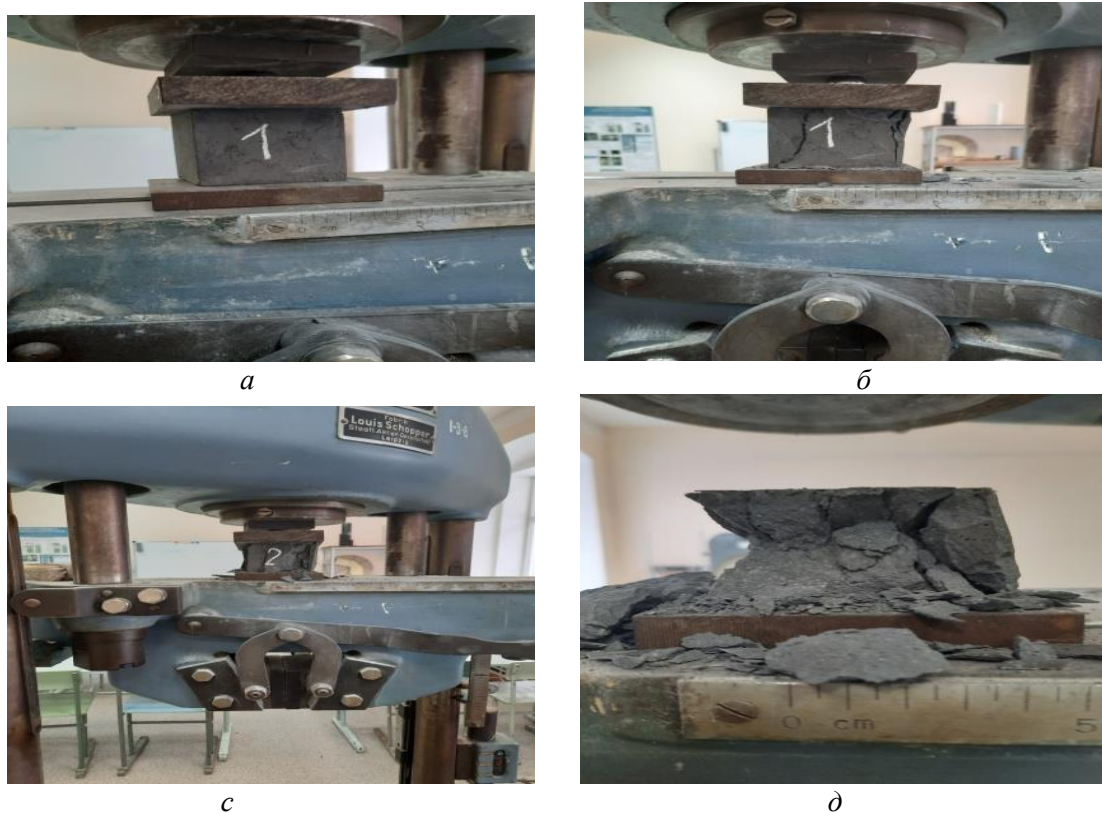


Рис. 3. Стадии разрушения образцов из разработанного геополимерного бетона: *а* – испытуемый образец до приложения нагрузки без видимых повреждений; *б* – образец под нагрузкой с образовавшейся первичной трещиной; *с* – частичное разрушение образца; *д* – разрушенный образец

В ходе сравнительного анализа прочностных характеристик геополимерных бетонов было установлено, что разработанный геополимерный материал, подобно цементным растворам, со временем увеличивает свою прочность при влажности более 90 %. При изготовлении геополимерного бетона с использованием металлургических шлаков и афонинской глины получен материал с прочностью, соответствующей классу В22,5, что позволяет его классифицировать как легкий бетон. Рационально использовать такие бетоны на подготовительных этапах строительных работ, в частности, перед заливкой фундаментов или монолитных плит. Кроме того, геополимерные смеси подходят для производства бетона класса В10, что является важным аспектом при армировании конструкций. Геополимерный бетон нашел широкое применение в дорожном строительстве и монтаже бордюрных камней [11]. Более того, данные материалы используются для устройства пешеходных и садовых дорожек, а также служат основой для фундаментов небольших сооружений.

Выводы

Установлено, что замена портландцемента на геополимерные вяжущие в бетонных смесях снижает углеродный след и сокращает количество



индустриальных отходов. Результаты экспериментов свидетельствуют: экономическая и экологическая целесообразность применения геополимеров в строительном производстве формирует благоприятные условия для развернутых исследований и масштабной промышленной реализации этой технологии.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Совершенствования технологии малоэтажного строительства с применением глиногипсового бетона в современных конструктивных решениях зданий / О. Б. Кондрашкин, В. А. Войтович, Т. А. Гаврикова, И. А. Гулин // Приволжский научный журнал / Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет. – Нижний Новгород ; ННГАСУ, 2024. – № 2 (70). – С. 113–120.
2. Кондрашкин, П. О. Совершенствование малоэтажного строительства при помощи глиногипса / П. О. Кондрашкин, И. А. Гулин, Д. И. Миндрин // Международная конференция Нижегородского Фестиваля науки : сборник тезисов докладов, Нижний Новгород, 24–25 октября 2024 г. – Нижний Новгород : Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет, 2025. – С. 36–37.
3. Муртазаев, С. А. Ю. Геополимеры на алюмосиликатном сырье / С. А. Ю. Муртазаев, М. Ш. Саламанова, И. С. А. Муртазаев // Строительство и реконструкция. – 2025. – № 2 (118). – С. 94–107.
4. Вяжущие композиции на основе техногенных отходов / М. Ш. Саламанова, Ю. И. Корянова, Р. С. А. Муртазаева, А. Ш. Магомедов // Молодежь, наука, инновации : сборник статей XIII Всероссийской научно-практической конференции, Грозный, 22 октября 2024 г. – Грозный : Грозненский государственный нефтяной технический университет им. М. Д. Миллионщикова, 2024. – С. 81–86.
5. Пути декарбонизации строительной отрасли как современный вызов для получения низкоуглеродных строительных материалов / С. А. Ю. Муртазаев, Л. Р. Бекмурзаева, М. Ш. Саламанова [и др.] // Строительные материалы. – 2024. – № 9. – С. 51–57.
6. Изучение продуктов гидратации цемента при добавлении известняка / В. А. Осипчук, Е. И. Довбня, Р. А. Радыга, А. К. Халюшев // Инновации и экспертиза материалов и изделий : материалы национальной научно-практической конференции с международным участием, посвященной 75-летию кафедры «Технологический инжиниринг и экспертиза в стройиндустрии», Ростов-на-Дону, 23 ноября 2023 г. – Ростов-на-Дону : Донской государственный технический университет, 2024. – С. 94–95.
7. Вяжущие вещества : учебное пособие / О. А. Ларсен, Н. А. Гольцева, О. В. Александрова, В. Г. Соловьев. – Москва : Московский государственный строительный университет, Ай Пи Эр Медиа, ЭБС АСВ, 2018. – URL: <https://www.iprbookshop.ru/74474.html>. – ISBN 978-5-7264-1800-1. – Текст : электронный.
8. Ашуров, М. А. Шлакощелочной цемент / М. А. Ашуров, Б. Н. Вахобов // Новые технологии – нефтегазовому региону : материалы Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, Тюмень, 24–28 апреля 2017 г. – Тюмень : Тюменский индустриальный университет, 2017. – Том IV. – С. 71–74.
9. Кудярова, Н. П. Бушуева Н. П. Активизация белитовых фаз сталеплавильного шлака в присутствии оксида кальция / Н. П. Кудярова, Н. П. Бушуева // Вестник БГТУ им. В. Г. Шухова. – 2016. – № 2. – С. 151–154.
10. Уэндландт, У. Термические методы анализа : перевод с английского В. А. Степанова, В. А. Берштейна / У. Уэндландт ; под редакцией В. А. Степанова, В. А. Берштейна. – Москва : Мир, 1978. – С. 527.
11. Глуховский, В. Д. Шлакощелочные цементы и бетоны / В. Д. Глуховский, В. А. Пахомов. – Киев : Будивельник, 1978. – 184 с.



GULIN Ivan Anatolevich, postgraduate student, senior teacher of the chair of construction technology; MYLNIKOV Vladimir Viktorovich, doctor of technical sciences, professor of the chair of construction technology; KONDRASHKIN Oleg Borisovich, holder of the chair of construction technology

GEOPOLYMER CONCRETES USING BLAST FURNACE SLAG

Nizhny Novgorod State University of Architecture and Civil Engineering.

65, Iljinskaya St., Nizhny Novgorod, 603952, Russia.

Tel.: (831) 430-54-92; e-mail: tsp-nngasu@mail.ru

Key words: slag, cement, clay, mixture, binders, concrete.

The authors of this research paper considered the urgent problem of waste disposal from metallurgical production and the creation of a hydraulic binder based on slag with characteristics similar to Portland cement. The study covers not only the economic aspect, but also environmental safety issues, since the use of slags helps to reduce carbon dioxide emissions into the atmosphere. During the experiment, the effects of hardening activators on the strength parameters of materials made on the basis of high-carbon slags from metallurgical enterprises in Nizhny Novgorod were studied. The subject of the study is geopolymer concrete for use in building structures for both internal and load-bearing purposes. Several formulations were developed and the deformation properties of the geopolymer binder were investigated, which allowed us to draw conclusions about the advantages of this material in terms of performance characteristics.

REFERENCES

1. Kondrashkin O. B., Voytovich V. A., Gavrikova T. A., Gulin I. A. Sovershenstvovaniya tekhnologii maloetazhnogo stroitelstva s primeneniym glinogipsovogo betona v sovremennykh konstruktivnykh resheniyakh zdaniy [Improvement of Low-Rise Construction Technology Using Clay-Gypsum Concrete in Modern Structural Building Solutions]. Privolzhskiy nauchny zhurnal [Privolzhsky Scientific Journal]. Nizhegorodskiy gosudarstvennyy arkhitekturno-stroitelnyy universitet. Nizhny Novgorod, NNGASU, 2024, № 2, (70) P. 113–120.
2. Kondrashkin P. O., Gulin I. A., Mindrin D. I. Sovershenstvovaniye maloetazhnogo stroitelstva pri pomoshchi glinogipsa [Improvement of Low-Rise Construction Using Clay-Gypsum]. Mezhdunarodnaya konferentsiya Nizhegorodskogo Festivalya nauki [International Conference of the Nizhny Novgorod Science Festival]: sbornik tezisov dokladov Nizhny Novgorod 24–25 oktyabrya 2024 g. Nizhny Novgorod, Nizhegorodskiy gosudarstvennyy arkhitekturno-stroitelnyy universitet, 2025, P. 36–37.
3. Murtazayev S. A. Yu., Salamanova M. Sh., Murtazayev I. S. A. Geopolimery na alyumosilikatnom syrye [Geopolymers Based on Aluminosilicate Raw Materials]. Stroitelstvo i rekonstruktsiya [Construction and Reconstruction]. 2025, № 2 (118), P. 94–107.
4. Salamanova M. Sh., Koryanova Yu. I., Murtazayeva R. S. A., Magomedov A. Sh. Vyazhushchiye kompozitsii na osnove tekhnogennykh otkhodov [Binding Compositions Based on Technogenic Waste]. Molodezh nauka innovatsii [Youth, Science, Innovations]: sbornik statey XIII Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii. Grozny. 22 oktyabrya 2024 g. Grozny Groznenskiy gosudarstvennyy neftyanoy tekhnicheskoy universitet im. M. D. Millionshchikova. 2024, P. 81–86.
5. Murtazayev S. A. Yu., Bekmurzayeva L. R., Salamanova M. Sh. [et al.] Puti dekarbonizatsii stroitelnoy otrasli kak sovremenny vyzov dlya polucheniya nizkouglerodnykh stroitelnykh materialov [Pathways for Decarbonization of the Construction Industry as a



Modern Challenge for Obtaining Low-Carbon Building Materials]. *Stroitelnyye materialy* [Construction Materials]. 2024, № 9, P. 51–57.

6. Osipchuk V. A., Dovbnya E. I., Radyga R. A., Khalyushev A. K. Izucheniye produktov gidratatsii tsementa pri dobavlenii izvestnyaka [Study of Cement Hydration Products with Limestone Addition]. *Innovatsii i ekspertiza materialov i izdeliy* [Innovations and Expertise of Materials and Products]: materialy natsionalnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiyem posvyashchennoy 75-letiyu kafedry «Tekhnologicheskoy inzhiniring i ekspertiza v stroyindustrii» Rostov-na-Donu 23 noyabrya 2023 g. Rostov-on-Don, Donskoy gosudarstvennyy tekhnicheskyy universitet, 2024, P. 94–95.

7. Larsen O. A., Goltseva N. A., Aleksandrova O. V., Solovyev V. G. Vyazhushchiye veshchestva [Binding Agents]: uchebnoye posobiye. Moscow, Moskovskiy gosudarstvennyy stroitelnyy universitet, Ay Pi Er Media, EBS ASV, 2018. URL: <https://www.iprbookshop.ru/74474.html>. ISBN 978-5-7264-1800-1. Text : electronic.

8. Ashurov M. A., Vakhobov B. N. Shlakoshchelochnoy tsement [Alkali-Activated Slag Cement]. *Novyye tekhnologii – neftegazovomu regionu* [New Technologies for the Oil and Gas Region]: materialy Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii studentov aspirantov i molodykh uchenykh Tyumen 24–28 aprelya 2017 g. Tyumen, Tyumenskiy industrialnyy universitet, 2017, Vol. IV, P. 71–74.

9. Kudyarova N. P., Bushuyeva N. P., Aktivizatsiya belitovykh faz stalepravilnogo shlaka v prisutstvii oksida kaltsiya [Activation of Belite Phases of Steelmaking Slag in the Presence of Calcium Oxide]. *Vestnik BGTU im. V. G. Shukhova* [Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov]. 2016, № 2, P. 151–154.

10. Uendlandt U. Termicheskiye metody analiza [Thermal Methods of Analysis]: perevod s angl. V. A. Stepanova V. A. Bershteyna; pod red. V. A. Stepanova V. A. Bershteyna. Moscow, Mir, 1978, 527 p.

11. Glukhovskiy V. D., Pakhomov V. A. Shlakoshchelochnyye tsementy i betony [Alkali-Activated Slag Cements and Concretes]. Kiev, Budivelnik, 1978, 184 p.

© И. А. Гулин, В. В. Мыльников, О. Б. Кондрашкин, 2025

Получено: 23.09.2025 г.