

УДК 391.33
EDN: EVABM

[https://doi.org/10.37538/0005-9889-2026-2-\(634\)-19-33](https://doi.org/10.37538/0005-9889-2026-2-(634)-19-33)

П.Г. КОЗЛОВ¹, Н.А. АЮБОВ²

¹Дальневосточный федеральный университет, о. Русский, п. Аякс, 10, г. Владивосток, 690922, Российская Федерация

²Комплексный научно-исследовательский институт имени Х.И. Ибрагимов РАН, Старопромысловское шоссе, 21А, г. Грозный, 364020, Российская Федерация

ГЕОПОЛИМЕРНЫЕ БЕТОНЫ ИЗ ГИДРОУДАЛЕННЫХ ЗОЛОШЛАКОВЫХ ОТХОДОВ

Аннотация

Введение. Золоотвалы подвергают риску здоровье населения, а предприятия, вынужденные хранить золошлаковые отходы, несут значительные финансовые потери из-за негативного воздействия на окружающую среду, в свою очередь, золошлаковые отходы, после определенной подготовки, могут служить основой для производства конкурентоспособной бесцементной продукции строительного назначения, что является научной задачей.

Цель. Разработка научно обоснованного технологического решения получения геополимерных строительных материалов на основе гидроудаленных золошлаковых отходов тепловых электростанций.

Материалы и методы. Основой для геополимеров были ЗШО Владивостокской ТЭЦ-2, Приморской ГРЭС и Артёмовской ТЭЦ Приморского края. Для комплексного исследования сырьевых компонентов и разработанных материалов были применены современные методы: рентгенофазовый анализ, энергодисперсионный микроанализ, сканирующая электронная микроскопия, дифференциально-термический анализ, инфракрасная спектроскопия.

Результаты. Усовершенствовано технологическое решение предварительной подготовки золошлаковых отходов, на основе которых разработано инновационное геополимерное вяжущее. Разработана широкая номенклатура составов геополимерных бетонов путём различной комбинации продуктов утилизации золошлаковых отходов. В отличие от продуктов гидратации традиционных портландцементных бетонов, представленных основными структурообразующими новообразованиями гидросиликатов кальция, в разработанных геополимерах микроструктура составлена гидроалюмосиликатами кальция и натрия. В этом случае, атомы алюминия, встроенные в кристаллическую решетку гидратных новообразований, значительно упрочняют ее.

Выводы. Научно обоснована и экспериментально доказана эффективность применения золошлаковых отходов ТЭС в качестве источника для получе-

ния новых экологически безопасных геополимерных бетонов классов до В60 на сжатие и В_{тб}10,0 на растяжение при изгибе. Прочность при сжатии и изгибе разработанных материалов позволяет говорить об их конкурентоспособности по сравнению с традиционными портландцементными бетонами. Прочность при сжатии разработанных геополимеров в 2 раза превышает аналогичную характеристику для материалов на основе распространенного портландцемента ЦЕМ I 32,5Н и в 1,5 раза выше чем для высокопрочного ЦЕМ I 42,5Н.

Ключевые слова: геополимер, бетон, золошлаки, отходы, щелочная активация, прочность на сжатие, прочность на изгиб, состав

Для цитирования: Козлов П.Г., Аюбов Н.А. Геополимерные бетоны из гидроудаленных золошлаковых отходов // *Бетон и железобетон*. 2026. № 3(634) С. 19–33 DOI: [https://doi.org/10.37538/0005-9889-2026-3-\(634\)-19-33](https://doi.org/10.37538/0005-9889-2026-3-(634)-19-33) . EDN: EVABM

Вклад авторов

Козлов П.Г. – концептуализация, проведение экспериментов, обработка результатов, написание статьи. Аюбов Н.А. – обработка результатов, написание статьи.

Финансирование

Исследование не имело спонсорской поддержки.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Поступила в редакцию 20.03.26

Поступила после рецензирования 23.04.26

Принята к публикации 30.04.26

P.G. KOZLOV ¹, N.A. AYUBOV ²

¹Far Eastern Federal University, 10 Ajax Settlement, Russkiy Island, Vladivostok, 690922, Russian Federation

²Kh.I. Ibragimov Integrated Research Institute of the Russian Academy of Sciences,
21A Staropromyslovskoye Highway, Grozny, 364020, Russian Federation

GEOPOLYMER CONCRETE FROM HYDRO REMOVED COAL ASH

Abstract

Introduction. Ash dumps put public health at risk, and enterprises forced to store ash and slag waste incur significant financial losses due to the negative impact on the environment, in turn, bottom ash, after some preparation, can serve as the basis for the production of competitive cement-free construction products, which is a scientific task.

Aim. Development of a scientifically based technological solution for the production of geopolymer building materials based on hydro-removed ash and slag waste from thermal power plants.

Materials and methods. The basis for geopolymers were the combined heat and power plants of Vladivostok TPP-2, Primorskaya GRES and Artemovskaya TPP of Primorsky Krai. Modern methods were used for a comprehensive study of raw materials and developed materials: X-ray phase analysis, energy dispersion microanalysis, scanning electron microscopy, differential thermal analysis, and infrared spectroscopy.

Results. The technological solution for the preliminary preparation of ash and slag waste has been improved, on the basis of which an innovative geopolymer binder has been developed. A wide range of geopolymer concrete compositions has been developed through various combinations of ash and slag waste disposal products. Unlike the hydration products of traditional Portland cement concretes, which are represented by the main structure-forming neoplasms of calcium silicate hydrates, the microstructure in the developed geopolymers is composed of calcium and sodium hydroaluminosilicates. In this case, aluminum atoms embedded in the crystal lattice of hydrated neoplasms significantly strengthen it.

Conclusions. The effectiveness of using ash and slag waste from thermal power plants as a source for producing new environmentally friendly geopolymer concretes of classes up to B60 for compression and Btb10.0 for bending tension has been scientifically substantiated and experimentally proven. The compressive and flexural strength of the developed materials suggests their competitiveness in comparison with traditional Portland cement concretes. The compressive strength of the developed geopolymers is 2 times higher than the same characteristic for materials based on common Portland cement CEM I 32.5N and 1.5 times higher than for high-strength CEM I 42.5N.

Keywords: geopolymer, concrete, ash and slag, waste, alkaline activation, compressive strength, flexural strength, composition

For citation: Kozlov P.G., Ayubov N.A. Geopolymer concrete from hydro removed coal ash. *Concrete and reinforced concrete*, 2026, no. 3(634), pp. 19–33 (In Russian) [https://doi.org/10.37538/0005-9889-2026-3-\(634\)-19-33](https://doi.org/10.37538/0005-9889-2026-3-(634)-19-33). EDN: EVABM

Authors contribution statements

Kozlov P.G. – conceptualization, experiments conducting, results processing, article writing.

Ayubov N.A. – results processing, article writing.

Funding

No funding support was obtained for the research.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Received 20.03.26

Revised 23.04.26

Accepted 30.04.24

Введение

Сжигание угля на тепловых электростанциях (ТЭС) приводит к образованию значительного количества золошлаковых отходов (ЗШО), складываемых на полигонах и представляющих серьезную угрозу для окружающей среды (загрязнение воздуха, воды и почвы, а также разрушение природных ландшафтов) [1–2]. Многие полигоны расположены рядом с жилыми районами, подвергая риску здоровье населения, а предприятия, вынужденные хранить золошлаковые отходы, несут значительные финансовые потери из-за негативного воздействия на окружающую среду (НВОС), в свою очередь, золошлаковые материалы (ЗШМ), после определенной подготовки, могут служить основой для производства конкурентоспособной бесцементной продукции строительного назначения, что является научной задачей [3–4]. Геополимеры представляют собой перспективное направление в материаловедении, предлагая потенциальную замену портландцементу в бетонных смесях. Геополимеризация – это процесс отверждения алюмосиликатных материалов под действием щелочных активато-

ров с образованием трехмерной аморфной структуры [10–11]. Однако широкое внедрение геополимерного бетона в гражданское строительство сдерживается необходимостью высокотемпературной термообработки и сложностью контроля реологии смеси [1, 3, 5].

В таблице 1 приведен сравнительный обзор методов получения геополимеров [12–23], которые разнообразны и зависят от целевого применения, доступного сырья и требований к свойствам конечного продукта: щелочная активация – наиболее зрелая и промышленно применимая технология; 3D-печать и электрохимическая активация – перспективные «зелёные» направления; термические и гидротермальные методы позволяют получать материалы с уникальными свойствами; механохимическая активация и сухое прессование – эффективны для повышения качества и прочности.

Выбор метода определяется балансом между экономичностью, экологичностью, прочностью и технологичностью. В будущем ожидается интеграция этих подходов в гибридные процессы для создания «умных», устойчивых и функциональных материалов.

Таблица 1

Методы получения геополимеров

Table 1

Methods for producing geopolymers

Метод	Температура, °C	Преимущества	Недостатки	Область применения
Щелочная активация	20–90	Простота, высокая прочность	Агрессивные реагенты	Строительство, промышленность
Кислотная активация	20–80	Безопасность, биосовместимость	Низкая прочность	Медицина, покрытия
Термическое спекание	600–1200	Высокая термостойкость	Высокое энергопотребление	Огнеупоры, космические технологии
Сухое прессование	60–100	Высокая плотность	Требуется наличие пресса	Изделия специального назначения
3D-печать	20–80	Индивидуализация, сложные формы	Высокие требования к реологии	Медицина, архитектура
Электрохимический	20–60	«Зелёный» процесс	Экспериментальный	Перспективные технологии
Механохимический	20–60	Повышение активности	Энергозатраты на помол	Модификация сырья

В настоящее время геополимеры находятся в начале своего развития, поэтому наиболее эффективной является традиционная технология – щелочной активации. При этом, перспективным представляется развитие не в направлении усложнения технологии, а, наоборот, в снижении трудоемкости, материалоемкости, себестоимости и экологической нагрузки. Обзор мировой научной литературы выявил существенный пробел в изучении механизмов структурообразования геополимерных строительных материалов на основе гидроудаленных золошлаковых отходов.

Объектом исследования являются золошлаковые отходы, генерируемые в результате сжигания твер-

дого топлива на тепловых электростанциях и, после гидроудаления, складываемые на полигонах.

Предметом исследования является получение геополимерных строительных материалов при много-тоннажной утилизации золошлаковых отходов.

Цель работы: Разработка научно обоснованного технологического решения получения геополимерных строительных материалов на основе гидроудаленных золошлаковых отходов теплоэлектростанций.

Материалы и методы исследований

Основой для геополимеров были ЗШО Владивостокской ТЭЦ-2, Приморской ГРЭС и Артёмовской ТЭЦ Приморского края (таблица 2, рис. 1, 2).

Таблица 2

Химический состав применяемых золошлаковых отходов, мас. %

Table 2

Chemical composition of the ash and slag waste used, wt. %

ТЭС	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	CaO _{св}	MgO	SO ₃	TiO ₂	K ₂ O	др.	п.п.п.*
Артемовская ТЭЦ	52,3 ±0,3	21,5 ±0,4	6,1 ±0,4	4,4 ±0,2	0,6 ±0,06	1,6 ±0,9	0,5 ±0,1	0,4 ±0,06	1,1 ±0,1	1,9 ±0,2	9,6 ±0,5
Владивостокская ТЭЦ-2	51,0 ±0,6	23,1 ±0,5	5,8 ±0,3	4,3 ±0,6	0,5 ±0,03	1,5 ±0,8	0,4 ±0,1	0,6 ±0,04	0,9 ±0,1	1,7 ±0,2	10,2 ±0,4
Приморская ГРЭС	51,2 ±0,7	21,0 ±0,5	6,4 ±0,6	4,5 ±0,1	0,4 ±0,06	1,7 ±0,7	0,6 ±0,1	0,3 ±0,06	1,2 ±0,5	2,1 ±0,3	10,6 ±0,6

*Потери при прокаливании представлены недожженным углем (углеродом) и другими примесями

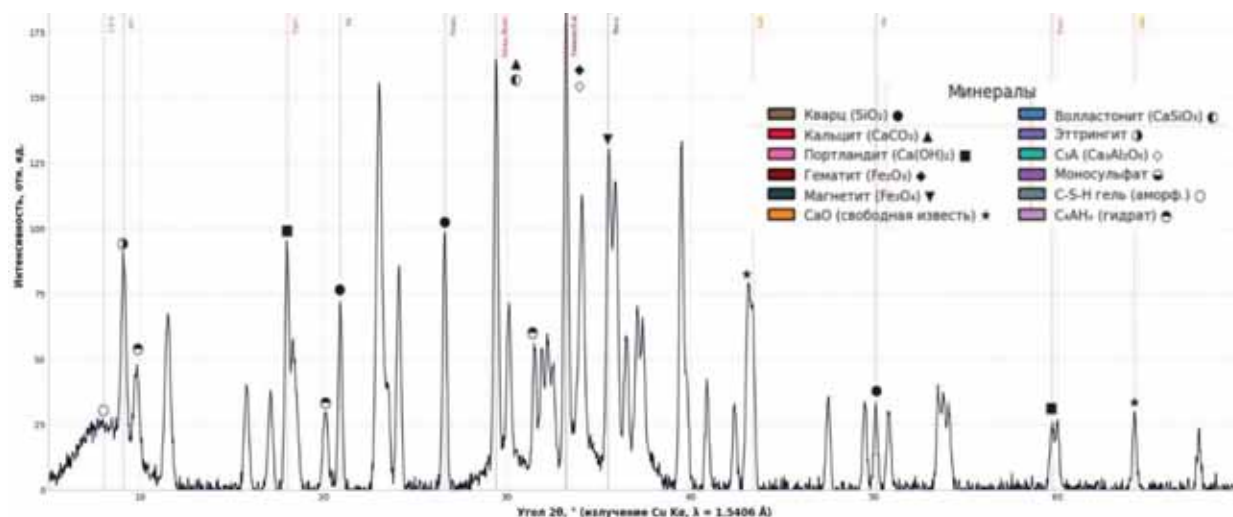


Рис. 1. Результаты РФА золошлаковых отходов Владивостокской ТЭЦ-2

Fig. 1. XRF results of ash and slag waste from Vladivostok CHPP-2

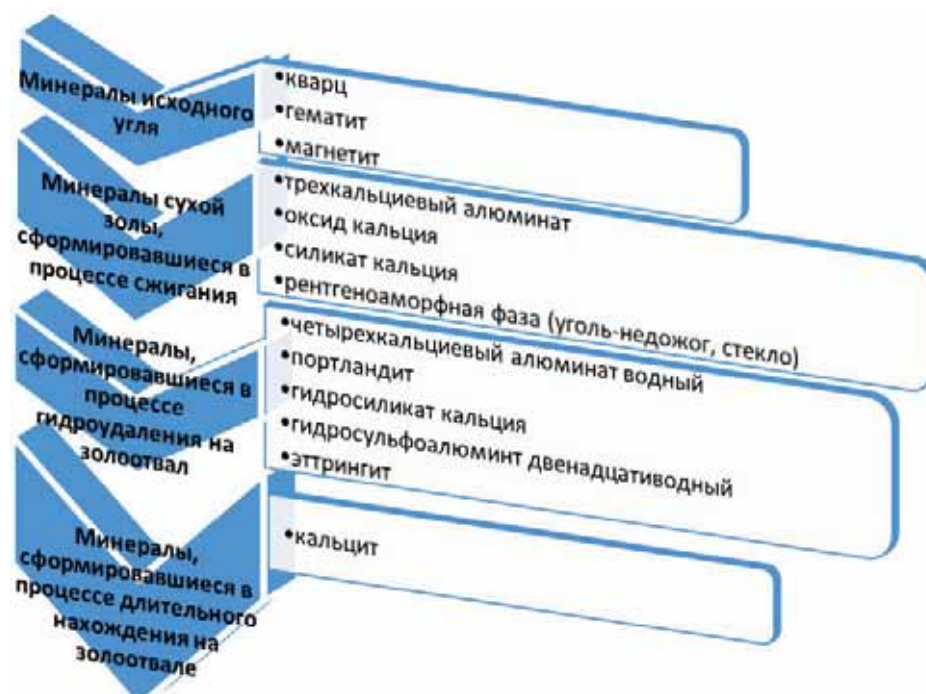


Рис. 2. Генезис минералов гидроудаленных золошлаковых отходов

Fig. 2. Genesis of minerals of hydro-removed ash and slag waste

Результаты рентгенофазового анализа исходных гидроудаленных золошлаковых отходов свидетельствуют о следующем:

- высокая интенсивность кварца (26,6°) характеризует большое содержание инертной фазы, потенциально снижающей реакционную способность гидроудаленных золошлаковых отходов;

- преобладание портландита (18,0°) перед кальцитом (29,4°) характерно для активной гидратации гидроудаленных золошлаковых отходов с минимальной карбонизацией;

- наличие свободного CaO (32,2°, 43,4°) приводит к риску деструктивных расширений в бетоне, поэтому требует контроля.

- этtringит (9,1°) без моносulfата показывает достаточное содержание sulfатов, является стабильной системой.

- широкий пик C-S-H (~8°) характеризует наличие аморфной вяжущей фазы; чем шире и выше – тем больше геля.

В качестве щелочного активатора использовался гидроксид натрия (каустическая сода) производства

Zhongtai Chemical (KHP) в форме гранул (NaOH с чистотой 98 %) плотность: около 2,13 г/см³ при 20°C. Второй компонент активатора (жидкое стекло) получен из золошлаковых отходов.

Для затворения бетонных смесей применялась питьевая вода местных трубопроводов г. Владивостока (pH = 6,5, жесткость – 0,5 мг-экв/л).

В качестве мелкого заполнителя использовалось сырье схожей гранулометрии (таблицы 3–5): природный полифракционный кварцевый песок Раздольненского месторождения (Приморский край) с удельным весом 2,54 и техногенный песок, полученный из золошлаковых отходов, с удельным весом 1,59.

Для комплексного исследования сырьевых компонентов и разработанных материалов были применены современные методы: рентгенофазовый анализ, энергодисперсионный микроанализ, сканирующая электронная микроскопия, дифференциально-термический анализ, инфракрасная спектроскопия. Физико-механические свойства разработанных геополимеров оценивались по средней плотности, а также прочности на сжатие и на изгиб.

Таблица 3

Физические свойства заполнителя

Table 3

Physical properties of the filler

Свойства	Природный	Техногенный
Насыпная плотность в естественном состоянии	1440±4 кг/м ³	944±2 кг/м ³
Насыпная плотность в уплотненном состоянии	1600±5 кг/м ³	1060±3 кг/м ³
Удельный вес	2,54±0,02	1,57±0,01
Пустотность в естественном состоянии	0,79±0,01	0,80±0,01
Пустотность в уплотненном состоянии	0,84±0,01	0,83±0,01
Пористость в естественном состоянии	0,47±0,01	0,51±0,01
Пористость в уплотненном состоянии	0,46±0,01	0,45±0,01

Таблица 4

Химический состав природного и техногенного заполнителя

Table 4

Chemical composition of natural and man-made aggregates

Заполнитель	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	CaO _{св}	MgO	SO ₃	TiO ₂	K ₂ O + Na ₂ O	др.
Природный	97,6	1,5	0,4	0,1	-	0,1	-	0,1	0,2	-
Техногенный	60,9–61,5	25,4–28,1	0,8–1,4	4,3–4,5	0,2–0,3	1,5–1,7	0,4–0,6	0,3–0,6	0,9–1,2	1,7–2,1

Таблица 5

Минеральный состав природного и техногенного заполнителя

Table 5

Mineral composition of natural and man-made aggregates

Заполнитель	кварц	каолинит	гематит	доломит	муллит	периклаз	рутил	др.
Природный	96,2	2,5	0,4	0,3	0,3	0,1	0,1	0,1
Техногенный	55,9–56,5	30,4–33,1	1,3–1,9	3,8–4,0	0,4–0,5	1,3–1,5	0,2–0,7	0,2

Результаты и их обсуждение

Предлагаемая авторами технология предварительной подготовки ЗШМ является усовершенствованием разработок лаборатории использования вто-

ричных ресурсов Дальневосточного федерального университета (канд. хим. наук А.В. Таскин [24], канд.

техн. наук Ю.Л. Лисейцев [25], канд. техн. наук И.И. Панарин [26]) (таблица 6). В отличие от ранее созданных технологических решений, авторами впервые разработана технология получения геополимерных материалов из гидроудаленных золошлаковых отходов.

Переработка золошлаковых отходов представляет собой сложную задачу, связанную с тем, что значительная часть ценных компонентов, таких как алюминий и кремний, заключена в кристаллической решетке муллита – весьма устойчивого алюмосиликата, отличающегося высокой химической инертностью. Для решения этой задачи в нашем исследовании создан инновационный метод, состоящий из двух этапов и значительно повышающий эффективность получения

алюмосиликатного геополимерного вяжущего из золошлаковых материалов. Первый этап этого метода заключается в обработке щелочью. Золошлаковые материалы подвергаются воздействию раствора каустической соды (гидроксид натрия NaOH) – сильного щелочного соединения. Для активации предварительно подготовленных золошлаковых материалов в сухой пластиковой ёмкости перемешаны золошлаковые материалы и каустическая сода в разных пропорциях. В связи с тем, что прекурсор (золошлаковые материалы, предварительно подготовленные по авторской технологии) является новым и не исследованным, необходимо подобрать рациональное соотношение компонентов для максимальной активации (таблица 7).

Таблица 6

Сравнение результатов авторов по предварительной подготовке золошлаковых материалов с аналогами

Table 6

Comparison of the authors' results on the preliminary preparation of ash and slag materials with similar results

Технологический этап	Результаты А.В. Таскина [24]	Результаты Ю.Л. Лисейцева [25]	Результаты И.И. Панарина [26]	Результаты авторов
Дезагрегация с сепарацией	< 0,045 мм	< 0,1 мм	< 0,16 мм	0,045 – 0,325 мм
Удаление недожога	Флотация – 1500 об/мин, 12 мин	Флотация – 1500 об/мин, 10 мин	Флотация – 1700 об/мин, 7 мин	Флотация – 1500 об/мин, 3–5 мин
Магнитная сепарация	0,4 Тл, 7 мин	0,5 Тл, 5 мин	0,6 Тл и 0,4 Тл по 2,5 мин	0,3–0,6 Тл и 0,1–0,3 Тл 5 мин
Сушка	350°C, 55 мин	300°C, 60 мин	250°C, 50 мин	150°C, 1 час

Таблица 7

Пропорции разработанных составов, мас. доли

Table 7

Proportions of the developed compositions, mass fractions

Состав	ЗШМ	NaOH	H ₂ O
1	1	3	5
2	1	2	4
3	2	2	7

Полученная сухая вяжущая смесь является инновационной и перспективной. Это подтверждается тем, что в отличие от традиционных классических составов геополимеров, где щелочь добавляется на этапе окончательного смешивания компонентов, полученный материал является готовым к применению без сложных и опасных технологических процессов («просто добавь воды»).

Жидкая фаза полученного в автоклаве раствора подлежит дальнейшей обработке соляной кислотой для получения диоксида кремния (четвертый побочный продукт).

Поскольку геополимерный бетон является новым (малоисследованным) строительным материалом, у него нет стандартного состава смеси. Из анализа литературы известно, что при проектировании геопо-

лимера заполнитель принят около 70 % от всей бетонной смеси по массе. Зная плотность бетона, можно получить объединённую массу щелочной жидкости и золошлаковые материалы.

Для определения соотношения смеси для различных марок геополимерного бетона применяется метод математического планирования экспериментов (совокупность статистических и математических процедур, направленных на рациональный выбор условий проведения экспериментов с целью установления количественных зависимостей между факторами и откликом, минимизации числа опытов и повышения достоверности получаемых моделей), в котором варьировались 3 переменные (молярность (концентрация раствора гидроксида натрия, который применялся при автоклавировании золошлаковых материалов), добавление кремнезема, полученного по разработанной технологии и уровень замещения песка на предварительно подготовленные золошлаковые материалы в качестве заполнителя) (таблица 8). Варьируемые переменные выбраны на основе анализа литературы и предварительных исследований авторов.

Таблица 8

Разработанные составы геополимеров, мас. %

Table 8

Developed geopolymer compositions, wt. %

Маркировка образцов	Компоненты					Молярность осадка автоклавирования
	Осадок автоклавирования	ЗШМ	Песок	Кремнезем	Вода	
Г1	15	0	70	0	12	6
Г2	14,5	0	70	0,5	14	4
Г3	15	0	70	0	14	4
Г4	14,5	0	70	0,5	10	8
Г5	14	35	35	1	12	6
Г6	14	35	35	1	10	8
Г7	14	70	0	1	14	4
Г8	15	70	0	0	10	8

Структурообразование разработанных композиций можно оценить по динамике уплотнения на протяжении нормативного срока твердения (и даже за его пределами).

Сравнивая массу одинаковых объемов различных сырьевых смесей, видим, что основное влияние на нее оказывает наиболее высокоплотный материал – песок (таблица 9).

Таблица 9

Плотность геополимеров в различные сроки твердения, кг/м³

Table 9

Density of geopolymers at various curing times, kg/m³

Маркировка образцов	Сырьевая смесь	1 сутки	7 суток	14 суток	28 суток	56 суток
Г1А	2176	2182±3	2375±7	2429±5	2498±10	2515±11
Г1В	2180	2186±5	2381±9	2434±8	2502±9	2519±10
Г1П	2178	2184±6	2377±5	2431±8	2500±10	2517±9
Г2А	2176	2185±8	2375±8	2433±7	2505±7	2523±8
Г2В	2180	2188±3	2379±4	2436±6	2509±8	2517±11
Г2П	2178	2186±7	2379±7	2434±5	2507±7	2525±10
Г3А	2175	2183±8	2376±9	2431±8	2503±9	2521±8
Г3В	2179	2186±5	2378±5	2434±6	2507±8	2525±11
Г3П	2177	2184±6	2376±8	2432±9	2505±7	2523±8
Г4А	2176	2184±4	2373±6	2432±7	2504±8	2522±9
Г4В	2180	2187±3	2381±7	2435±5	2508±10	2526±10
Г4П	2178	2185±6	2377±9	2433±8	2506±7	2524±9
Г5А	1876	1885±7	2077±5	2133±7	2205±8	2223±8
Г5В	1880	1888±5	2079±4	2136±6	2209±9	2227±11
Г5П	1878	1886±8	2079±8	2134±9	2207±7	2225±9
Г6А	1878	1887±7	2077±7	2135±8	2207±8	2227±10
Г6В	1882	1890±8	2083±5	2138±9	2211±7	2229±8
Г6П	1880	1888±3	2079±9	2136±5	2209±10	2227±9
Г7А	1577	1586±7	1778±7	1834±9	1906±7	1924±9
Г7В	1581	1589±6	1780±6	1837±7	1910±8	1928±11
Г7П	1579	1587±4	1780±8	1835±9	1908±9	1926±9
Г8А	1577	1586±6	1776±6	1832±6	1904±8	1922±10
Г8В	1581	1587±5	1782±7	1835±5	1908±7	1926±9
Г8П	1579	1585±3	1778±9	1834±8	1906±10	1924±11

Примечание: последние буквы в маркировке образцов обозначают ТЭС, с которой взяты ЗШО: А – Артемовская ТЭС, В – Владивостокская ТЭС-2, П – Приморская ГРЭС

С точки зрения структурообразования экспериментальные результаты динамики уплотнения можно объяснить следующим образом. В индукционный период и при начале гелеобразования (1 сутки) происходит быстрое растворение алюмосиликатного сырья в щелочном активаторе с высвобождением ионов Si^{4+} и Al^{3+} . Начинается поликонденсация с образованием кремнезёмисто-алюминатных олигомеров (Si-O-Al связей). Материал находится в пластичном состоянии, затем начинает загустевать. Плотность начинает увеличиваться за счёт уменьшения пористости и начала коагуляции.

На следующем этапе (интенсивная гелеобразующая и конденсационная стадия) происходит активное формирование трёхмерной геополимерной сети (N-A-S-H гель – натриевый алюмосиликатный гидрат). Отмечается снижение щелочности и стабилизация pH. Материал твердеет, объёмная усадка может быть незначительной. Поры начинают заполняться гелевой фазой, поэтому плотность значительно растёт (до $\sim 200 \text{ кг/м}^3$ от исходной смеси).

К 14 суткам завершается активная геополимеризация – основная масса гелеобразной фазы уже сформирована. Происходит «созревание» структуры – перестройка и уплотнение гелевой сети. Плотность продолжает расти, но медленнее. Уменьшается количество макро- и микропор.

К 28 суткам происходит стабилизация структуры – геополимеризация практически завершена. Возможны медленные постконденсационные процессы. Структура становится плотной и однородной. Остаточная пористость (а значит, и плотность) практически достигает минимума. При дальнейшем долгосрочном структурном «созревании» (до 56 суток) отмечаются очень медленные процессы уплотнения и рекристаллизации (частичная кристаллизация цеолитоподобных фаз). Плотность может незначительно увеличиться (на 1 %) за счёт дальнейшего уплотнения. В некоторых случаях – стабилизация или даже незначительное снижение плотности из-за микроусадки или образования микротрещин.

Типичным продуктом реакции геополимеризации является полученный затвердевший материал, микро-

структура которого представляет собой плотную упаковку цеолитоподобных новообразований (рис. 3). Морфологические особенности микроstructures изучались на растровом электронном микроскопе (РЭМ) Tescan MIRA3, позволяющим осуществлять энергодисперсионную спектроскопию. Ускоряющее напряжение – до 30 кВ. Разрешение – до 1 нм. Детекторы: SE (вторичные электроны) – для рельефа; BSE (обратно рассеянные электроны) – для фазового контраста; EDS-детектор (энергодисперсионный) – для элементного анализа. При использовании РЭМ визуализировано распределение частиц, выявлено наличие дефектов и изучен механизм взаимодействия компонентов.

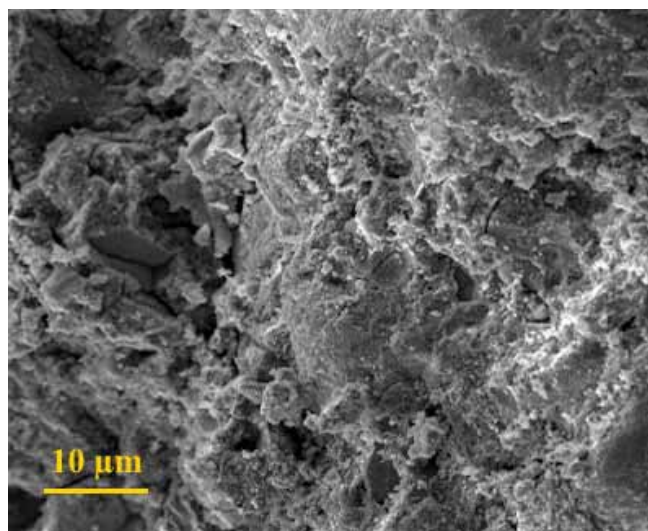


Рис. 3. Микроструктура разработанных геополимеров в возрасте 28 суток (образец Г5А)

Fig. 3. Microstructure of the developed geopolymers at the age of 28 days (sample G5A)

Микроструктурный энергодисперсионный анализ подтверждает присутствие гидросиликатных тоберморитоподобных соединений, гидроалюмосиликатов кальция и натрия типа C-A-S-H и N-A-S-H (рис. 4).

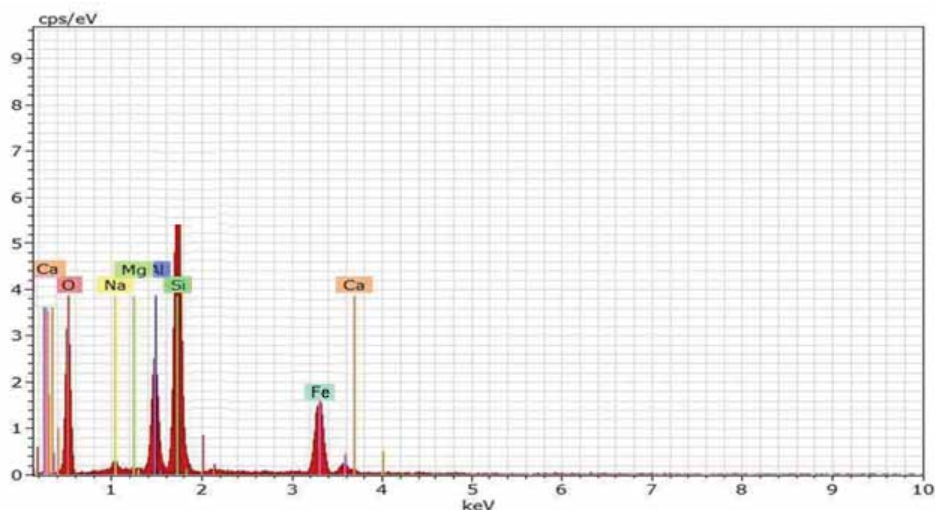


Рис. 4. Микроструктурный энергодисперсионный анализ разработанных геополимеров в возрасте 28 суток (образец Г1В)

Fig. 4. Microstructural energy dispersive analysis of the developed geopolymers at the age of 28 days (sample G1B)

Эти же результаты подтверждаются исследованиями методом РФА (рис. 5), показывающими эффективность структурообразования геополимеров, представленных различными алюминатными соединениями.

Результаты дифференциально-термического анализа показаны на рис. 6, где две очевидные области потери массы сосредоточены при 20–220°C и 670–680°C. Испарение физически адсорбированной воды или не прореагировавшей свободной воды происходит в нижней области около 100°C. Для разработанных геополимеров потери массы около 20–220°C в основном связаны с разложением продуктов гидратационного геля. Комплексные исследования (СЭМ, ЭДС, РФА, ДТА, ИК-спектроскопия) показывают преимущественно наличие гелей Ca(Na)-A-S-H, обеспечивающих прочность матрицы. Другой очевидный диапазон дифференциального термического анализа – около 675°C, что объясняется разложением карбонатной фазы.

На рис. 7 представлены характерные пики инфракрасного спектра как для золошлаковых материалов, так и для геополимеров.

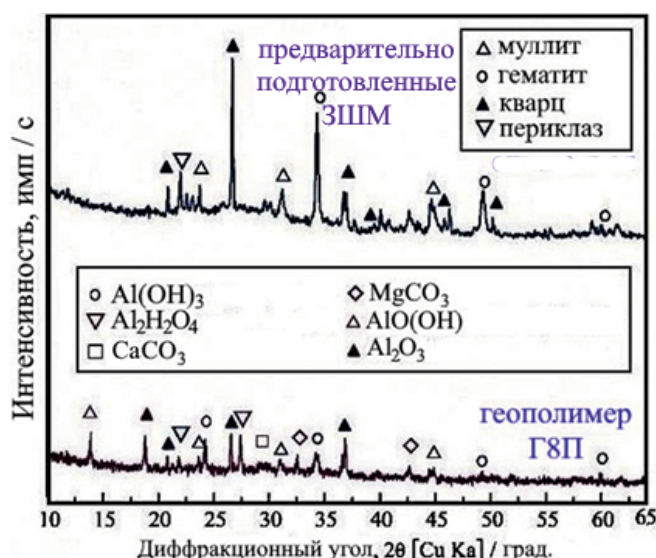


Рис. 5. Рентгенофазовый анализ разработанных геополимеров в возрасте 28 суток в сравнении с исходными золошлаковыми материалами

Fig. 5. X-ray phase analysis of the developed geopolymers at the age of 28 days in comparison with the original ash and slag materials

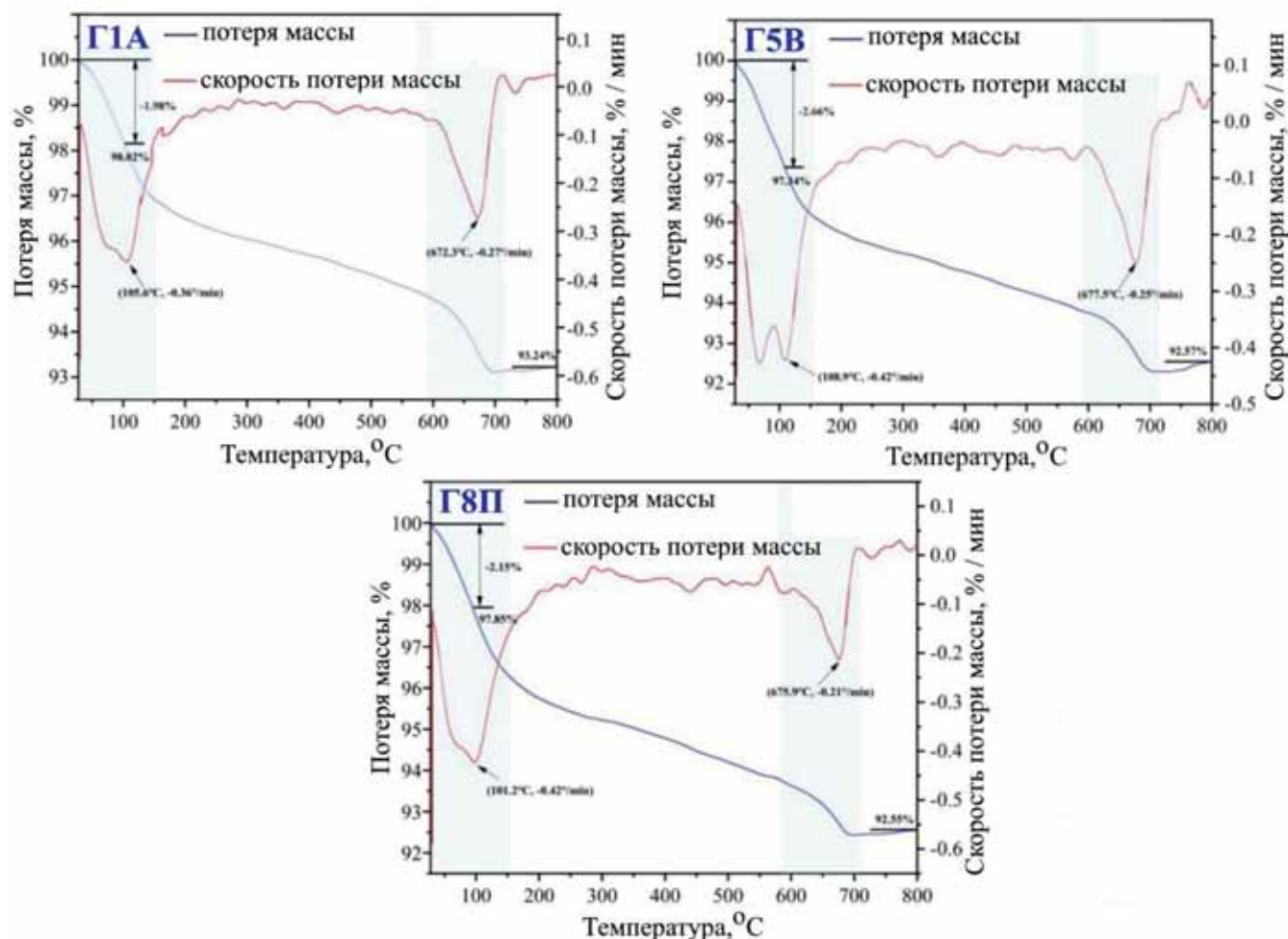


Рис. 6. Результаты дифференциально-термического анализа разработанных геополимеров

Fig. 6. Results of differential thermal analysis of the developed geopolymers

Присутствие функциональных групп, принадлежащих природному цеолиту, соответствующему геополимеру и предварительно подготовленным золошлаковым материалам, подтверждается анализом спектров. ИК-спектры золошлаковых материалов и разработанных геополимеров были интерпретированы с использованием установленных соотношений для алюмосиликатных каркасов.

Широкая полоса в области $3200 - 3440 \text{ см}^{-1}$ относится к валентным колебаниям O-H и N-H (водородно-связанные гидроксилы). Поглощение в области $1020 - 1100 \text{ см}^{-1}$ согласуется с асимметричным растяжением связи Si-O-(Al/Si), типичным для геополимерных гелей. Полоса в области $1320 - 1390 \text{ см}^{-1}$ может быть отнесена к колебаниям карбоната. Полоса пропускания в диапазоне от 550 см^{-1} до 1037 см^{-1} представляет собой симметричное растяжение связи (Si-O-Si и Al-O-Si) кристаллических и аморфных алюмосиликатов. Полосы около 690 см^{-1} и 799 см^{-1} соответствуют симметричным валентным колебаниям (Si-O-Si), в этих диапазонах предполагается присутствие кварца, тогда как в диапазоне $883-1425 \text{ см}^{-1}$ наблюдается полоса пропускания, представляющая собой валентные колебания связи O-C-O карбоната.

Наконец, в полосе пропускания более 3000 см^{-1} это соответствует растяжению гидроксильной группы, которая, как предполагается, соответствует гидроксидам, используемым в качестве активаторов геополимеров или поверхностных вод.

Таким образом, выявлен механизм структурообразования щелочеактивированных материалов с применением различных продуктов предварительно подготовленных золошлаковых материалов. В отличие от продуктов гидратации традиционных портландцементных бетонов, представленных основными структурообразующими новообразованиями алюминатов и гидросиликатов кальция, в разработанных геополимерах микроструктура составлена гидроалюмосиликатами кальция и натрия. В этом случае, атомы алюминия, встроенные в кристаллическую решетку гидратных новообразований, значительно упрочняют ее.

Характеристики прочности при сжатии соответствуют динамике уплотнения, приведенной в предыдущем разделе. Отмечается высокая ранняя прочность: в первые сутки образцы распулубливаются, а во вторые – залитая конструкция уже вполне выдерживает свой вес и готова к щадящей эксплуатации, показывая значения прочности при сжатии в диапазоне $7,2 - 14,3 \text{ МПа}$ в зависимости от состава. Образцы с кварцевым песком вполне закономерно показывают более высокую прочность, однако даже при полном замещении природного заполнителя предварительно подготовленными золошлаковыми материалами ранняя прочность отличается всего лишь на $1-2 \text{ МПа}$ (таблица 10).

В дальнейшие сроки упрочнения эта тенденция сохраняется, достигая в марочном возрасте $67,3 \text{ МПа}$. И, как было установлено в предыдущем раз-

деле относительно плотности, упрочнение так же продолжается и дальше, правда заметно снижая свою интенсивность. Здесь отмечается интересная тенденция: образцы Г1–Г4 с использованием природного кварцевого песка с 28 до 56 суток повышают значения предела прочности при сжатии от 1 до 3 МПа, а при использовании малопесчаных или беспесчаных заполнителей (образцы Г4–Г6) упрочнение на этом этапе идет вдвое интенсивнее – от 4 до 6 МПа. Это доказывает факт того, что золошлаковый заполнитель выступает также в роли активного структурообразующего компонента (наполнителя).

Аналогичная тенденция, как и для прочности при сжатии, отмечается и для прочности при изгибе (таблица 11). Разработанные образцы во все сроки твердения показывают высокие прочностные характеристики (до $10,5 \text{ МПа}$). Общее для всех геополимерных бетонов то, что в отличие от традиционного портландцементного бетона, который является хрупким материалом (прочность на изгиб ниже прочности на сжатие до 10 раз), здесь это отношение составляет $1:6-1:7$, что еще раз подтверждает эффективность разработанных материалов.

Внешний вид образцов после испытания предельной разрушающей нагрузкой на изгиб, приведен на рис. 8.

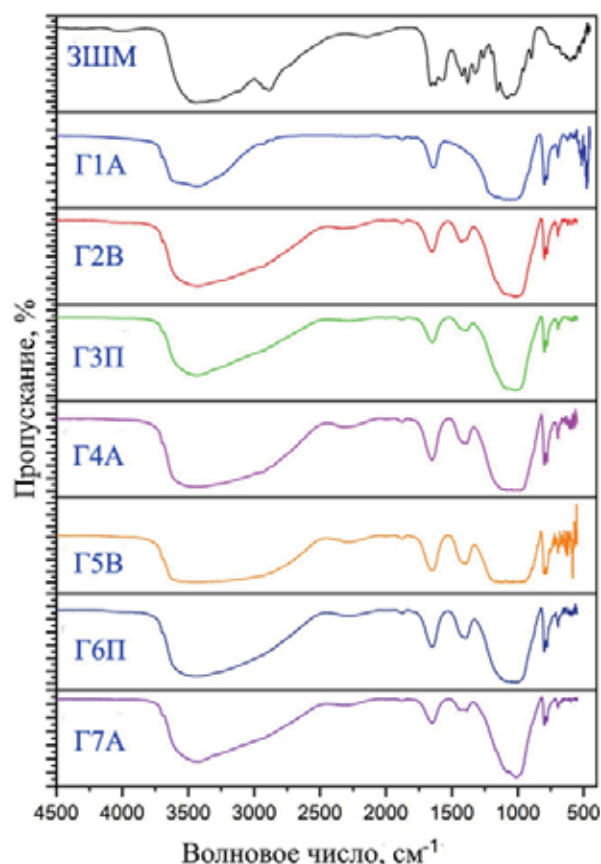


Рис. 7. ИК-спектр разработанных геополимеров в возрасте 28 суток с сравнением с исходными золошлаковыми материалами
Fig. 7. IR spectrum of the developed geopolymers at the age of 28 days in comparison with the original ash and slag materials



Рис. 8. Внешний вид образцов после испытания предельной разрушающей нагрузкой на изгиб

Fig. 8. Appearance of samples after testing with ultimate breaking load in bending

Характер разрушения образцов показывает их монолитную микроструктуру, что говорит об эффективности управления структурообразованием.

Таким образом, научно обоснована и экспериментально доказана эффективность применения золошлаковых отходов ТЭС в качестве источника для получения новых экологически безопасных геополимерных бетонов классов до В60 на сжатие и В_{тб}10,0 на растяжение при изгибе. Прочность при сжатии и изгибе разработанных материалов позволяет говорить об их конкурентоспособности по сравнению с традиционными портландцементными бетонами. Прочность при сжатии разработанных геополимеров в 2 раза превышает аналогичную характеристику для материалов на основе распространенного портландцемента ЦЕМ I 32,5Н и в 1,5 раза выше чем для высокопрочного ЦЕМ I 42,5Н. Общее для всех геополимерных бетонов то, что в отличие от традиционного портландцементного бетона, который является хрупким материалом (прочность на изгиб ниже прочности на сжатие до 10 раз), здесь это отношение составляет 1:6–1:7, что еще раз подтверждает эффективность разработанных материалов.

Таблица 10

Прочность при сжатии геополимеров в различные сроки твердения, МПа

Table 10

Compressive strength of geopolymers at different curing times, MPa

Маркировка образцов	2 суток	7 суток	14 суток	28 суток	56 суток
Г1А	9,1±0,1	21,2±0,5	28,3±0,6	40,9±0,61	42,2±0,7
Г1В	9,1±0,2	21,3±0,6	28,2±0,6	41,0±0,61	42,5±0,7
Г1П	9,2±0,2	21,4±0,4	28,0±0,7	41,1±0,7	42,1±0,8
Г2А	11,2±0,3	28,9±0,6	37,4±0,6	50,4±0,6	52,3±0,7
Г2В	11,1±0,3	29,0±0,5	37,3±0,6	50,5±0,6	52,5±0,6
Г2П	11,3±0,4	28,8±0,7	37,5±0,7	50,3±0,7	52,4±0,8
Г3А	8,1±0,1	17,2±0,4	23,3±0,4	35,9±0,44	37,1±0,5
Г3В	8,1±0,2	17,3±0,2	23,2±0,2	35,0±0,2	37,2±0,17
Г3П	8,2±0,2	17,4±0,3	23,0±0,2	35,1±0,2	37,1±0,27
Г4А	10,3±0,2	23,8±0,6	32,5±0,6	43,3±0,6	47,4±0,62
Г4В	10,2±0,3	23,9±0,6	32,6±0,61	43,3±0,61	47,3±0,27
Г4П	10,4±0,3	23,7±0,4	32,4±0,44	43,5±0,44	47,5±0,44
Г5А	14,2±0,4	34,9±0,8	48,4±0,79	62,4±0,79	67,3±0,8
Г5В	14,1±0,5	35,0±0,6	50,3±0,61	59,5±0,61	65,5±0,61
Г5П	14,3±0,4	35,8±0,7	49,5±0,6	60,4±0,6	66,4±0,62
Г6А	13,2±0,5	33,9±0,7	44,4±0,7	56,4±0,7	62,3±0,7
Г6В	13,1±0,4	31,0±0,8	46,3±0,8	55,5±0,8	61,5±0,7
Г6П	13,3±0,3	34,8±0,6	45,5±0,7	57,4±0,7	63,4±0,8
Г7А	12,2±0,4	30,9±0,5	41,4±0,52	52,4±0,52	57,3±0,53
Г7В	12,1±0,3	29,0±0,4	43,3±0,27	53,5±0,27	57,5±0,27
Г7П	12,3±0,4	28,8±0,5	42,5±0,52	51,4±0,52	57,4±0,53
Г8А	7,0±0,2	15,2±0,1	20,3±0,1	27,9±0,6	32,1±0,1
Г8В	7,1±0,3	15,3±0,3	20,2±0,4	28,0±0,4	32,2±0,53
Г8П	7,2±0,1	15,4±0,2	20,0±0,2	28,1±0,2	32,1±0,44

Таблица 11

Прочность при изгибе геополимеров в различные сроки твердения, Мпа

Table 11

Bending strength of geopolymers at different curing times, MPa

Маркировка образцов	2 суток	7 суток	14 суток	28 суток	56 суток
Г1А	1,3±0,06	3,5±0,18	4,0±0,20	6,9±0,36	7,2±0,36
Г1В	1,3±0,06	3,5±0,18	4,2±0,21	6,9±0,35	7,5±0,37
Г1П	1,4±0,07	3,4±0,17	4,0±0,20	6,9±0,35	7,1±0,35
Г2А	1,9±0,09	3,9±0,19	5,4±0,27	7,1±0,35	7,3±0,36
Г2В	1,8±0,09	4,0±0,20	5,3±0,27	7,1±0,35	7,5±0,37
Г2П	1,9±0,09	3,8±0,19	5,5±0,27	7,2±0,36	7,4±0,36
Г3А	1,2±0,06	2,8±0,14	3,9±0,20	5,1±0,25	6,1±0,30
Г3В	1,2±0,06	2,8±0,14	3,9±0,20	5,0±0,25	6,2±0,31
Г3П	1,3±0,06	2,8±0,14	3,9±0,20	5,1±0,25	6,1±0,30
Г4А	1,5±0,06	3,8±0,19	4,1±0,20	6,1±0,30	7,9±0,39
Г4В	1,4±0,07	3,9±0,19	4,2±0,21	6,1±0,30	7,9±0,39
Г4П	1,5±0,07	3,7±0,18	4,3±0,21	6,2±0,31	7,9±0,39
Г5А	2,3±0,10	4,9±0,24	8,1±0,46	10,4±0,52	10,5±0,52
Г5В	2,2±0,11	5,0±0,25	8,3±0,41	10,3±0,52	10,5±0,52
Г5П	2,3±0,11	5,1±0,25	8,5±0,42	10,4±0,52	10,5±0,52
Г6А	2,2±0,10	4,9±0,24	6,4±0,32	9,8±0,49	10,3±0,52
Г6В	2,1±0,10	4,8±0,24	6,3±0,32	9,7±0,48	10,5±0,53
Г6П	2,3±0,11	4,8±0,24	6,5±0,32	9,8±0,49	10,4±0,52
Г7А	2,2±0,11	3,9±0,19	6,9±0,33	8,6±0,43	9,9±0,49
Г7В	2,1±0,10	4,0±0,17	7,0±0,35	8,5±0,42	9,9±0,49
Г7П	2,3±0,11	3,8±0,19	7,0±0,32	8,4±0,42	9,8±0,49
Г8А	1,0±0,05	2,2±0,11	3,3±0,32	4,9±0,44	5,8±0,28
Г8В	1,1±0,05	2,3±0,11	3,2±0,20	4,0±0,40	5,8±0,59
Г8П	1,2±0,06	2,4±0,12	3,0±0,15	4,1±0,20	5,6±0,58

Заклучение

1. Усовершенствовано технологическое решение предварительной подготовки золошлаковых отходов (включающее дезинтеграцию с сепарацией фракции 0,045–0,325 мм, гидроклассификацию, флотацию, двухстадийную магнитную сепарацию и сушку), которые по своему химическому составу способны стать эффективной основой для геополимерного вяжущего.

2. Разработано инновационное геополимерное вяжущее из предварительно подготовленных золошлаковых материалов. В отличие от традиционных геополимерных систем, требующих введения едкой щёлочи на стадии приготовления рабочей смеси, разработанный материал готов к использованию – для активации достаточно лишь добавить воду, что исключает необходимость в сложных, энергоёмких и потенциально опасных технологических операциях.

3. Методом математического планирования экспериментов разработана широкая номенклатура

составов геополимерных бетонов путём различной комбинации продуктов утилизации золошлаковых отходов, при этом лучшим методом уплотнения признано вибрирование с частотой 1000 об/мин в течение 1 минуты.

4. Выявлен механизм структурообразования щелочеактивированных материалов с применением различных продуктов предварительно подготовленных золошлаковых материалов. В отличие от продуктов гидратации традиционных портландцементных бетонов, представленных основными структурообразующими новообразованиями гидросиликатов кальция, в разработанных геополимерах микроструктура составлена гидроалюмосиликатами кальция и натрия. В этом случае, атомы алюминия, встроенные в кристаллическую решетку гидратных новообразований, значительно упрочняют ее.

5. Научно обоснована и экспериментально доказана эффективность применения золошлаковых отходов ТЭС в качестве источника для получения новых

экологически безопасных геополимерных бетонов классов до В60 на сжатие и В_{тб}10,0 на растяжение при изгибе. Прочность при сжатии и изгибе разработанных материалов позволяет говорить об их конкурентоспособности по сравнению с традиционными портландцементными бетонами. Прочность при сжатии разработанных геополимеров в 2 раза превышает аналогичную характеристику для материалов на основе распространенного портландцемента ЦЕМ I 32,5Н и в 1,5 раза выше чем для высокопрочного ЦЕМ I 42,5Н. Общее для всех геополимерных бетонов то, что в отличие от традиционного портландцементного бетона, который является хрупким материалом (прочность на изгиб ниже прочности на сжатие до 10 раз), здесь это отношение составляет 1:6–1:7, что еще раз подтверждает эффективность разработанных материалов.

Список литературы

1. Астафьева О.Е. Применение золошлаковых отходов в промышленности строительных материалов // *Уголь*. 2024. № 2(1177). С. 85–88. DOI 10.18796/0041-5790-2024-2-85-88. EDN JNPGHR.
2. Перевощикова А.Н., Вальцифер И.В., Кондрашова Н.Б., Воронина Н.С. Исследование физико-механических свойств бетона с добавлением многофункциональной добавки // *Нанотехнологии в строительстве: научный интернет-журнал*. 2024. Т. 16. № 2. С. 170–179. DOI 10.15828/2075-8545-2024-16-2-170-179. EDN BFTEZA.
3. Шарифов А., Муминов А., Акрамов А.А. и др. Модифицирование цемента золой угля Фан-Ягнобского месторождения для повышения прочности бетона // *Политехнический вестник. Серия: Инженерные исследования*. 2022. № 1(57). С. 157–163. EDN NSGMXT.
4. Лукутцова Н.П., Пыкин А.А., Горностаева Е.Ю. и др. Моделирование состава мелкозернистого бетона с золошлаковой смесью и суперпластификатором // *Вестник ВСГУТУ*. 2022. № 2(85). С. 71–77. DOI 10.53980/24131997_2022_2_71. EDN QXOFBE.
5. Патент № 2599742 С2 Российская Федерация, МПК C04B 28/08, C04B 28/26, C04B 111/20. Геополимерный композит для бетона ультра-высокого качества: № 2013132983/03 : заявл. 16.12.2011: опубл. 10.10.2016 / В. Гонг, В. Лутз, Я. Пегг; заявитель Католический Университет Америки. EDN PMKJNW.
6. Патент № 2804940 С1 Российская Федерация, МПК C04B 18/12, C04B 28/24. Геополимерный композит: заявл. 16.05.2023: опубл. 09.10.2023 / Т.А. Петрова, И.П. Сверчков, Ю.Д. Смирнов, А.А. Турковский; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет». EDN VWLWSH.
7. Танг В.Л., Нго С.Х., Ву К.З. и др. Геополимерный бетон с использованием многотоннажных техногенных отходов // *Строительство: наука и образование*. 2021. Т. 11. № 2. С. 17–37. DOI 10.22227/2305-5502.2021.2.2. EDN IJHAPP.
8. Явинский А.В., Лунев А.А., Довыденко А.В. Оценка потенциала щелочных отходов производств для получения геополимерных вяжущих // *Промышленное и гражданское строительство*. 2025. № 11. С. 60–65. DOI 10.33622/0869-7019.2025.11.60-65. EDN SWWWLA.
9. Камилова Р.С. Сравнительный анализ применения геополимерного бетона и портландцемента в строительстве: преимущества и недостатки // *Экономика строительства*. 2025. № 10. С. 615–617. EDN BOBJLT.
10. Петропавловская В.Б., Филиппова О.П., Цховребов Э.С., Новиченкова Т.Б. Экономическая оценка экологически безопасного использования техногенных отходов в производстве геополимеров для нужд строительства // *Экономика строительства*. 2024. № 5. С. 406–409. EDN MWBUXD.
11. Provis J.L., Bernal S.A. Geopolymers and related alkali-activated materials. *Annual Review of Materials Research*, 2014, vol. 44, pp. 299–327. DOI 10.1146/annurev-matsci-070813-113515. EDN YEMHBB.
12. Капустин Ф.Л., Уфимцев В.М. Российские стандарты по использованию золошлаков теплоэнергетики в производстве строительных материалов // *Золошлаки ТЭС: удаление, транспорт, переработка, складирование. Материалы II Международного научно-практического семинара*. 2009. С. 57–64.
13. Davidovits J. Geopolymers: Inorganic polymeric new materials. *Journal of Materials Education*, 1994, vol. 16 (2, 3), pp. 91–138.
14. Ren L., Ding L., Guo Q., Gong Y., Yu G., Wang F. Characterization, carbon-ash separation and resource utilization of coal gasification fine slag: A comprehensive review. *Journal of Cleaner Production*, 2023, vol. 398, article 136554. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.136554>.
15. Sinkhonde D. Quantitative study on surface porosity and roughness parameters of mineral and organic admixtures based on multi-scale characterisation techniques. *Cleaner Materials*, 2023, vol. 7, article 100166. <https://doi.org/10.1016/j.clema.2022.100166>.
16. Thonemann N., Zacharopoulos L., Fromme F., Nühlen J. Environmental impacts of carbon capture and utilization by mineral carbonation: A systematic literature review and meta life cycle assessment. *Journal of Cleaner Production*, 2022, vol. 332, article 130067. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.130067>.
17. Yi Z., Wang T., Guo R. Sustainable building material from CO₂ mineralization slag: Aggregate for concretes and effect of CO₂ curing. *Journal of CO₂ Utilization*, 2020, vol. 40, 101196. <https://doi.org/10.1016/j.jcou.2020.101196>.
18. Yuan H., Yu W., Wen J., Yang F., Nyarko-Appiah J.E., Bai C. A new strategy for CO₂ storage and Al₂O₃ recovery from blast furnace slag and coal fly ash by employing vacuum reduction and alkali dissolution

- methods. *Energy*, 2024, vol. 308, article 132865. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2024.132865>.
19. Zhang D., Zhu T., Ai Q., Mao M., Li J., Yang Q. Performance of coal gangue concrete with fly ash and ground-granulated blast slag: Rheology, mechanical properties and microstructure. *Construction and Building Materials*, 2024, vol. 427, article 136250. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.136250>.
 20. Zhao T., Zhang S., Yang H., Ni W., Li J., Zhang G., Teng G., Li X., Guo S., Zhou Y., Wu Z. Leaching and hydrating mechanisms, economic benefits of backfill materials by using coal fly ash-slag-based binder for environmentally sustainable production. *Construction and Building Materials*, 2023, vol. 397, article 132360. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.132360>.
 21. Zhou X., Chen Y., Dong S., Li H. Geopolymerization kinetics of steel slag activated gasification coal fly ash: A case study for amorphous-rich slags. *Journal of Cleaner Production*, 2022, vol. 379(1), article 134671. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.134671>.
 22. Zhu Y., Wu J., Zhang Y., Miao Z., Niu Y., Guo F., Xi Y. Preparation of hierarchically porous carbon ash composite material from fine slag of coal gasification and ash slag of biomass combustion for CO₂ capture. *Separation and Purification Technology*, 2024, vol. 330, part B, article 125452. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2023.125452>.
 23. Zuo Y., Chen Y., Chen L., Gang Y., Göbel L., Ye G., Provis J. Modeling and simulation of alkali-activated materials (AAMs): A critical review. *Cement and Concrete Research*, 2024, vol. 189, article 107769. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2024.107769>.
 24. Таскин А.В. Химико-технологические решения комплексной переработки золошлаковых отходов промышленности: дисс. ...к.х.н. — Владивосток, 2018. 173 с.
 25. Лисейцев Ю.Л. Дорожные покрытия из наномодифицированных фибробетонов: дисс. к.т.н. / Ю.Л. Лисейцев. Владивосток, 2024. 180 с.
 26. Панарин И.И. Композиционные цементы, активированные обогащенными золошлаковыми смесями, и торкрет-бетоны на их основе: дисс. к.т.н. / И.И. Панарин. Владивосток, 2024. 162 с.
 4. Lukutsova N.P., Pykin A.A., Gornostaeva E.Yu. [et al.] Modeling the composition of fine-grained concrete with ash and slag mixture and superplasticizer. *Bulletin of VSGUTU*, 2022, no. 2 (85), pp. 71–77. DOI 10.53980/24131997_2022_2_71. EDN QXOFBE.
 5. Patent No. 2599742 C2 Russian Federation, IPC C04B 28/08, C04B 28/26, C04B 111/20. Geopolymer composite for ultra-high-quality concrete: No. 2013132983/03: declared 16.12.2011: published 10.10.2016 / V. Gong, V. Lutz, J. Pegg; applicant The Catholic University of America. EDN PMKJNW.
 6. Patent No. 2804940 C1 Russian Federation, IPC C04B 18/12, C04B 28/24. Geopolymer composite: declared 16.05.2023: published 09.10.2023 / T.A. Petrova, I.P. Sverchkov, Yu.D. Smirnov, A.A. Turkovsky; applicant Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Saint-Petersburg Mining University". EDN VWLWSH.
 7. Tang V.L., Ngo S.H., Wu K.Z. [et al.]. Geopolymer concrete using multi-tonnage man-made waste. *Construction: Science and Education*, 2021, vol. 11, no. 2, pp. 17–37. DOI 10.22227/2305-5502.2021.2.2. EDN IJHAPP.
 8. Yavinsky A.V., Lunev A.A., Dovydenko A.V. Assessment of the Potential of Alkaline Industrial Waste for Obtaining Geopolymer Binders. *Industrial and Civil Engineering*, 2025, no. 11, pp. 60–65. DOI 10.33622/0869-7019.2025.11.60-65. EDN SWWWLA.
 9. Kamilova R.S. Comparative Analysis of the Use of Geopolymer Concrete and Portland Cement in Construction: Advantages and Disadvantages. *Construction Economics*, 2025, no. 10, pp. 615–617. EDN BOBJLT.
 10. Petropavlovskaya V.B., Filippova O.P., Tskhovrebov E.S., Novichenkova T.B. Economic assessment of the environmentally safe use of technogenic waste in the production of geopolymers for construction needs. *Construction Economics*, 2024, no. 5, pp. 406–409. EDN MWBUXD.
 11. Provis J.L., Bernal S.A. Geopolymers and related alkali-activated. *Annual Review of Materials Research*, 2014, vol. 44, pp. 299–327. DOI 10.1146/annurev-matsci-070813-113515. EDN YEMHBB.
 12. Kapustin F.L., Ufimtsev V.M. Russian standards for the use of coal ash and slag from thermal power plants in the production of building materials. Ash and slag from thermal power plants: removal, transport, processing, storage. *Proceedings of the II International Scientific and Practical Seminar*, 2009, pp. 57–64.
 13. Davidovits J. Geopolymers: Inorganic polymeric new materials. *Journal of Materials Education*, 1994, vol. 16 (2, 3), pp. 91–138
 14. Ren L., Ding L., Guo Q., Gong Y., Yu G., Wang F. Characterization, carbon-ash separation and resource utilization of coal gasification fine slag: A comprehensive. *Journal of Cleaner Production*, 2023, vol. 398, article 136554. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.136554>.

References

1. Astafieva O.E. Use of fly ash and slag waste in the building materials industry. *Coal*, 2024, no. 2 (1177), pp. 85–88. DOI 10.18796/0041-5790-2024-2-85-88. EDN JNPGHR.
2. Perevoshchikova A.N., Valtisfer I.V., Kondrashova N.B., Voronina N.S. Study of the physical and mechanical properties of concrete with the addition of a multifunctional additive. *Nanotechnology in construction: scientific online journal*, 2024, vol. 16, no. 2, pp. 170–179. DOI 10.15828/2075-8545-2024-16-2-170-179. EDN BFTEZA.
3. Sharifov A., Muminov A., Akramov A.A. et al. Modification of cement with coal ash from the Fan-Yagnob deposit to increase the strength of concrete. *Polytechnic Bulletin. Series: Engineering Research*, 2022, no. 1 (57), pp. 157–163. EDN NSGMXT.

15. Sinkhonde D. Quantitative study on surface porosity and roughness parameters of mineral and organic admixtures based on multi-scale characterization techniques. *Cleaner Materials*, 2023, vol. 7, article 100166. <https://doi.org/10.1016/j.clema.2022.100166>.
16. Thonemann N., Zacharopoulos S., Fromme F., Nühlen J. Environmental impacts of carbon capture and utilization by mineral carbonation: A systematic literature review and meta life cycle assessment. *Journal of Cleaner Production*, 2022, vol. 332, article 130067. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.130067>.
17. Yi Z., Wang T., Guo R. Sustainable building material from CO₂ mineralization slag: Aggregate for concretes and effect of CO₂ curing. *Journal of CO₂ Utilization*. – 2020. – Vol. 40. – 101196. <https://doi.org/10.1016/j.jcou.2020.101196>.
18. Yuan H., Yu W., Wen J., Yang F., Nyarko-Appiah J.E., Bai C. A new strategy for CO₂ storage and Al₂O₃ recovery from blast furnace slag and coal fly ash by employing vacuum reduction and alkali dissolution methods. *Energy*, 2024, vol. 308, article 132865. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2024.132865>.
19. Zhang D., Zhu T., Ai Q., Mao M., Li J., Yang Q. Performance of coal gangue concrete with fly ash and ground-granulated blast slag: Rheology, mechanical properties and microstructure. *Construction and Building Materials*, 2024, vol. 427, article 136250. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.136250>.
20. Zhao T., Zhang S., Yang H., Ni W., Li J., Zhang G., Teng G., Li X., Guo S., Zhou Y., Wu Z. Leaching and hydrating mechanisms, economic benefits of backfill materials by using coal fly ash–slag-based binder for environmentally sustainable production. *Construction and Building Materials*, 2023, vol. 397, article 132360. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.132360>.
21. Zhou X., Chen Y., Dong S., Li H. Geopolymerization kinetics of steel slag activated gasification coal fly ash: A case study for amorphous-rich slags. *Journal of Cleaner Production*, 2022, vol. 379(1), article 134671. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.134671>.
22. Zhu Y., Wu J., Zhang Y., Miao Z., Niu Y., Guo F., Xi Y. Preparation of hierarchically porous carbon ash composite material from fine slag of coal gasification and ash slag of biomass combustion for CO₂ capture. *Separation and Purification Technology*, 2024, vol. 330, Part B, article 125452. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2023.125452>.
23. Zuo Y., Chen Y., Chen L., Gang Y., Göbel L., Ye G., Provis J. Modeling and simulation of alkali-activated materials (AAMs): A critical review. *Cement and Concrete Research*, 2024, vol. 189, article 107769. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2024.107769>.
24. Taskin A.V. Chemical-engineering solutions for the integrated processing of ash and slag waste from industry: diss. ... candidate of chemical sciences. Vladivostok, 2018. 173 p.
25. Liseytshev, Yu.L. Road Pavements from Nanomodified Fiber-Reinforced Concretes: Diss. ... Cand. Sci. / Yu.L. Liseytshev. Vladivostok, 2024. 180 p.
26. Panarin I.I. Composite Cements Activated by Enriched Ash and Slag Mixtures and Shotcrete Based on Them: Diss. ... Cand. Sci. / I.I. Panarin. Vladivostok, 2024. 162 p.

Информация об авторах / Information about the authors

Павел Геннадьевич Козлов*, преподаватель, Дальневосточный федеральный университет. Владивосток, Россия
e-mail: kozlov.pg@dvfu.ru
Pavel G. Kozlov*, lecturer, Far Eastern Federal University. Vladivostok, Russia
e-mail: kozlov.pg@dvfu.ru

Нарман Аюбович Аюбов, канд. экон. наук, доцент, научный сотрудник Комплексного научно-исследовательского института им. Х.И. Ибрагимова Российской академии наук. Грозный, Россия
Narman A. Ayubov, Candidate of Economic Sciences, Associate Professor, Research Fellow at the Kh.I. Ibragimov Integrated Research Institute of the Russian Academy of Sciences. Grozny, Russia

*Автор, ответственный за переписку / Corresponding author