

Биосферная совместимость: человек, регион, технологии. 2026. № 2. С. 91–99

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH PAPER

УДК 691.32

DOI: 10.22227/2311-1518.2026.2.91-99

ОРГАНОМИНЕРАЛЬНАЯ ДОБАВКА НА ОСНОВЕ ОТХОДОВ ПРОМЫШЛЕННОСТИ ДЛЯ БЕТОНА ПОКРЫТИЙ АВТОМОБИЛЬНЫХ ДОРОГ

Лариса Алексеевна Урханова, Эрик Эдуардович Цзю,
Илья Алексеевич Халикин

Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет;
г. Москва, Российская Федерация

В статье показаны перспективы применения отходов теплоэнергетики в производстве вяжущих веществ и бетонов для дорожного строительства. Представлены результаты исследований по разработке составов вяжущих композиций и бетона для покрытий автомобильных дорог с использованием органоминеральной добавки, включающей золу уноса и суперпластификатор. Зола вводилась в бетонную смесь в количестве до 20 %. Доказано, что комплексное применение золы и суперпластификатора не только не снижает, но и повышает прочность бетона в среднем на 5–10 % при содержании золы 12–16 %. Установлено, что прирост прочности цементного камня с золой и ПАВ происходит после 3 суток твердения. Установлен механизм действия органоминеральной добавки на процессы гидратации и твердения цементного камня и изменение микроструктуры. При использовании добавки наблюдается уплотнение структуры гидратного камня за счет образования дополнительного количества высокодисперсных химических соединений взаимодействия аморфного кремнезема золы и продуктов гидратации цемента.

Исследуемые органоминеральные добавки могут быть использованы для получения бетона для дорожного строительства с уменьшенным расходом цемента, характеристики которого соответствуют требованиям нормативных документов.

Ключевые слова: портландцемент, зола уноса, суперпластификатор, бетон для покрытий автомобильных дорог, прочность при сжатии, повышение прочности, морозостойкость бетона

Для цитирования: Урханова Л.А., Цзю Э.Э., Халикин И.А. Органоминеральная добавка на основе отходов промышленности для бетона покрытий автомобильных дорог // Биосферная совместимость: человек, регион, технологии. 2026. № 2. С. 91–99. DOI: 10.22227/2311-1518.2026.2.91-99

ORGANOMINERAL ADDITIVE BASED ON INDUSTRIAL WASTE FOR CONCRETE ROAD PAVEMENTS

Larisa A. Urkhanova, Eric E. Tszyu, Ilya A. Khalikin

Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU);
Moscow, Russian Federation

This article explores the potential for using waste from thermal power plants in the production of binders and concrete for road construction. It presents the results of research into the development of binder compositions and concrete for road pavements using an organomineral additive containing fly ash and a superplasticizer. The ash was added to the concrete mix in amounts up to 20 %. It has been demonstrated that the combined use of ash and superplasticizer not only maintains the strength of concrete but also increases it by an average of 5–10 % with an ash content of 12–16 %. It has been established that the strength of cement paste containing ash and surfactants increases after 3 days of curing.

The mechanism by which an organomineral additive affects the hydration and hardening processes of cement stone and changes its microstructure has been established. Using the additive, the hydrated stone structure is compacted due to the formation of additional highly dispersed chemical compounds from the interaction of amorphous silica ash and cement hydration products.

The organomineral additives studied can be used to produce concrete for road construction with reduced cement consumption, the characteristics of which meet regulatory requirements.

Keywords: portland cement, fly ash, superplasticizer, concrete for road surfaces, compressive strength, strength enhancement, frost resistance of concrete

For citation: Urkhanova L.A., Tszyu E.E., Khalikin I.A. Organomineral additive based on industrial waste for concrete road pavements. Biosphere Compatibility: Man, Region, Technology. 2026; 2:91-99. DOI: 10.22227/2311-1518.2026.2.91-99 (rus.).

Введение

Известно, что в России эксплуатируется 79 тепловых электростанций, использующих природный уголь, из которых более 60 находится на территории Сибири и Дальнего Востока. Количество отходов на объектах, генерирующих тепло и электроэнергию посредством сжигания твердого топлива, составляет около 40 % общего количества производственных отходов и оценивается примерно в 90 млн т в год. При этом объем накопленных в России золошлаковых отходов (далее ЗШО) приближается к 2 млрд т, размещенных на территориях более 22 000 га [1].

В настоящее время основным документом, определяющим государственную политику в сфере утилизации ЗШО, является «Комплексный план по повышению объемов утилизации золошлаковых отходов V класса опасности», утвержденный Распоряжением Правительства РФ № 1557-р от 15.06.2022 года и актуализированный Распоряжением № 1874-р от 13.07.2024 года. В Минэнерго России сообщают, что ежегодно около 25 млн тонн золошлаковых отходов можно вовлекать в хозяйственный оборот в России, в том числе в строительство и рекультивацию. Сейчас в России объем утилизации золошлаковых отходов в России составляет около 10 %.

Известно, что основными задачами, стоящими перед дорожной отраслью России, являются приведение в нормативное состояние до конца 2027 г. не менее 85 % автомобильных дорог (федеральные, региональные и местные дороги) и введение до конца 2030 г. более 30 тыс. км новых и реконструированных дорог. Решение задач требует применения современных материалов и техники преимущественно российского производства при строительстве, реконструкции, капитальном ремонте или ремонте автомобильных дорог, а также внедрения новых технологий, материалов и решений в сфере дорожного строительства с привлечением к их разработке отечественных научных организаций и профильных образовательных организаций высшего образования [2]. Внедрение новых материалов и технологий связано в том числе со строительством оснований и покрытий дорог с использованием цементобетона, применение которого в дорожном строительстве имеет ряд преимуществ, таких как высокая прочность и несущая способность, длительный срок эксплуатации, высокий коэффициент сцепления (безопасность дорожного движения), низкие затраты на содержание [3, 4].

Кроме того, увеличение межремонтных сроков до 12 лет (ремонт) и до 24 лет (капитальный ремонт) требует использования прочных и устойчивых к разрушению дорожно-строительных материалов,

способных выдерживать высокую интенсивность движения. При существующей нагрузке от транспорта нежесткие дорожные одежды служат в среднем 5–7 лет, после чего в асфальтобетонном покрытии возникают деформации, выбоины и трещины, что требует проведения ремонтных работ. Важно оптимизировать состав, соотношение компонентов асфальтобетонных смесей или использовать добавки для модифицирования битума и, соответственно, улучшения его свойств, обеспечивая максимально продолжительные межремонтные сроки [5, 6].

Применение цементобетона для устройства покрытий можно рассматривать как один из методов повышения эффективности дорожных конструкций. В США и Китае доля дорог, выполненных из цементобетона, насчитывает около 60 % от общей протяженности автомагистралей. В нашей стране эта цифра составляет, по последним данным, порядка 5 % [7, 8]. Если обратиться к абсолютным цифрам, то можно увидеть, что длина трасс с цементобетонным покрытием в США составляет 120 000 км, а в РФ — 1300 км [7].

Согласно нормативным документам (СП 34.13330.2021 «Автомобильные дороги», ГОСТ 26633–2012 «Бетоны тяжелые и мелкозернистые. Технические условия»), требования к составу и свойствам цементобетона для конструктивных слоев автомобильных дорог регламентируются в зависимости от технической категории дорог, функционального слоя дорожной одежды (основание или покрытие), дорожно-климатических условий. Основными требованиями к свойствам бетонной смеси и бетону являются объем вовлеченного воздуха, прочность при сжатии и прочность на растяжение при изгибе при определенных значениях В/Ц-отношения, морозостойкость в зависимости от дорожно-климатической зоны. Например, минимальный проектный класс бетона по прочности при сжатии В30 и по прочности на растяжение при изгибе B_{tb} 4,0 для монолитного покрытия для дорог I, II категории. Для оценки возможности производства в массовом количестве бетонов с указанными свойствами необходимо, в частности:

- определить область значений В/Ц, обеспечивающих требуемые показатели по прочности бетона на растяжение при изгибе;
- оценить возможность получения при установленных значениях В/Ц требуемой морозостойкости бетона;
- уточнить соотношение величин предела прочности на сжатие и изгиб, а также влияние вовлеченного воздуха на предел прочности бетона на сжатие и изгиб [9].

Авторы [9], проанализировав большой массив экспериментальных данных, пришли к выводу,

что при соблюдении общеизвестных требований к качеству материалов и технологии производства бетонных работ получение бетонов для дорожных и аэродромных покрытий соответствующего качества в массовом производстве вполне возможно.

Однако для увеличения долговечности и улучшения свойств цементобетона дорожных одежд можно использовать современные методы модификации структуры бетона за счет использования химических добавок. Согласно ГОСТ 26633–2012, в качестве таких добавок рекомендуется использование пластифицирующих, гидрофобных и воздухововлекающих добавок, применение которых обеспечивает повышение прочности, водостойкости и морозостойкости бетона. Применение суперпластифицирующих добавок является технологически наиболее простым способом модифицирования тяжелого бетона. При использовании современных суперпластификаторов на основе поликарбоксилатов достигается значительное снижение водоцементного отношения, что увеличивает не только прочность, но и повышает долговечность бетона [10, 11]. Поэтому целью работы стало повышение прочности бетона для покрытий автомобильных дорог путем совместного использования эффективных суперпластифицирующих и активных минеральных добавок с использованием отходов теплоэнергетики.

Материалы и методы исследования

Для получения цементного бетона для строительства автомобильных дорог использовали следующие исходные компоненты:

- портландцемент ЦЕМ I 42,5Н, соответствующий ГОСТ 31108–2020 и ГОСТ 33174–2014, минералогический состав клинкера которого, мас. %: C_3S — 59,9, C_2S — 17,3, C_3A — 7,0 и C_4AF — 13,0. Нормальная плотность цемента — 28,2 %, начало схватывания составляло 150 мин, конец схватывания — 215 мин; удельная поверхность — 323 м²/кг, остаток на сите № 008 — 5,0 %;
- песок как мелкий заполнитель I класса Богаевского карьера (Московская область), средней крупности ($M_k = 2,4$) с влажностью 5,7 %. Полный остаток на сите № 063 составлял 43,71 %. Содержание зерен крупностью свыше 5 мм — 2,43 %, содержание зерен крупностью менее 0,16 мм — 2,81 %. Содержание пылевидных и глинистых частиц составляло 1,06 %, глина в комках отсутствовала;
- щебень гранитный марки М1200 фракции 5–20 мм ООО «Усть-Катавский гранитный карьер» (Челябинская область), показатели которого соответствовали ГОСТ 8267–93 и

ГОСТ 32703–2014. По результатам лабораторных испытаний щебень характеризовался лещадностью 8,9 %, что соответствует группе 1. Содержание пылевидных и глинистых частиц составляло 0,79 %, что не превышает предельного значения, установленного нормативными требованиями;

- кислая зола-уноса (далее зола) Уфимской ТЭЦ-4, соответствующая требованиям ГОСТ 25818–2025 для вида в зависимости от назначения IV (бетонные изделия и конструкции для строительства автомобильных дорог и аэродромов). Потери массы при прокаливании золы — до 5 %, удельная поверхность — 350 м²/кг;
- в качестве пластифицирующей добавки в составе цементобетонных смесей применялся суперпластификатор поликарбоксилатного типа «ТЭНД Пласт 25» с плотностью не менее 1,02–1,13 г/см³. Добавка не содержит хлоридов и предназначена для регулирования подвижности бетонной смеси и водоредуцирования, а также для применения в бетонах, твердеющих в нормальных условиях без риска снижения защитных свойств по отношению к стальной арматуре. Содержание суперпластификатора составляло 0,8 % от массы вяжущего.

На первом этапе исследовалось влияние золы уноса при ее содержании 10, 20, 30 % на изменение прочности цементного камня, твердевшего в нормальных условиях. Прочность при сжатии образцов-кубиков с ребром 20 мм цементно-зольного камня определялась после 7,28 суток твердения.

Затем при варьировании содержания золы в составе вяжущего осуществлялся подбор состава бетона для устройства конструктивных слоев дорожной одежды. Из бетонной смеси с маркой по удобоукладываемости П2 формовали образцы-кубы 100 × 100 × 100 мм. Уплотнение смеси осуществлялось на виброплощадке при частоте 50 Гц. Продолжительность виброобработки определялась визуально по моменту полного прекращения выделения воздушных пузырьков на поверхности. По окончании формования образцы в формах выдерживались в течение 24 часов при температуре 20 ± 2 °С и относительной влажности воздуха не менее 95 %. После распалубки изделия перемещались в камеру нормального твердения (температура $t = 20 \pm 2$ °С, влажность $W = 95$ –100 %), где хранились до достижения испытательного возраста. Проводились испытания на прочность при сжатии в возрасте 1, 3, 7 и 28 суток твердения. Прочность бетонных образцов оценивалась согласно ГОСТ 10180–2012.

Испытание на морозостойкость бетонных образцов проводилось согласно ГОСТ 10600–2012 по второму ускоренному методу.

Результаты исследования и их обсуждение

Исследование влияния золы на прочность цементного камня показывает постепенное снижение прочности гидратного камня с увеличением количества золы (рис. 1). Прочность цементно-золяного вяжущего при содержании золы 10, 20 и 30 % снизилась соответственно на 13, 22 и 30 % в возрасте 28 суток. Исследование кинетики твердения цементно-золяных композиций показало, что введение кислой золы снижает скорость набора прочности по сравнению с контрольными образцами — зола начинает проявлять свою пуццоланическую активность после не менее 7 суток твердения. Это подтверждает известные данные, что кислая зола отличается медленным протеканием пуццолановой реакции в течение первого месяца твердения, основная часть пуццолановой реакции приходится на возраст 30–90 дней [12]. Повышение концентрации золы в вяжущем оказывает неоднозначное влияние на прочность вяжущих и бетонов. Ключевыми факторами, определяющими характер этого влияния, являются водовязущее отношение, реологические свойства смеси, условия и продолжительность твердения, а также дисперсность частиц золы [13, 14]. Ускорить процесс твердения можно за счет введения химических добавок (ускорителей схватывания и твердения, пластифицирующих добавок) или за счет применения механохимической активации исходной золы, увеличивающей ее пуццоланическую активность за счет изменения структуры и размера зерна.

Снижение прочности связано не только с уменьшением доли цемента в составе композиционного вяжущего, но и увеличением водовязущего отноше-

ния (рис. 2). Введение суперпластификатора, обладающего хорошим водоредуцирующим эффектом, в количестве 0,8 % от массы вяжущего, снижает расход воды при одинаковой пластичности цементного теста в среднем на 10–15 %, компенсируя потерю прочности, связанную с введением активной минеральной добавки. Кроме того, механизм действия добавок поликарбоксилатного вида отличается от механизма действия добавок на основе нафталинсульфокислоты. Это вызвано комплексообразованием поликарбоксилатного суперпластификатора: ионы COO^- суперпластификатора взаимодействуют с катионами кальция Ca^{2+} , образуемыми при гидратации портландцемента, что способствует увеличению количества гидросиликатов кальция и снижению содержания портландита [15–17]. Таким образом, сочетание суперпластификатора на основе поликарбоксилатов и золы уноса дает эффект применения как органоминеральной добавки для получения золоцементных вяжущих и бетонов на их основе.

Важным фактором, кроме фазового состава новообразований, определяющим прочность цементно-золяных композиций, является их микро- и субмикроструктура (рис. 3).

В цементно-золяных вяжущих частицы золы окружены кристаллогидратами коллоидного типа и игольчатыми кристаллами низкоосновных гидросиликатов кальция. Введение суперпластификатора и золы улучшает микроструктуру гидратных композиций: уменьшается количество пор и образуется плотная структура, обеспечивающая улучшение их физико-механических показателей. Основываясь на трудах в области минеральных вяжущих веществ [18–20], механизм взаимодействия золы с продуктами гидратации цемента и твердения золоцемент-

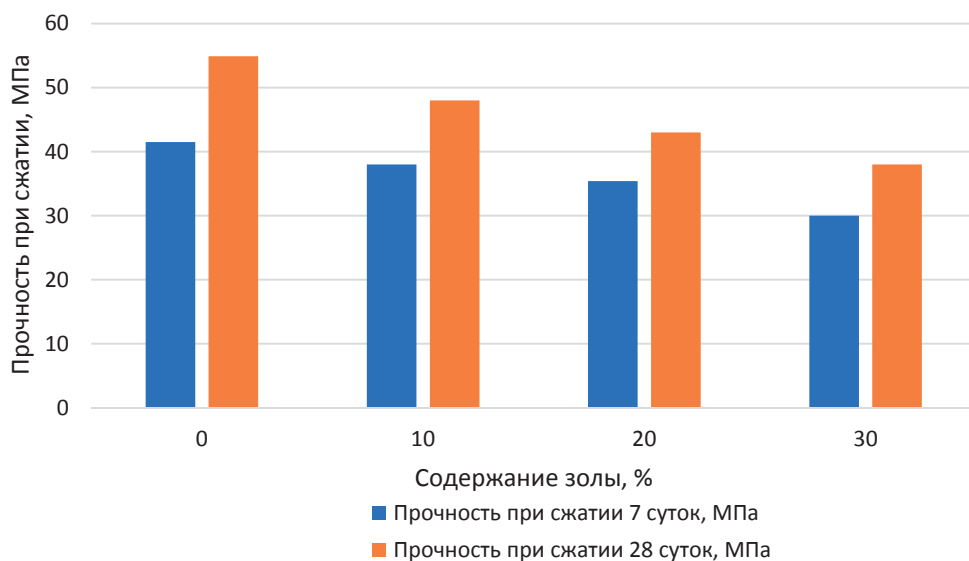


Рис. 1. Влияние количества золы и времени твердения на свойства цементно-золяного камня

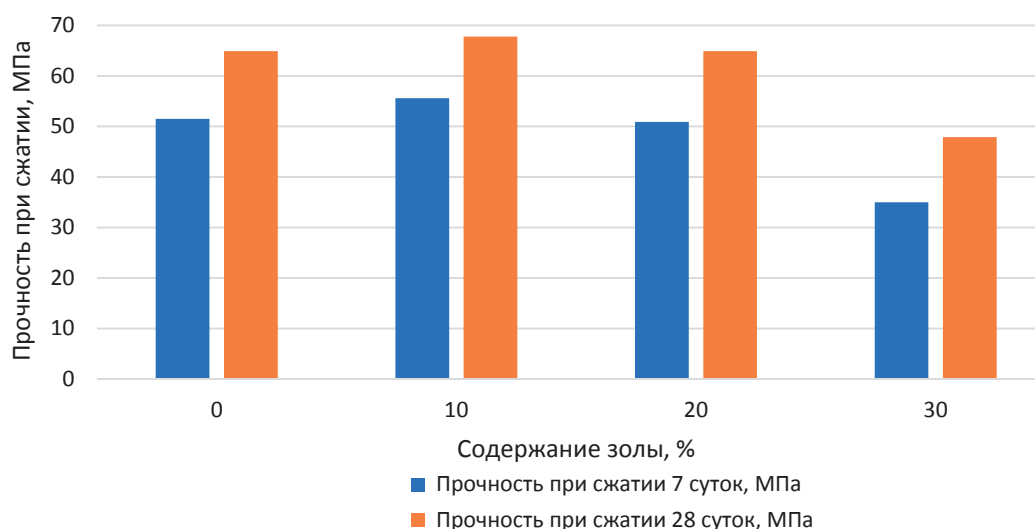


Рис. 2. Влияние количества органоминеральной добавки на изменение прочности цементно-зольных вяжущих

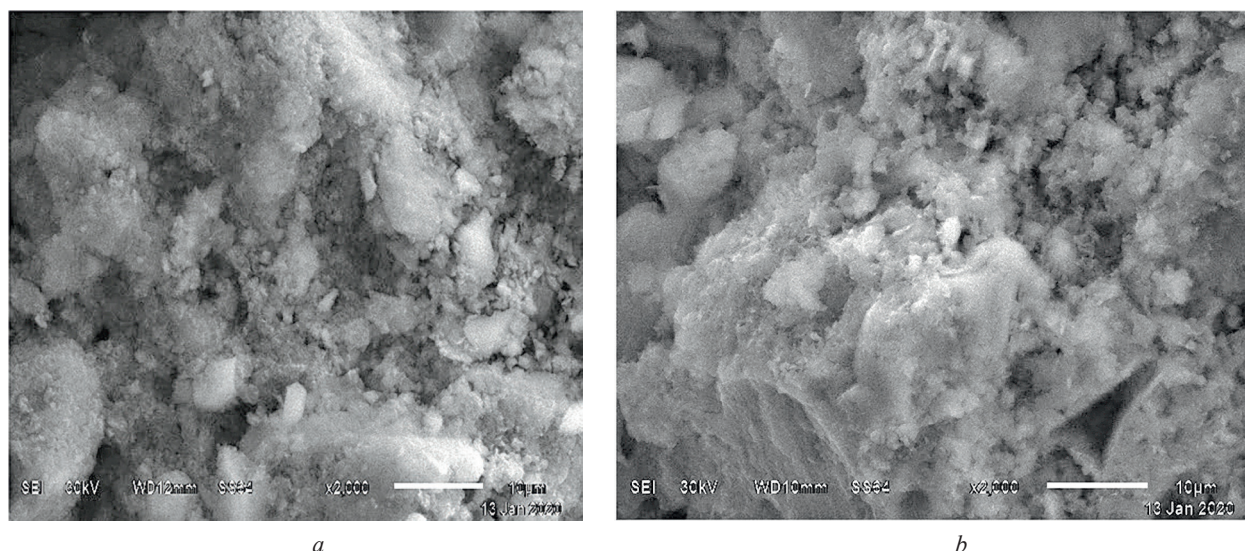


Рис. 3. Микроструктура гидратного камня в возрасте 28 суток твердения (JEOL-JSM-6510LV, ЦКП «Прогресс» ВСГУТУ): *a* — цементно-зольное вяжущее, 10 % золы; *b* — цементно-зольное вяжущее с суперпластификатором

ных вяжущих можно кратко представить следующим образом. В ходе гидратации силикатных минералов клинкера приповерхностный слой раствора насыщается ионами кальция и коллоидными частицами $\text{Ca}(\text{OH})_2$. Диффундируя в область пониженной концентрации, эти компоненты под действием электростатических и межмолекулярных сил фиксируются на поверхности зольных частиц. Последние играют роль подложки, на которой при взаимодействии $\text{Ca}(\text{OH})_2$ с кремнеземом SiO_2 золы инициируется образование зародышей гидратных фаз. Развиваясь, эти зародыши формируют сплошную оболочку вокруг зерен золы, состоящую преимущественно из гидросиликатов кальция. Кроме того, при добавлении золы в цементное тесто шарики золы уноса заполняют пустоты гидратного камня [21].

Следующим этапом исследований был подбор состава бетона для покрытий автомобильных дорог с использованием золы. Согласно ОДМ 218.3.081–2016, для улучшения технологических свойств цементобетонной смеси, эксплуатационных показателей качества дорожных цементобетонов, а также для экономии цемента можно применять тонкомолотые высокодисперсные наполнители [22]. В случае использования в качестве наполнителей золы оптимальное ее содержание золы в бетоне устанавливают в результате подбора составов на конкретных материалах при условии обеспечения требуемых технологических свойств смесей и показателей качества цементобетона. Составы бетонных смесей приведены в табл. 1. Составы отличались содержанием золы уноса и, соответственно, цементом при достижении одинаковой подвижности бетонной смеси — П2. Для оценки эффективности суперпла-

Таблица 1. Составы бетонных смесей для получения цементобетона с золой

Номер п/п состава бетона	Расход компонентов, кг на 1 м ³ бетонной смеси					
	ПЦ	П	Щ	З	СП	В
1	348	731	1215	—	—	167
2	348	731	1215	—	2,78	146
3	306	731	1215	42	2,78	134
4	292	731	1215	56	2,78	133
5	279	731	1215	69	2,78	124

стификатора в бетоне с заменой части цемента золой была изучена подвижность, расслаиваемость и воздухововлечение бетонной смеси, а также прочность, морозостойкость и водонепроницаемость бетона. Объем вовлеченного воздуха в бетонной смеси, определенной экспериментально объемным способом, лежал в пределах 4,8–5,2 %, что соответствует требованиям ГОСТ 26633. Комплексное применение золы и суперпластификатора повышает содержание вовлеченного воздуха в бетонной смеси: 4,4 % без золы, 4,8 % с 12 % золы и 5,2 % с 20 % золы, создавая предпосылки для увеличения морозостойкости бетона. Известно, что ряд гидрофилизирующих добавок увеличивает эффект воздухововлечения, но в меньшей степени, чем воздухововлекающие добавки, поэтому указанный признак не может считаться ведущим для этого вида добавок [23].

Результаты исследования показали, что увеличение количества золы не только не приводит к увеличению расхода воды, но и уменьшает его при сохранении одинаковой подвижности бетона. Зола, особенно сферические частицы золы, проявляют «эффект шарикоподшипника», увеличивая удобоукладываемость бетонной смеси. Комплексное применение золы и суперпластификатора позволило сохранить подвижность бетонной смеси в течение 2 часов, что подтверждает предположение совместного пластифицирующего действия активной минеральной добавки и суперпластификатора на основе поликарбоксилатных эфиров [22]. При введении золы снизилось растрескивание и водоотделение бетонной смеси.

Увеличение количества золы в составе бетонной смеси до 20 % не приводит к значительному снижению прочности бетона к 28 суткам тверде-

ния (табл. 2). При замене цемента 12 % золы прочность при сжатии бетона увеличивается на 3 % по сравнению с контрольным составом, при замене 16 % — на 6 %. При замене цемента 20 % золой прочность при сжатии бетона снижается на 3–4 % по сравнению с прочностью бетона без активной минеральной добавки. Кинетика прироста прочности бетона в ранние сроки твердения — 1–3 суток незначительно снижается, в более поздние сроки твердения — 7 суток прочность бетона с содержанием золы 16–20 % с суперпластификатором не только практически не уступает прочности бетона контрольного состава, но и превышает ее.

Частицы золы, обладая высокой поверхностной энергией, действуют как микронаполнитель. Они заполняют пустоты между зернами цемента и улучшают контактную зону «вяжущее – заполнитель», образуя более плотные кластеры, несколько увеличивая плотность бетона и снижая пористость цементного камня при увеличении объемной концентрации наполнителя [24]. На начальном этапе гидратации (в начальные сроки твердения) химическая активность золы невелика. Исследования показывают, что в этот период минеральные добавки, такие как зола, участвуют в твердении в основном за счет физического заполнения пор, создавая более плотную упаковку частиц. В более поздние сроки твердения зола проявляет химическую активность (пуццолановая реакция), в результате которой образуются дополнительные гидросиликаты кальция (C-S-H) и гидроалюмосиликаты кальция (C-S-A-H).

Контрольный состав бетона (состав 2) в проектные сроки твердения имеет класс по прочности на сжатие В35, при замене 12–20 % цемента золой

Таблица 2. Кинетика набора прочности бетона с использованием золы

Номер состава	В/Ц-отношение	В/В-отношение	Прочность при сжатии, МПа, после твердения, сут.			
			1	3	7	28
1	0,48	0,48	6,1	15,4	23,7	35,9
2	0,42	0,42	9,6	21,0	29,4	46,8
3	0,44	0,39	9,3	20,5	30,4	48,4
4	0,46	0,38	9,5	20,8	31,4	49,7
5	0,44	0,36	9,0	20,0	28,7	45,2

Таблица 3. Показатели морозостойкости бетона с органоминеральной добавкой

Состав	Количество циклов замораживания и оттаивания по ускоренному методу	Марка по морозостойкости	Потеря массы, %	Потеря прочности, %
Контрольный	150	F ₂ 150	4,8	5,2
Бетон с 10 % золы	200	F ₂ 200	3,2	4,1
Бетон с 20 % золы	150	F ₂ 150	4,3	5,1

(составы 3–5) — тот же класс бетона В35. Учитывая физико-механические свойства цементобетона, можно определить область его применения в дорожном строительстве. При замене цемента 10–20 % золой полученный бетон можно использовать для верхних слоев покрытий для дорог I, II технических категорий. Для дорог III технической категории можно использовать бетон в качестве верхнего слоя покрытия с оптимальным содержанием золы в составе органоминеральной добавки — 25–30 %. Возможность увеличения содержания золы в бетоне и сборных и монолитных железобетонных конструкциях можно будет установить после проведения специальных исследований по коррозионной стойкости арматуры. Для оснований дорожной одежды, где используются жесткие бетонные смеси с малым содержанием цемента — не менее 150 кг/м³, но при этом требуется прочность при сжатии не менее 7,5 МПа, рекомендуется ограничиться 40–50 % содержанием золы.

Морозостойкость является критическим параметром для дорожных покрытий в условиях сезонного промерзания. Цементобетон с органоминеральной добавкой демонстрирует требуемую морозостойкость для покрытий автомобильных дорог F₂200 при содержании золы в количестве 20 % благодаря суперпластификатору на поликарбоксилатной основе, введение которого регулирует расход воды и объемные деформации при фазовых ее переходах (табл. 3). Кроме того, плотность бетона с добавкой превышает плотность бетона контрольного состава.

Выводы

Таким образом, результаты исследований показали возможность использования золы как техногенного отхода энергетического комплекса для замены портландцемента в составе цементобетона для покрытий автомобильных дорог в количестве 10–30 %. Замена почти пятой части цемента золой -уноса позволяет сократить углеродный след бетона до 25 %, решить проблему утилизации промышленных отходов, которые являются источником экологической опасности и загрязняют грунтовые воды, экономить невозобновляемые природные ресурсы, используемые для производства цемента, делая дорожное строительство более устойчивым.

Кроме того, применение золы уноса как тонкодисперсного наполнителя в составе бетона для дорожного строительства способствует улучшению характеристик бетонной смеси и бетона для покрытий автомобильных дорог и делает его производство рентабельным. Подобраны составы бетонных смесей с золой и суперпластификатором, обеспечивающие сохранность подвижности бетонной смеси не менее 2 часов. Разработаны оптимальные лабораторные составы бетона со сниженным расходом цемента с использованием портландцемента, золы и суперпластификатора на поликарбоксилатной основе. Установлено, что максимальная прочность и морозостойкость бетона достигается при содержании золы-уноса в пределах 12–16 %, что открывает перспективы ее применения в дорожном строительстве. Это позволит снизить себестоимость бетона на 15–20 %, не снижая требуемые показатели композита.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Пичугин Е.А. Аналитический обзор накопленного в Российской Федерации опыта вовлечения в хозяйственный оборот золошлаковых отходов теплоэлектростанций // Проблемы региональной экологии. 2019. № 4. С. 77–87. DOI: 10.24411/1728-323X-2019-14077
2. Перечень поручений Президента Российской Федерации по итогам состоявшегося 2 июня 2022 года совещания по вопросам дорожного строительства. Приказ № 1231 от 12.07.2022 г. М. 4 с.
3. Якобсон М.Я., Кузнецова А.А., Введенская А.С., Бычков А.В. Актуальность и перспективы применения цементобетона в дорожном строительстве // Системные технологии. 2016. № 18. С. 132–140.
4. Ушаков В.В. Перспективы и эффективность применения цементобетона в дорожном строительстве // Наука и техника в дорожной отрасли. 2002. № 4. С. 5–7.
5. Иванов С.А. Оценка адгезионной способности битума, модифицированного резиновой крошкой // Вестник ВСГУТУ. 2018. № 7 (71). С. 49–54.
6. Егоров Д.Ю., Небратенко Д.Ю. Применение метода ABCD при анализе низкотемпературных свойств состаренных ординарных и модифицированных битумов // Вестник ВСГУТУ. 2023. № 3 (90). С. 73–82.
7. URL: <https://nflg.ru/stati/post/nazad-v-budushchee>

8. Анализ перспектив развития технологии строительства цементобетонных покрытий в России : Исследование РБК. URL: <https://roadconcrete.ru/press-center/archive/2019issledovanie/>
9. Несветаев Г.В., Кардунян Г.С. О применении цементных бетонов для дорожных и аэродромных покрытий // Строительные материалы. 2014. № 3. С. 31–34.
10. Степанов С.В., Боровских И.В., Галеев А.Ф. Повышение качества дорожного бетона // Инновационная наука. 2016. № 7–8. С. 31–33.
11. Красиникова Н.М., Морозов Н.М., Боровских И.В., Хозин В.Г. Опыт внедрения мелкозернистых бетонов при производстве дорожных плит // Инженерно-строительный журнал. 2014. № 7 (51). С. 46–54.
12. Парфенова Л.М., Высоцкая М.Н., Фернандес Пауло А.Л. Комплексное вяжущее на основе портланд-цемента и золошлаковых отходов тепловой электростанции // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия F. 2018. № 8. С. 60–66.
13. Кучеров Д.Е. Композиционные вяжущие с минеральными добавками различного генезиса и бетоны на их основе : дис. ... канд. техн. наук. Белгород, 2011.
14. Курочка П.Н., Гаврилов А.В. Бетоны на комплексном вяжущем и мелком песке // Инженерный Вестник Дона. Ростов н/Д, 2013. 13 с.
15. Шулдяков К.В., Трофимов Б.Я., Крамар Л.Я. Высокоморозостойкий бетон без воздухововлечения // Строительные материалы. 2020. № 6. С. 18–26.
16. Zhang Y., Kong X. Correlations of the dispersing capability of NSF and PCE types superplasticizer and their impacts on cement hydration with the adsorption in fresh cement pastes // Cement and concrete research. 2015. Vol. 69. Pp. 1–9.
17. Ильина Л.В., Хакимуллина С.А., Кадоркин Д.А. Влияние дисперсных минеральных добавок на прочность мелкозернистого бетона // Фундаментальные исследования. 2017. № 4. С. 34–38.
18. Бутт Ю.М., Тимашев В.В. Практикум по химической технологии вяжущих материалов. М. : Высшая школа, 1973. 504 с.
19. Данилович И.Ю., Сканава Н.А. Использование топливных шлаков и зол для производства строительных материалов. М. : Высшая школа, 1988. 281 с.
20. Белогурова Т.П., Миханюшина И.А., Беляевский А.Т. Исследование процессов гидратации золоцементных вяжущих // Труды Кольского научного цемента РАН. 2015. № 5 (31). С. 513–518.
21. Тарасова Т.Ю. Бетонные смеси высокой подвижности с золой-уноса для транспортного строительства : дис. ... канд. техн. наук. М., 2009. 25 с.
22. ОДМ 218.3.081–2016. Методические рекомендации по подбору составов цементобетонов для дорожного строительства в различных климатических зонах и с учетом эксплуатационных условий работы дорожных покрытий. М. : Росавтодор, 2019. 62 с.
23. Ткач Е.В., Филимонова Ю.С., Корнеев А.И. Тяжелый бетон на основе полидисперсного вяжущего с комплексным полимерным модификатором с повышенными эксплуатационными показателями // Строительство и реконструкция. 2022. № 2. С. 112–119. DOI: 10.33979/2073-7416-2022-100-2-112-119
24. Ляхевич Г.Д., Лиштван И.И., Ляхевич А.Г., Дударчик В.М., Крайко В.М., Звонник С.А. Технология и эффективность использования золы бурых углей лельчицкого месторождения в цементе и бетонных смесях // Наука и техника. 2017. Т. 16. № 2. DOI: 10.21122/2227-1031-2017-16-2-104-112

Об авторах: **Лариса Алексеевна Урханова** — доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Градостроительство»; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; ORCID: 0000-0002-2716-2144; e-mail: urkhanova@mail.ru;

Эрик Эдуардович Цзю — магистр программы «Развитие и эксплуатация дорожной сети» направления 08.04.01 Строительство; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; e-mail: eriktzui@mail.ru;

Илья Алексеевич Халикин — студент программы «Дорожное строительство» направления 08.03.01 Строительство; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; e-mail: gamepad777@mail.ru.

REFERENCES

1. Pichugin E.A. Analytical review of the accumulated experience of the Russian Federation in involving ash and slag waste from thermal power plants in economic circulation. *Problems of regional ecology*. 2019; 4:77-87. DOI: 10.24411/1728-323X-2019-14077 (rus.).
2. List of instructions of the President of the Russian Federation following the results of the meeting on road construction held on June 2, 2022. Pr. No. 1231 dated July 12, 2022. Moscow. 4. (rus.).

3. Yakobson M.Ya., Kuznetsova A.A., Vvedenskaya A.S., Bychkov A.V. Relevance and prospects of using cement concrete in road construction. *System technologies*. 2016; 18:132-140. (rus.).
4. Ushakov V.V. Prospects and Efficiency of Using Cement Concrete in Road Construction. *Science and Technology in the Road Industry*. 2002; 4:5-7. (rus.).
5. Ivanov S.A. Evaluation of the Adhesion Capacity of Bitumen Modified with Rubber Crumb. *Vestnik VSGUTU*. 2018; 7(71):49-54. (rus.).
6. Egorov D.Yu., Nebratenko D.Yu. Application of the ABCD Method in the Analysis of Low-Temperature Properties of Aged Ordinary and Modified Bitumens. *Vestnik VSGUTU*. 2023; 3(90):73-82. (rus.).
7. URL: <https://nflg.ru/stati/post/nazad-v-budushchee> (rus.).
8. Analysis of the development prospects for cement concrete pavement construction technology in Russia : RBC study. URL: <https://roadconcrete.ru/press-center/archive/2019issledovanie/> (rus.).
9. Nesvetaev G.V., Kardumyan G.S. On the use of cement concrete for road and airfield pavements. *Construction Materials*. 2014; 3:31-34. (rus.).
10. Stepanov S.V., Borovskikh I.V., Galeev A.F. Improving the quality of road concrete. *Innovative Science*. 2016; 7-8:31-33. (rus.).
11. Krasnikova N.M., Morozov N.M., Borovskikh I.V., Khozin V.G. Experience in the introduction of fine-grained concrete in the production of road slabs. *Engineering and Construction Journal*. 2014; 7(51):46-54. (rus.).
12. Parfenova L.M., Vysotskaya M.N., Fernandes Paulo A.L. Complex binder based on Portland cement and ash and slag waste from a thermal power plant. *Bulletin of Polotsk State University. Series F*. 2018; 8:60-66. (rus.).
13. Kucherov D.E. *Composite binders with mineral additives of various genesis and concretes based on them : dissertation candidate of Engineering Sciences*. Belgorod, 2011. (rus.).
14. Kurochka P.N., Gavrilov A.V. Concretes on a complex binder and fine sand. *Engineering Bulletin of the Don*. Rostov-on-Don, 2013; 13. (rus.).
15. Shuldyakov K.V., Trofimov B.Ya., Kramar L.Ya. Highly frost-resistant concrete without air entrainment. *Construction materials*. 2020; 6:18-26.
16. Zhang Y., Kong X. Correlations of the dispersing capability of NSF and PCE types superplasticizer and their impacts on cement hydration with the adsorption in fresh cement pastes. *Cement and concrete research*. 2015; 69:1-9.
17. Ilyina L.V., Khakimullina S.A., Kadorkin D.A. Effect of dispersed mineral additives on the strength of fine-grained concrete. *Fundamental Research*. 2017; 4:34-38. (rus.).
18. Butt Yu.M., Timashev V.V. *A Practical Guide to Chemical Technology of Binding Materials*. Moscow, Vysshaya Shkola, 1973; 504. (rus.).
19. Danilovich I.Yu., Skanavi N.A. *Use of Fuel Slags and Ashes for the Production of Building Materials*. Moscow, Vysshaya Shkola, 1988; 281. (rus.).
20. Belogurova T.P., Mikhannoshina I.A., Belyaevsky A.T. Study of hydration processes of ash-cement binders. *Transactions of the Kola Scientific Cement Institute of the Russian Academy of Sciences*. 2015; 5(31):513-518. (rus.).
21. Tarasova T.Yu. *High-mobility concrete mixtures with fly ash for transport construction : dissertation candidate of Engineering Sciences*. Moscow, 2009; 25. (rus.).
22. ODM 218.3.081–2016. Methodological recommendations for the selection of cement concrete compositions for road construction in various climatic zones and taking into account the operating conditions of road surfaces. Moscow, Rosavtodor, 2019; 62. (rus.).
23. Tkach E.V., Filimonova Yu.S., Korneev A.I. Heavy concrete based on a polydisperse binder with a complex polymer modifier with improved performance indicators. *Construction and reconstruction*. 2022; 2:112-119. DOI: 10.33979/2073-7416-2022-100-2-112-119 (rus.).
24. Lyakhevich G.D., Lishtvan I.I., Lyakhevich A.G., Dudarchik V.M., Kraiko V.M., Zvonnik S.A. Technology and efficiency of using brown coal ash from the Lelchitsy deposit in cement and concrete mixtures. *Science and Technology*. 2017; 16(2). DOI: 10.21122/2227-1031-2017-16-2-104-112 (rus.).

About the authors: **Larisa A. Urkhanova** — Dr. Sci. (Eng.), Professor, Department “Urban planning”; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; ORCID: 0000-0002-2716-2144; e-mail: urkhanova@mail.ru;

Eric E. Tsyu — Master’s degree program “Development and Operation of the Road Network” in the direction 08.04.01 Construction; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; e-mail: eriktzui@mail.ru;

Ilya A. Khalikin — student of the Road Construction program, direction 08.03.01 Construction; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; e-mail: gamepad777@mail.ru.