

## Применение минеральных добавок в бетонах и их влияние на коррозионную стойкость

*Д.В. Петруновский, Е.И. Шевцов*

*Российский университет транспорт, Москва*

**Аннотация:** В статье рассматривается актуальная проблема повышения долговечности бетонных и железобетонных конструкций путем применения различных минеральных добавок. Анализируются механизмы коррозии бетона, сульфатную, хлоридную, карбонизацию, морозное разрушение и коррозию, вызванную ионами магния. Освещаются изменения в нормативной базе, касающиеся органоминеральных смесей. В ходе исследования был сделан вывод о том, что применение минеральных добавок является эффективным методом повышения коррозионной стойкости и долговечности бетонов. Правильный выбор типа и дозировки добавки, основанный на понимании механизмов их действия и условий эксплуатации, позволяет значительно продлить срок службы строительных конструкций и обеспечить их надежность. Комплексные органоминеральные модификаторы и нанотехнологии открывают широкие возможности для создания высококачественных бетонов с заданными свойствами.

**Ключевые слова:** бетон, минеральные добавки, коррозионная стойкость, долговечность, зола-уноса, микрокремнезем, мел, цеолит, перлит, органоминеральные модификаторы, сульфатная коррозия, органоминеральные смеси.

### Введение

Коррозия строительных материалов, в частности бетонов и асфальтогранулобетонов, или, согласно современной терминологии, органоминеральных смесей (ОМС), является одной из наиболее значимых проблем, снижающих долговечность зданий и сооружений. Этот процесс представляет разрушение материала под воздействием окружающей среды, обусловленное физическими и химическими причинами, такими как воздействие влаги и знакопеременных температур [1]. С момента выпуска первых методических рекомендаций по ОМС в 2002 году и до выхода последних стандартов серии ГОСТ Р 70197 в 2022 году, произошли существенные изменения в подходах к классификации, проектированию составов и методам испытаний этих композитов. Одним из ключевых изменений стало сокращение типов, вяжущих для ОМС с шести до двух (М – с добавлением минерального вяжущего и К – с добавлением комплексного

вяжущего), что отражает тенденцию к использованию более сложных и эффективных решений.

В современном строительстве применение комплексных модифицирующих составов, включающих минеральные добавки и техногенные отходы, признано технологичным, экономически целесообразным и универсальным способом улучшения свойств бетонов [2, 3]. Основной целью таких модификаций является получение бетонов с высокой прочностью и повышенной долговечностью [4, 5]. Для гидротехнических сооружений одним из важнейших показателей долговечности является стойкость бетона к сульфатной коррозии [6]. Условия эксплуатации таких конструкций часто осложняются воздействием знакопеременных температур, особенно в зонах переменного уровня воды, и гидроабразивным истиранием под действием взвешенных в воде твердых частиц [7]. Указанные факторы предъявляют особые требования к выбору сырьевых компонентов и проектированию составов бетона. Стойкость бетона к сульфатной коррозии непосредственно связана с его плотностью, характером пористости и составом гидратных фаз цементного камня [8, 9].

### **Методы и методология исследования**

В статье проведен аналитический обзор, посвященный изучению влияния минеральных добавок на свойства и коррозионную стойкость бетонов. Методология исследования базируется на комплексном анализе и систематизации данных, полученных из актуальных научных публикаций, нормативно-технической документации и монографий.

Информационной базой для исследования послужили научные статьи из рецензируемых журналов в области строительного материаловедения, труды международных и всероссийских конференций, действующие ГОСТ, а также монографии и авторефераты диссертаций, освещающие вопросы применения минеральных добавок и проблемы коррозии бетона. Поиск

---

релевантных источников осуществлялся с использованием библиографических баз данных и научных поисковых систем по ключевым запросам, таким как «минеральные добавки в бетоне», «коррозионная стойкость бетона», «сульфатостойкость цементных систем», «органоминеральные модификаторы (ОММ)», «зола-уноса», «микрокремнезем», «цеолит в бетоне», «долговечность железобетонных конструкций». Критериями отбора служили научная значимость, достоверность представленных данных, наличие экспериментального обоснования выводов и актуальность информации.

Анализ отобранных материалов включал систематизацию данных по видам минеральных добавок (например, зола-уноса, микрокремнезем, высокодисперсный мел, цеолит, перлит), их влиянию на физико-механические свойства цементных систем (прочность, водонепроницаемость, морозостойкость) и, в особенности, на их коррозионную стойкость в различных агрессивных средах [10, 11]. Особое внимание уделялось механизмам действия добавок, таким как пуццоланическая активность, уплотнение структуры цементного камня, изменение его фазового состава и снижение проницаемости [8]. В работе обобщены принципы подбора составов бетонов с ОММ типа МБ, а также результаты исследований по оценке эффективности различных добавок, представленные в литературе [12-14].

### **Результаты исследования**

Коррозия бетона – сложный физико-химический процесс, приводящий к деградации его структуры и потере эксплуатационных свойств [1]. Основными видами коррозии являются [9, 15]:

1. Сульфатная коррозия.
2. Хлоридная коррозия.
3. Карбонизация.

4. Морозное разрушение.

5. Коррозия, вызванная ионами магния.

Применение минеральных добавок является необходимым условием для повышения коррозионной стойкости бетона благодаря следующим механизмам:

- Пуццоланическая реакция. Применение активных кремнеземистых и алюмокремнеземистых добавок (зола-уноса, микрокремнезем, метакеолин, природные пуццоланы) благодаря реакции с  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  приводит к уменьшению его содержания, уплотнению структуры цементного камня и снижению его проницаемости [8].

- Уменьшение проницаемости. Достигается за счет заполнения пор продуктами гидратации и частицами самих добавок.

- Изменение фазового состава. Некоторые добавки способствуют образованию более устойчивых к агрессивным средам гидратных фаз или связывают компоненты цемента, участвующие в коррозионных реакциях (например,  $\text{C}_3\text{A}$ ).

- Улучшение реологических свойств бетонной смеси. Многие добавки, особенно в комплексе с суперпластификаторами, дают снизить водоцементное отношение при сохранении подвижности смеси, что напрямую ведет к повышению прочности и плотности затвердевшего бетона.

Виды минеральных добавок и их влияние на свойства бетона:

Зола-уноса — Ее применение способствует связыванию свободной извести, уменьшению пористости и проницаемости бетона, что повышает его устойчивость к сульфатной агрессии и воздействию мягкой воды [16, 17].

Микрокремнезем — высокоактивный пуццолановый материал из частиц аморфного диоксида кремния. Его добавка в бетон [18, 19]:

1) улучшает структуру цементного камня за счёт реакции с  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  и образования прочных фаз гидросиликатов кальция (calcium silicate hydrate - C-S-H);

2) повышает прочность бетона до 1,5 раза (при замене до 20 % цемента);

3) снижает пористость, заменяя гидроксид кальция на более прочную гидросиликатную фазу;

4) ускоряет гидратацию благодаря наночастицам, служащим центрами зародышеобразования C-S-H;

Высокодисперсный мел органогенного происхождения демонстрирует высокую эффективность в улучшении эксплуатационных характеристик бетона. При введении в состав в количестве 10–20 % достигаются следующие показатели [20]:

1) повышается коррозионная стойкость бетона в агрессивных средах (на 18 % — в среде с хлоридами, на 32 % — с сульфатами, на 39 % — с ионами магния);

2) увеличивается прочность на сжатие на 3,5 % и прочность на растяжение при изгибе на 11,4 %;

3) улучшает водонепроницаемость на 20 %;

4) повышает морозостойкость (на 26 % при оттаивании в воде и на 28,3 % при оттаивании в хлориде натрия).

Механизм действия обусловлен двумя причинами. Во-первых, компенсацией потерь электрогетерогенных контактов в структуре бетона за счёт отрицательно заряженных поверхностей частиц мела. Во-вторых, пластифицирующим эффектом — адсорбцией отрицательно заряженных частиц мела на положительно заряженной поверхности цементных частиц. Однако, стоит учитывать, что наличие положительно заряженных участков на поверхности частиц мела может приводить к их слипанию. Для

---

предотвращения этого явления необходимо использование анионных поверхностно-активных веществ.

Исследование влияния добавки цеолита или перлита в портландцемент ПЦ И-500 дали следующий результат [9, 17]. Введение 10 % цеолита или перлита повышает водопотребность (перлит — на 3–6 %, цеолит — на 2–3 %), но при этом улучшает водоудерживающую способность. Наибольшее увеличение водопотребности дают полидисперсные добавки перлита. Цементы с полидисперсной добавкой цеолита и перлита отличаются минимальным водоотделением благодаря пористости частиц. При этом сроки схватывания сокращаются (для тонкодисперсных перлитсодержащих составов — на 20–25 мин, цеолитсодержащих — на 10–15 мин) из-за поглощения воды пористыми компонентами; расширение цементов при этом остаётся в пределах нормы (1 мм по Ле Шателье).

Цементы с добавками цеолита (особенно полидисперсного) со временем (после 28–42 суток твердения) достигают и даже превышают прочность (в том числе, прочность на растяжении при изгибе) контрольного портландцемента, в то время как составы с перлитом (особенно полидисперсного) демонстрируют более низкую прочность из-за высокой водопотребности и малой прочности частиц перлита.

Бетоны с модификаторами типа МБ охватывают широкий спектр высокопрочных и специализированных составов (малоцементные бетоны классов В40–В60, тяжелые высокопрочные (до В100) и конструкционные легкие бетоны (до В60), бетоны с компенсированной усадкой или самонапряжением (до  $Sp_{2,0}$ ), бетоны низкой проницаемости (W12–W20), высокой морозостойкости (до F2300) и коррозионной стойкости) [15]. Подбор составов бетонных смесей с ОММ должен производиться по ГОСТ 27006–86 с использованием традиционных материалов: цементы ЦЕМ I и ЦЕМ II по ГОСТ 31108–2016 или ПЦ500 и ПЦ600 по ГОСТ 10178–85 [6, 20],

заполнители по ГОСТ 8267–93, ГОСТ 8736–93 и ГОСТ 32496–2013. Модификаторы типа МБ по ГОСТ Р 56178–2014 имеют поликомпонентный состав и маркируются в зависимости от степени эффективности и соотношения ингредиентов. Примеры номинальных составов таких бетонов, использованных на крупных строительных объектах, приведены в Таблице 1.

Таблица 1

Номинальный состав малоцементных бетонов классов В40–В60 с  
низкой экзотермией

Компонент	Ед. изм.	Количество на 1 м <sup>3</sup> бетона
Портландцемент ЦЕМ I 42,5Н	кг	320
Модификатор МБ (типа 15-20С)	кг	56 (17.5% от цемента)
Микронаполнитель (известняк)	кг	64 (20% от цемента)
Песок (Мк 2.0-2.5)	кг	750
Щебень фр. 5-20 мм	кг	1100
Вода	л	150
Водовяжущее отношение (В/(Ц+МБм.ч.))	-	~0.38
Подвижность смеси	см	П4 (16-20)

При подборе составов высокопрочных бетонов ключевыми условиями являются:

- Использование портландцемента без минеральных добавок с содержанием  $S_{3A}$  не более 8% (например, ПЦ500Д0, ПЦ500Д0Н по ГОСТ 10178 или ЦЕМ I 42,5Н, ЦЕМ I 52,5Н по ГОСТ 31108).
- Ограничение максимального расхода цемента дозировкой не выше 500 кг/м<sup>3</sup>.
- Оптимизация дозировки модификатора в диапазоне 15–25% от массы цемента.

Номинальные составы таких бетонов, примененных при возведении каркасов высотных зданий, представлены в таблице 2.

Таблица 2

### Номинальный состав высокопрочных бетонов классов В60–В100

Компонент	Ед. изм.	Количество на 1 м <sup>3</sup> бетона
Портландцемент ЦЕМ I 52,5Н	кг	480
Модификатор МБ (типа 20-00С)	кг	96 (20% от цемента)
Песок (Мк 2.5-3.0)	кг	650
Щебень фр. 5-20 мм (высокопрочный)	кг	1150
Суперпластификатор (в составе МБ)	% от МБ	20
Вода	л	140
Водоцементное отношение (В/Ц)	-	~0.29
Подвижность смеси	см	П4-П5 (16-21+)

Для получения самоуплотняющихся бетонных смесей необходимо обеспечить высокую подвижность (расплыв стандартного конуса 55–75 см) при сохранении сегрегационной устойчивости. Примеры подобных составов, примененных при возведении фундаментов высотных зданий, приведены в таблице 3.

Таблица 3

### Номинальный состав бетонов класса В40–В100 из самоуплотняющихся смесей (иллюстративная)

Компонент	Ед. изм.	Количество на 1 м <sup>3</sup> бетона
Портландцемент ЦЕМ I 42,5Н	кг	400
Модификатор МБ (типа 20-20С)	кг	80 (20% от цемента)
Микронаполнитель (зола-уноса)	кг	100
Общее кол-во тонкодисперсных	кг	580
Песок (Мк 2.0-2.8)	кг	850
Щебень фр. 5-10 мм	кг	800
Вода	л	170
Объем теста	м <sup>3</sup>	~0.37
Расплыв конуса	см	65-75



Номинальные составы бетонов классов В40–В60 низкой проницаемости, высокой морозостойкости и коррозионной стойкости, использованных при строительстве гидросооружений, мостов и путепроводов, представлены в таблице 4.

Таблица 4

Номинальный состав бетонов классов В40–В60 низкой проницаемости, высокой морозостойкости и коррозионной стойкости

Компонент	Ед. изм.	Количество на 1 м <sup>3</sup> бетона
Портландцемент ЦЕМ I 42,5Н (сульфатостойкий)	кг	420
Модификатор МБ (типа 10-50С)	кг	42 (10% от цемента)
Песок (Мк 2.2-2.8)	кг	700
Щебень фр. 5-20 мм (морозостойкий)	кг	1120
Воздухововлекающая добавка	% от Ц	0.05-0.15 (по типу)
Вода	л	160
Водоцементное отношение (В/Ц)	-	~0.38
Объем вовлеченного воздуха	%	4-6
Водонепроницаемость	марка	W12-W16
Морозостойкость	марка	F300-F400

Применение модификаторов МБ дает не только улучшить технологические свойства бетонных смесей (подвижность, самоуплотняемость), но и существенно повысить физико-механические характеристики затвердевшего бетона, включая прочность, плотность, и, как следствие, его коррозионную стойкость за счет формирования более плотной и менее проницаемой структуры цементного камня [21].

Оценка пуццоланической активности минеральных добавок важна для прогнозирования их влияния на свойства цементных систем в реальных условиях твердения. В Таблице 5 приведены данные по пуццоланической активности полидисперсных минеральных компонентов по сравнению с контрольным составом портландцемента ПЦ И-500.

Таблица 5

Пуццоланическая активность полидисперсных минеральных  
компонентов

Вяжущее	Состав, мас.%	РК, мм	Прочность на сгиб/сжатие, МПа, возрасте, сутках	Кпц28, сгиб/сжатие	Кпц90, сгиб/сжатие
ПЦ I - 500	100	190	6,9/53,0	7,3/56,5	-
ПЦ I - 500 + ЦШК	90 + 10	185	7,4/49,8	8,0/56,9	1,07/0,94
ПЦ I - 500 + ЦШК	90 + 10	175	7,6/48,7	8,3/53,4	1,1/0,92
ПЦ I - 500 + ППК	90 + 10	180	7,2/46,7	7,4/50,6	1,04/0,88
ПЦ I - 500 + ППК	90 + 10	165	6,5/45,6	7,0/49,7	0,94/0,86

Анализ данных из таблицы 5 показывает, что цеолитовые добавки (цеолит тонкодисперсный и полидисперсный) демонстрируют высокую активность, особенно в поздние сроки твердения (90 суток), превышая прочность контрольного образца по изгибу и достигая сопоставимых или даже больших значений по сжатию (для тонкодисперсной добавки). Добавление полидисперсного цеолита способствует хорошему росту прочности на изгиб. Перлитовые добавки (перлит тонкодисперсный и полидисперсный) в целом снижают прочностные характеристики, что согласуется с данными об их повышенной водопотребности и меньшей собственной прочности частиц.

Нанотехнологический подход к созданию высокотехнологичных бетонов с высокой ранней прочностью включает разработку высококачественных вяжущих наноматериалов и органоминеральных нанокомпозитов, представляющих собой материалы из минеральной и полимерной составляющих, объединенных на наноуровне [22]. Для

получения высокопрочного цементного камня эффективным является использование комплексной органоминеральной добавки на основе кремнеземистых добавок различного происхождения и поликарбоксилатных суперпластификаторов [23, 24]. При реализации такой комплексной модификации достигается синергетический эффект: суперпластификаторы обеспечивают высокие водоредуцирующие свойства, а активный диоксид кремния (например, нанодисперсный микрокремнезем) связывает гидроксид кальция в дополнительные гидросиликаты [25]. Этот процесс происходит без увеличения объема твердой фазы, и предотвращает формирование внутренних напряжений. Как уже отмечалось, наноразмерные частицы микрокремнезема существенно ускоряют процессы гидратации, выступая в роли многочисленных центров кристаллизации для формирования более плотной структуры C-S-H геля, эффективно заполняющего поровое пространство.

Современные ОМС, используемые в дорожном строительстве и других областях, часто содержат вторичный асфальтобетон, что делает вопрос их долговечности и коррозионной стойкости особенно актуальным. Применение минеральных вяжущих (тип М) или комплексных вяжущих (тип К), включающих портландцемент и активные минеральные добавки, в составе ОМС направлено на повышение прочности и устойчивости минеральной составляющей композита. Механизмы повышения коррозионной стойкости, связанные с уплотнением структуры, снижением проницаемости и связыванием уязвимых компонентов цементного камня, аналогичны тем, что наблюдаются в традиционных цементных бетонах при использовании минеральных добавок. Особое внимание следует уделять совместимости органического вяжущего (битумной эмульсии, вспененного битума) с минеральной частью и влиянию этого взаимодействия на общую стойкость композита.

---

## Обсуждение

Применение минеральных добавок является неотъемлемой частью современной технологии бетона, направленной на получение материалов с заданными эксплуатационными свойствами и повышенной долговечностью. Сравнительный анализ эффективности различных добавок показывает, что выбор конкретного типа и дозировки должен основываться на требуемых характеристиках бетона, условиях его эксплуатации и доступности сырьевых компонентов.

ОММ типа МБ, сочетающие в себе действие суперпластификаторов и тонкодисперсных минеральных компонентов (микрокремнезем, зола-уноса), позволяют комплексно решать задачи по улучшению удобоукладываемости бетонных смесей, повышению прочности и долговечности бетонов [9]. Их применение особенно эффективно при производстве высокопрочных, самоуплотняющихся и малоцементных бетонов.

Высокодисперсный мел, особенно органогенного происхождения, демонстрирует не только пластифицирующий эффект, но и способность повышать коррозионную стойкость бетона в различных агрессивных средах за счет модификации структуры и фазового состава цементного камня. Его доступность и относительно невысокая стоимость делают его перспективным компонентом для массового применения.

Кремнеземистые добавки, такие как микрокремнезем и нанокремнезем, являются одними из наиболее эффективных средств повышения прочности и плотности цементного камня. Их пуццоланическая активность приводит к значительному улучшению стойкости бетона к химической агрессии, особенно сульфатной. Переход к наноразмерным частицам открывает перспективы для еще более тонкого управления процессами структурообразования.

Природные минеральные добавки, такие как цеолиты и перлиты, также могут вносить положительный вклад в свойства бетона [9]. Цеолиты, обладая пуццоланической активностью и ионообменными свойствами, способны улучшать прочностные характеристики и долговечность. Однако необходимо учитывать их влияние на водопотребность и тщательно подбирать дисперсность и дозировку.

Перспективы применения минеральных добавок связаны с разработкой новых комплексных модификаторов, в том числе с использованием техногенного сырья, что соответствует принципам устойчивого развития. Дальнейшие исследования должны быть направлены на более глубокое понимание механизмов взаимодействия многокомпонентных систем «цемент – минеральные добавки – химические модификаторы» и оптимизацию составов бетонов для экстремальных условий эксплуатации.

Технологические аспекты применения минеральных добавок включают необходимость точного дозирования и равномерного распределения в объеме бетонной смеси. Экономическая целесообразность их использования определяется стоимостью самих добавок, экономией цемента и увеличением срока службы конструкций, что снижает затраты на ремонт и восстановление.

### **Заключение**

Применение минеральных добавок является одним из наиболее эффективных и экономически оправданных методов повышения коррозионной стойкости и общей долговечности бетонов различного назначения. Добавки, такие как зола-уноса, микрокремнезем, высокодисперсный мел, цеолит и перлит, оказывают многогранное влияние на структуру и свойства цементного камня. Они способствуют уплотнению структуры за счет пуццоланической реакции и микронаполнения, снижают проницаемость для агрессивных сред, связывают химически уязвимые

---

компоненты цемента и, в ряде случаев, улучшают реологические свойства бетонных смесей, позволяя снижать водовяжущее отношение. Комплексные ОММ типа МБ предоставляют широкие возможности для проектирования составов высококачественных бетонов с заданными эксплуатационными характеристиками, включая высокую прочность, низкую проницаемость, морозостойкость и коррозионную стойкость.

Нанотехнологические подходы открывают новые перспективы в создании бетонов с уникальными свойствами. Правильный выбор типа и дозировки минеральной добавки или модификатора, основанный на понимании механизмов их действия и специфических условий эксплуатации конструкций, позволяет значительно продлить срок службы бетонных и железобетонных сооружений, снизить затраты на их ремонт и обеспечить надежность и безопасность строительных объектов.

### Литература

1. Lam Van Tang, Hung Xuan Ngo, Dien Vu Kim, Bulgakov B.I., Aleksandrova O.V. Effect of Complex Organo-Mineral Modifier on the Properties of Corrosion-Resistant Concrete // MATEC Web of Conferences. 2018. Vol. 251. P. 01005. DOI: 10.1051/ matecconf/201825101005.
2. Вербель М. А., Серегин К. К., Шепитько А. А., Добшиц Л. М. Исследование влияния суперпластифицирующих и минеральных добавок на свойства бетона // Современные вызовы транспортной отрасли: новые возможности: материалы межвузовской научно-практической конференции транспортных вузов (Москва, 27–28 февраля 2024 года). — Москва: Издательско-торговая корпорация «Дашков и К», 2024. — С. 50–53. — EDN: SPCKZE.
3. Дженчако П. Д., Добшиц Л. М., Николаева А. А. Обзор влияния органоминеральных добавок с использованием техногенных активных минеральных добавок на физико-механические свойства бетонов //

---

Транспорт. Транспортные сооружения. Экология. – 2024. – № 4. – С. 29-39. – DOI: 10.15593/24111678/2024.04.04. – EDN WIMZGX.

4. Соколов П.Э., Лупиногин В.В., Толочёк Т.В., Темуркаев М.А., Карапузов В.И. Повышение эффективности мелкозернистого бетона на некондиционных материалах с помощью комплексной добавки // Инженерный вестник Дона – 2025. – №6. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n6y2025/10146

5. Соколов П.Э. Повышение эффективности мелкозернистого фибробетона на тонком песке с помощью комплексной добавки // Вестник евразийской науки. 2023. Т. 15. №5. С. 1-17.

6. Степанова В.Ф., Розенталь Н.К., Чехний Г.В., Баев С.М. Определение коррозионной стойкости торкрет-бетона как защитного покрытия бетонных и железобетонных конструкций // Строительные материалы. 2018. № 8. С. 69–72. DOI: 10.31659/0585-430X-2018-762-8-69-72.

7. Федюк Р.С. Проектирование цементных композитов повышенной непроницаемости // Вестник МГСУ. 2016. № 5. С. 72–81.

8. Шейнфельд А.В. Органоминеральные модификаторы как фактор, повышающий долговечность железобетонных конструкций // Бетон и железобетон. 2014. № 3. С. 16–21.

9. Шеховцов Д.Г., Кабалин М.Д., Высоцкая М.А. Коррозионная стойкость асфальтогранулобетона // Вестник ГГНТУ. Технические науки. 2024. Том XXI, №1 (39). С. 86-94.

10. Каприелов С.С., Шейнфельд А.В., Кардумян Г.С., Чилин И.А. О подборе составов высококачественных бетонов с органоминеральными модификаторами // Строительные материалы. 2017. № 12. С. 58–63.

11. Шарифов А.Х., Гайбуллаева З. Х., Ньматзода Д. С., Гозиев З. А. Эффективные способы предотвращения коррозии гидротехнического бетона

// Доклады Национальной академии наук Таджикистана. — 2022. — Т. 65, № 1–2. — С. 98–105. — EDN WDELEG.

12. Abdullah S., Faraj H., Abdulmajeed A. A Review Study on the Impact of Mineral Admixtures on Concrete Performance // Advances in Civil Engineering and Environmental Science. — 2025.— Vol.2, No. 2. — pp.121–139.— DOI: 10.22034/acees.2025.493464.1015

13. Saif Allah S. J., Mohammed Kassim M., Abdulsamad Salman G. The Durability of Concrete Mortars with Different Mineral Additives Exposed to Sulfate Attack // Salud, Ciencia y Tecnología — Serie de Conferencias. — 2024. — Vol. 3. — P. 851.

14. Szcześniak A., Siwiński J., Stolarski A., Piekarczyk A., Nasiłowska B. The Influence of the Addition of Microsilica and Fly Ash on the Properties of Ultra-High-Performance Concretes // Materials. — 2025. — Vol. 18. — P. 28.

15. Lam Van Tang, Bulgakov B., Bazhenov Y., Aleksandrova O., Anh Ngoc Pham. Effect of rice husk ash on hydrotechnical concrete behavior // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2018. Vol. 365. P. 032007. DOI: 10.1088/1757- 899X/365/3/032007.

16. Галкин Ю.Ю., Удодов С. А. Фазовый анализ структуры цементного камня, изолированного при его раннем нагружении // Транспортные сооружения. 2018. Т. 5. № 1. С. 20. DOI: 10.15862/21SATS118.

17. Nia S. B. B., Nemati Chari M., Adlparvar M. R. Experimental Study of Applying Natural Zeolite as a Partial Alternative for Cement in Self-Compacting Concrete (SCC) // Advance Researches in Civil Engineering. — 2019. — Vol. 1, No. 3. — pp. 1–18. — ISSN: 2645-7229.

18. Смирнов А. О., Добшиц Л. М., Анисимов С. Н., Лешканов А. Ю. Комплексное влияние добавок поликарбоксилатного суперпластификатора и микрокремнезёма на свойства самоуплотняющихся бетонов // Вестник



Поволжского государственного технологического университета. Серия: Материалы. Конструкции. Технологии. — 2024. — № 2 (30). — С. 6–16.

19. Хунг Н. С., Булгаков Б. И., Александрова О. В. Влияние минеральных добавок на прочность сцепления цементного камня бетона со стальной арматурой // Промышленное и гражданское строительство. – 2022. – № 6. – С. 25-31. – DOI: 10.33622/0869-7019.2022.06.25-31. – EDN DJCFEO.

20. Сафаров К.Б., Степанова В.Ф., Фаликман В.Р. Влияние механоактивированной низкокальциевой золы-уноса на коррозионную стойкость гидротехнических бетонов Рогунской ГЭС // Строительные материалы. 2017. № 9. С. 20–24.

21. Иванов И.М., Матвеев Д.В., Орлов А.А., Крамар Л.Я. Влияние водоцементного отношения и суперпластификаторов на процессы тепловыделения, гидратации и твердения цемента // Вестник ЮУрГУ. Серия: Строительство и архитектура. 2017. Т. 17. № 2. С. 42–49. DOI: 10.14529/build170206.

22. Зырянов М.С., Ахметжанов А.М., Манушина А.С., Потапова Е.Н. Определение пуццолановой активности метакаолина // Успехи в химии и химической технологии. 2016. Т. 30. № 7 (176). С. 44–46.

23. Добшиц Л. М., Дженчако П. Д. Влияние органоминеральных добавок на физико - механические свойства бетона // Внедрение современных конструкций и передовых технологий в путевое хозяйство. – 2024. – Т. 20. – С. 38-43. – EDN QHJVJSG.

24. Шепитько А. А., Серегин К. К., Вербель М. А., Добшиц Л. М. Исследование влияния суперпластифицирующих и минеральных добавок на свойства бетона // Соискатель — приложение к журналу «Мир транспорта». — 2023. — № 3 (14). — С. 39–43. — EDN: KEYXPF.

25. Кирсанова А.А. Влияние комплексных добавок с метакаолином на сульфатостойкость цементного камня // Наука ЮУрГУ. 2014. С. 929–934.

---

## References

1. Lam Van Tang, Hung Xuan Ngo, Dien Vu Kim, Bulgakov B.I., Aleksandrova O.V. MATEC Web of Conferences, 2018. Vol. 251, p. 01005. DOI: 10.1051/ matecconf/201825101005.
2. Verbel' M. A., Seregin K. K., Shepit'ko A. A., Dobshits L. M. Sovremennye vyzovy transportnoy otrasli: novye vozmozhnosti: materialy mezhvuzovskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii transportnykh vuzov (Moskva, 27-28 fevralya 2024 goda). Moskva: Izdatel'sko-torgovaya korporatsiya «Dashkov i K», 2024. pp. 50-53. EDN: SPCKZE.
3. Dzhenchako P. D., Dobshits L. M., Nikolaeva A. A. Transport. Transportnye sooruzheniya. Ekologiya, 2024. № 4, pp. 29-39. DOI: 10.15593/24111678/2024.04.04. EDN WIMZGX.
4. Sokolov P.E., Lupinogin V.V., Tolochek T.V., Temurkaev M.A., Karapuzov V.I. Inzhenernyy vestnik Dona, 2025. №6. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n6y2025/10146
5. Sokolov P.E. Vestnik evraziyskoy nauki, 2023. T. 15, №5, pp. 1-17.
6. Stepanova V.F., Rozental' N.K., Chekhniy G.V., Baev S.M. Stroitel'nye materialy, 2018. № 8, p. 69-72. DOI: 10.31659/0585-430Kh-2018-762-8-69-72.
7. Fedyuk R.S. Vestnik MGSU, 2016. № 5, pp. 72–81.
8. Sheynfel'd A.V. Beton i zhelezobeton, 2014. № 3, pp. 16–21.
9. Shekhovtsov D.G., Kabalin M.D., Vysotskaya M.A. Vestnik GGNTU. Tekhnicheskie nauki, 2024. Tom XXI, №1 (39), pp. 86-94.
10. Kaprielov S.S., Sheynfel'd A.V., Kardumyan G.S., Chilin I.A. Stroitel'nye materialy, 2017. № 12, pp. 58-63.
11. Sharifov A. Kh, Gaybullaeva Z. Kh., Ne"matzoda D. S., Goziev Z. A. Doklady Natsional'noy akademii nauk Tadzhikistana, 2022. T. 65, № 1-2, pp. 98-105. EDN WDELEG.

12. Abdullah S., Faraj H., Abdulmajeed A. Advances in Civil Engineering and Environmental Science, 2025. Vol. 2, No. 2, pp. 121-139. DOI: 10.22034/acees.2025.493464.1015
13. Saif Allah S. J., Mohammed Kassim M., Abdulsamad Salman G. Salud, Ciencia y Tecnología - Serie de Conferencias, 2024. Vol. 3, p. 851.
14. Szcześniak A., Siwiński J., Stolarski A., Piekarczyk A., Nasiłowska B. Materials, 2025. Vol. 18, p. 28.
15. Lam Van Tang, Bulgakov B., Bazhenov Y., Aleksandrova O., Anh Ngoc Pham. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2018. Vol. 365, p. 032007. DOI: 10.1088/1757- 899X/365/3/032007.
16. Galkin Yu.Yu., Udodov S. A. Transportnye sooruzheniya, 2018. T. 5, № 1, p. 20. DOI: 10.15862/21SATS118.
17. Nia S. B. B., Nemati Chari M., Adlparvar M. R. Advance Researches in Civil Engineering, 2019. Vol. 1, No. 3, pp. 1-18. ISSN: 2645-7229.
18. Smirnov A. O., Dobshits L. M., Anisimov S. N., Leshkanov A. Yu. Vestnik Povolzhskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta. Seriya: Materialy. Konstruktsii. Tekhnologii, 2024. № 2 (30), pp. 6-16.
19. Khung N. S., Bulgakov B. I., Aleksandrova O. V. Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo, 2022. № 6, pp. 25-31. DOI: 10.33622/0869-7019.2022.06.25-31. EDN DJCFEO.
20. Safarov K.B., Stepanova V.F., Falikman V.R. Stroitel'nye materialy, 2017. № 9, pp. 20-24.
21. Ivanov I.M., Matveev D.V., Orlov A.A., Kramar L.Ya. Vestnik YuUrGU. Seriya: Stroitel'stvo i arkhitektura, 2017. T. 17, № 2, pp. 42-49. DOI: 10.14529/build170206.
22. Zyryanov M.S., Akhmetzhanov A.M., Manushina A.S., Potapova E.N. Uspekhi v khimii i khimicheskoy tekhnologii, 2016. T. 30, № 7 (176), pp. 44-46.



23. Dobshits L. M., Dzhenchako P. D. Vnedrenie sovremennykh konstruktsiy i peredovykh tekhnologiy v putevye khozyaystvo, 2024. T. 20, pp. 38-43. EDN QHVJSG.

24. Shepit'ko A. A., Seregin K. K., Verbel' M. A., Dobshits L. M. Soiskatel' - prilozhenie k zhurnalu «Mir transporta», 2023. № 3 (14), pp. 39-43. EDN: KEYXPF.

25. Kirsanova A.A. Nauka YuUrGU, 2014. pp. 929-934.

**Авторы согласны на обработку и хранение персональных данных.**

**Дата поступления: 18.12.2025**

**Дата публикации: 7.02.2026**