

JOURNAL OF TRANSPORT



ISSUE 1, 2026 vol. 3

E-ISSN: 2181-2438

ISSN: 3060-5164



RESEARCH, INNOVATION, RESULTS



**TOSHKENT DAVLAT
TRANSPORT UNIVERSITETI**

Tashkent state
transport university



JOURNAL OF TRANSPORT

RESEARCH, INNOVATION, RESULTS

E-ISSN: 2181-2438

ISSN: 3060-5164

VOLUME 3, ISSUE 1

MARCH, 2026



jot.tstu.uz

TASHKENT STATE TRANSPORT UNIVERSITY

JOURNAL OF TRANSPORT

SCIENTIFIC-TECHNICAL AND SCIENTIFIC INNOVATION JOURNAL

VOLUME 3, ISSUE 1 MARCH, 2026

EDITOR-IN-CHIEF

SAID S. SHAUMAROV

Professor, Doctor of Sciences in Technics, Tashkent State Transport University

Deputy Chief Editor

Miraziz M. Talipov

Doctor of Philosophy in Technical Sciences, Tashkent State Transport University

The “**Journal of Transport**” established by Tashkent State Transport University (TSTU), is a prestigious scientific-technical and innovation-focused publication aimed at disseminating cutting-edge research and applied studies in the field of transport and related disciplines. Located at Temiryo‘lchilar Street, 1, office 465, Tashkent, Uzbekistan (100167), the journal operates as a dynamic platform for both national and international academic and professional communities. Submissions and inquiries can be directed to the editorial office via email at jot@tstu.uz.

The Journal of Transport showcases groundbreaking scientific and applied research conducted by transport-oriented universities, higher educational institutions, research centers, and institutes both within the Republic of Uzbekistan and globally. Recognized for its academic rigor, the journal is included in the prestigious list of scientific publications endorsed by the decree of the Presidium of the Higher Attestation Commission No. 353/3 dated April 6, 2024. This inclusion signifies its role as a vital repository for publishing primary scientific findings from doctoral dissertations, including Doctor of Philosophy (PhD) and Doctor of Science (DSc) candidates in the technical and economic sciences.

Published quarterly, the journal provides a broad spectrum of high-quality research articles across diverse areas, including but not limited to:

- Economics of Transport
- Transport Process Organization and Logistics
- Rolling Stock and Train Traction
- Research, Design, and Construction of Railways, Highways, and Airfields, including Technology
- Technosphere Safety
- Power Supply, Electric Rolling Stock, Automation and Telemechanics, Radio Engineering and Communications
- Technological Machinery and Equipment
- Geodesy and Geoinformatics
- Automotive Service
- Air Traffic Control and Aircraft Maintenance
- Traffic Organization
- Railway and Road Operations

The journal benefits from its official recognition under Certificate No. 1150 issued by the Information and Mass Communications Agency, functioning under the Administration of the President of the Republic of Uzbekistan. With its E-ISSN 2181-2438, ISSN 3060-5164 the publication upholds international standards of quality and accessibility.

Articles are published in Uzbek, Russian, and English, ensuring a wide-reaching audience and fostering cross-cultural academic exchange. As a beacon of academic excellence, the "Journal of Transport" continues to serve as a vital conduit for knowledge dissemination, collaboration, and innovation in the transport sector and related fields.

Strategy for modifying cement systems with finely dispersed mineral fillers

A.I. Adilkhodjaev¹^a, I.A. Kadirov²^b, F.E. Abdukadirov¹^c

¹Tashkent state transport university, Tashkent, Uzbekistan

²"Tashkent Institute of Irrigation and Agricultural Mechanization Engineers" NRU, Tashkent, Uzbekistan

Abstract: This study presents a comprehensive strategy for the structural modification of cement systems using finely dispersed mineral fillers within modern concrete technology. The research systematically analyzes the synergistic mechanisms of physical (filler effect), nucleational, and pozzolanic interactions of additives on the microstructure of cement stone. A comparative performance assessment of widely used technogenic and natural fillers—including silica fume, fly ash, metakaolin, and limestone—was conducted to evaluate their impact on hydration kinetics and pore structure refinement. The findings highlight that the transition to multi-component synergistic systems not only optimizes the mechanical properties and durability of concrete but also aligns with global sustainability goals by significantly reducing the carbon footprint of the cement industry. The study provides a theoretical framework for the targeted design of high-performance, low-clinker composites, facilitating the shift toward decarbonization and resource-efficient construction.

Keywords: cement systems, microfillers, pozzolanic activity, microstructure, durability, decarbonization, sustainable development, carbon footprint, synergistic effect

Стратегия модификации цементных систем тонкодисперсными минеральными наполнителями

Адилходжаев А.И.¹^a, И.А. Кадиров И.А.²^b, Ф.Е. Абдукадиров Ф.Э.¹^c

¹Ташкентский государственный транспортный университет, Ташкент, Узбекистан

²«Ташкентский институт инженеров ирригации и механизации сельского хозяйства» НИУ Ташкент, Узбекистан

Аннотация: В данной статье представлен комплексный анализ применения тонкодисперсных минеральных наполнителей в современной технологии бетонов. Рассматриваются механизмы физического, нуклеационного и пуццоланового воздействия добавок на микроструктуру цементного камня. Проведен сравнительный анализ эффективности наиболее распространенных техногенных и природных наполнителей (микрокремнезем, зола-унос, метаксаолин, известняк). Особое внимание уделено вопросам устойчивого развития цементной отрасли, снижению углеродного следа и переходу к многокомпонентным синергетическим системам.

Ключевые слова: цементные системы, микронаполнители, пуццолановая активность, микроструктура, долговечность, декарбонизация, устойчивое развитие

1. Введение

Глобальный контекст и актуальность.

Современная строительная индустрия находится в точке бифуркации, где традиционные методы производства сталкиваются с жесткими требованиями экологической безопасности и экономической эффективности. Цементная промышленность, являясь фундаментом мировой инфраструктуры, одновременно выступает одним из крупнейших источников антропогенного воздействия на биосферу.


Производство портландцементного клинкера — процесс крайне энергоемкий. По оценкам экспертов, на выпуск одной тонны цемента приходится от 0,8 до 0,9 тонн выбросов CO₂, что суммарно составляет около 8% глобальной эмиссии парниковых газов. В условиях


реализации программ декарбонизации и перехода к «зеленой» экономике, поиск путей снижения «клинкер-фактора» без потери эксплуатационных свойств бетона становится приоритетной задачей материаловедения [1-6].

Наиболее перспективным решением данной проблемы является использование тонкодисперсных минеральных наполнителей (микронаполнителей). Это не просто инертные добавки для удешевления смеси, а активные модификаторы, позволяющие на наноуровне управлять процессами гидратации и формирования фазового состава цементного камня.

В настоящем кратком обзоре систематизированы данные, касающиеся классификации и функциональной роли микронаполнителей в цементных композициях. Особое внимание уделено инновационным методам

^a  <https://orcid.org/0000-0003-4552-0418>

^b  <https://orcid.org/0000-0001-9425-4523>

^c  <https://orcid.org/0000-0003-2271-3768>



внедрения добавок и векторы развития технологий, направленных на получение высокотехнологичных и экологически безопасных строительных материалов будущего.

2. Методика исследования

2.1 Физико-химические механизмы действия наполнителей

Эффективность тонкодисперсных добавок обусловлена триадой взаимосвязанных эффектов, которые проявляются на разных стадиях формирования композита-бетона:

эффект физического уплотнения (Microfiller Effect). Частицы наполнителя, обладая дисперсностью, превышающей дисперсность цемента, распределяются в межзерновом пространстве. Это позволяет:

- оптимизировать гранулометрию (плотность упаковки);
- вытеснить «лишнюю» воду из пустот, направляя ее на гидратацию или снижая общее водопотребление системы;
- создать более однородный скелет материала, что минимизирует количество крупных капиллярных пор [7];

нуклеационный эффект. Поверхность мелких частиц наполнителя служит субстратом для гетерогенного зарождения кристаллов гидратных фаз. Это ускоряет раннюю гидратацию клинкерных минералов, способствуя формированию мелкокристаллической структуры, обладающей меньшим количеством дефектов;

пуццолановая реакция. Для активных наполнителей (микрокремнезем, метакаолин, зола-унос) ключевым фактором является химическое взаимодействие аморфного кремнезема (SiO_2) с портландитом ($\text{Ca}(\text{OH})_2$). В результате этой реакции образуются дополнительные прочные соединения низкоосновных гидросиликатов кальция (C-S-H). Такое взаимодействие не только повышает прочность композита, но и способствует трансформации поровой структуры, переводя макропоры в категорию безопасных микро и нанопор.

2.2 Сравнительная характеристика некоторых видов наполнителей

В зависимости от происхождения и химической активности, наполнители оказывают различное влияние на свойства системы.

Микрокремнезем (МКР). Этот ультрадисперсный побочный продукт металлургии с экстремально высокой удельной поверхностью (до 25 000 $\text{см}^2/\text{г}$). Он обеспечивает «взрывной» рост прочности в ранние сроки твердения и способствует созданию сверхплотной структуры. Однако использование МКР требует обязательного применения суперпластификаторов из-за высокой водопотребности.

Зола-унос (ЗУ). Наиболее массовый техногенный наполнитель. В отличие от метакаолина, она работает в поздние сроки твердения. На ранних стадиях зола может несколько замедлять набор прочности, но в возрасте 90–360 суток бетоны с высоким содержанием золы (HVFA-бетоны) часто превосходят бездобавочные аналоги по прочности и трещиностойкости. Кроме того,

сферическая форма частиц золы создает «эффект подшипников», улучшая удобоукладываемость смеси.

Метакаолин (МКЛ). Продукт дегидратации каолиновой глины — считается одним из самых эффективных пуццолановых материалов. Исследования [6] показали, что введение даже 5–10% МК повышает прочность проектируемого бетона на сжатие на 20–40%. Уникальность метакаолина заключается в его способности резко снижать проницаемость бетона для агрессивных сред и эффективно подавлять щелочно-кремнеземную реакцию (ASR), что критически важно для долговечности сооружений эксплуатируемых в условиях переменного уровня вод.

Представляет собой высокорекреационный искусственный пуццолан, синтезируемый в процессе дегидратации каолиновых глин при строго заданных температурных режимах. Помимо существенной оптимизации физико-механических показателей бетонной матрицы, данный компонент выступает эффективным ингибитором деструктивных щелочно-силикатных процессов. Это делает его применение стратегически важным для обеспечения коррозионной стойкости конструкций, эксплуатируемых в агрессивных средах

Гранулированный доменный шлак (ГДШ). Продукт мелкодисперсного измельчения расплава, подвергнутого резкому термическому охлаждению в процессе выплавки чугуна. Данный материал характеризуется скрытой (латентной) гидравлической активностью: его самостоятельное твердение при контакте с водой инициируется лишь в присутствии химических активаторов — щелочей или сульфатов, высвобождающихся в процессе гидратации цемента

Известняковая мука (ИМ). Долгое время известняк считался инертным компонентом. Однако исследования [7] доказали, что тонкомолотый CaCO_3 вступает во взаимодействие с алюминатными фазами цемента, образуя карбоалюминаты стабилизирующих структуру и ускоряющих начальное твердение. Оптимальная дозировка известняка (до 15%) позволяет существенно экономить клинкер без ущерба для эксплуатационных характеристик бетонов.

2.3 Анализ эффективности применения наполнителей

На основании обобщения результатов различных исследований [8-10] представляем сравнительную матрицу влияния добавок (Табл.1), применение которых позволяет с большой вероятностью производить направленное проектирование бетонов требуемых показателей свойств и способов использования.

2.4 Потенциальные риски и ограничения

Несмотря на очевидные преимущества, применение микронаполнителей различной природы связано с определенными рисками, учет которых позволяет существенно снизить или устранить возникновение потенциальных проблем. Основной риск связан со снижением щелочности порового раствора (pH). Активные пуццоланы связывают $\text{Ca}(\text{OH})_2$, что при избыточной дозировке может привести к падению pH ниже критического уровня (менее 10). Это создает угрозу разрушения пассивирующей пленки на стальной арматуре и инициации коррозионных процессов.



Таблица 1

Влияние микронаполнителей на свойства цементного камня

Показатель	МКР	ЗУ	МКЛ	ГДШ	ИМ
Ранняя прочность	→	↓↓	→	↓	↑↑
Поздняя прочность	↑↑	↑↑	↑↑↑	↑↑↑	→
Водопотребность	↑↑↑	↓	↑↑	↑	↓↓
Сульфатостойкость	↑	↑	↑	↑	↑↑
Тепловыделение	→	↓↓↓	→	↓↓	→

Обозначения: ↑, ↑↑, ↑↑↑ – умеренный, значительный, максимальный рост, ↓, ↓↓ – снижение, значительное снижение, → – без изменений

Установлено, что, к примеру, наблюдается рост хрупкости высокопрочных бетонов с добавками микрокремнезема и метаксаолина. В результате в таких бетонах наблюдается повышение модуля упругости сопровождающееся адекватным ростом вязкости разрушения. Возникновение таких деструктивных последствий необходимо учитывать при проектировании конструкций, подверженных динамическим нагрузкам [11-13].

Эти и другие процессы, возникающие при деформировании требуемой структуры материала с использованием микронаполнителей, должны учитываться при проектировании бетонов.

2.5 Перспективы: много-компонентные синергетические системы

Будущее технологии бетонов лежит в плоскости создания многокомпонентных вяжущих. Переход от бинарных систем (цемент + один наполнитель) к тройным и четвертичным позволяет нивелировать недостатки отдельных компонентов.

Например:

- Система «Цемент + Зола + Микрокремнезем». Микрокремнезем обеспечивает высокую раннюю прочность, а зола — долговечность, низкое тепловыделение и отличную реологию.

- Система «Цемент + Известняк + Метаксаолин» (ЛСЗ). Карбонат кальция и метаксаолин вступают в синергетическое взаимодействие, позволяя замещать до 50% клинкера при сохранении прочности обычного портландцемента. Это одно из самых перспективных направлений в практике для снижения углеродного следа.

3. Заключение

Анализ применения тонкодисперсных минеральных наполнителей показывает, что они являются незаменимым инструментом современного строительного материаловедения. Переход к использованию техногенных отходов решает триединую задачу:

- **Экологическую.** Утилизация отходов и снижение эмиссии CO₂.
- **Экономическую.** Снижение себестоимости за счет экономии клинкера.
- **Техническую.** Получение бетонов с качественно новыми характеристиками (сверхвысокая прочность, коррозионная стойкость).

Научная гипотеза о необходимости комплексного проектирования многокомпонентных систем требует расширения исследований, сосредоточенных на изучении влияния поверхностной активности наполнителей и создании адаптированных программных комплексов для подбора составов,

обеспечивающих максимальный синергетический эффект.

Использованная литература / References

- [1] Worrell, E., Price, L., Martin, N., Hendriks, C., & Meida, L. O. Carbon dioxide emissions from the global cement industry. *Annual Review of Energy and the Environment*, 2001, 26(1), 303–329.
- [2] Hendriks, C., et al. *Cement and Concrete Technology: CO₂ and Energy Reporting*. World Business Council for Sustainable Development, 2005.
- [3] Hasanbeigi, A., et al. *Opportunities to reduce the carbon footprint of the cement industry*. International Energy Agency, 2012.
- [4] Habert, G., et al. Carbon footprint of cement and concrete. In: *Eco-efficient Concrete*. Woodhead Publishing, 2011, pp. 24–47.
- [5] IEA & CSI. *Technology Roadmap: Low-Carbon Transition in the Cement Industry*. International Energy Agency and Cement Sustainability Initiative, 2018.
- [6] Aitcin, P.-C. *High-Performance Concrete*. E&FN Spon, 2000.
- [7] Antoni, M., Rossen, J., Martirena, F., & Scrivener, K. (2012). Cement substitution by a combination of metakaolin and limestone. *Cement and Concrete Research*, 42(12), 2012, 1579-1589.
<https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2012.09.006>
- [8] Mehta, P. K., & Monteiro, P. J. M. *Concrete: Microstructure, Properties, and Materials*. 4th ed. McGraw-Hill Education, 2014.
- [9] Adilkhodjaev A.I., Kadyrov I.A., Khasanov B., Radjabov M., Umarov I. Effect of binary microbrake based on "quartz+carbonate" additions on the properties of cement stone // AIP Conference Proceedings Publisher: American Institute of Physics Source type: Conference Proceedings. DOI: 10.1063/5.0267412
- [10] Adilkhodjaev A.I., Kadyrov I.A., Kudratov B., Xasanov B., Umarov I. On the structure of cement stone with fillers from metallurgical waste // XXVI International Scientific Conference "Construction the Formation of Living Environment" (FORM-2023). DOI: 10.1051/e3sconf/202341001020
- [11] Adilkhodzhaev A.I., Kadyrov I.A., Kudratov B., Xasanov B., Radjabov M. Some aspects of the processes of obtaining and application of mineral powders as fillers for cement systems // DOI: 10.1051/e3sconf/202341001021
- [12] Adilkhodzhaev A.I., Kadyrov I.A., Kudratov B., Azimov D., Abdullayev U. Effect of binary microfiller on structure formation of cement stone // DOI: 10.1063/5.0267410
- [13] Adilkhodjaev A.I., Kadyrov I.A., Rasulmukhamedov A. Research of porosity of a cement



stone with a zeolite containing filler and a superplastic
stificator // DOI: 10.1051/e3sconf/202126402007

Информация об авторах/ Information about the authors

Адилходжаев Адилходжаев
Анвар Ишанович / Anvar
Adilkhodjaev

Ташкентский
государственный
транспортный университет,
профессор кафедры
«Строительная инженерия:
строительство зданий и
сооружений», доктор
технических наук, профессор,
E-mail:
fdilkhodjaev_f@mail.ru
Tel.:+99871-2990006
<https://orcid.org/0000-0003-4552-0418>

Кадиров
Илхомжон
Абдуллаевич /
Ilkhom Kadirov

Ташкентский институт
инженеров ирригации и
механизации сельского
хозяйства НИУ, доцент
кафедры «Строительная
инженерия», DSc, профессор
E-mail:

ilhom.kadirov.1990@mail.ru
Tel.: +99897 3306119
<https://orcid.org/0000-0001-9425-4523>

Абдукадиров
Фарход
Эркинович /
Farkhod
Abdukadirov

Ташкентский
государственный
транспортный университет,
доцент кафедры «Прикладная
механика», PhD, доцент
E-mail:

farkhod.toshkent@gmail.com
Tel.:+99871 2990413
<https://orcid.org/0000-0003-2271-3768>



A. Abdullaev <i>Development of entrepreneurial activity in the construction industry</i>	205
M. Mamatkulov, A. Kungradbaeva <i>Road safety as a pressing issue: official statistics and analysis on deaths and injuries</i>	210
M. Mamatkulov <i>Developing a project for organizing environmental monitoring on urban roads through digitalization</i>	216
G. Ubaydullaev, R. Khakimzyanov <i>Selection of technological bases for transport vehicle parts during their manufacture</i>	221
A. Adilkhodjaev, I. Kadirov, F. Abdukadirov <i>Strategy for modifying cement systems with finely dispersed mineral fillers</i>	226