

ENGINEER



international scientific journal

SPECIAL ISSUE

E-ISSN

3030-3893

ISSN

3060-5172



SLIB.UZ
Scientific library of Uzbekistan



A bridge between science and innovation



**TOSHKENT DAVLAT
TRANSPORT UNIVERSITETI**

Tashkent state
transport university



ENGINEER

A bridge between science and innovation

E-ISSN: 3030-3893

ISSN: 3060-5172

SPECIAL ISSUE

27-june, 2026



engineer.tstu.uz

**TEXNIKA FANLARI DOKTORI, PROFESSOR
MIRAXMEDOV MAXAMADJON MIRAXMEDOVICH
TAVALLUDINING 80 YILLIGIGA BAG'ISHLANGAN
“SAMARALI QURILISH MATERIALLARI, KONSTRUKSIYALARI VA
TEKNOLOGIYALARI”
MAVZUSIDAGI XALQARO ILMYI-AMALIY KONFERENSIYASI
ILMIY ISHLARI TO'PLAMI**

Toshkent davlat transport universiteti RAASN akademigi, O'zbekistonda xizmat ko'rsatgan yoshlar murabbiyi, texnika fanlari doktori, professor Miraxmedov Maxamadjon Miraxmedovich tavalludining 80 yilligiga bag'ishlangan, ilmiy ishlar to'plami nashr etilishi ko'zda tutilgan «Samarali qurilish materiallari, konstruksiyalari va texnologiyalari» mavzusidagi Xalqaro ilmiy-amaliy konferensiyani o'tkazishni rejalashtirmoqda.

M.M. Miraxmedov kompozitsion qurilish materiallarining polistruktura nazariyasini rivojlantirishga salmoqli hissa qo'shgan. Uning qurilish materialshunosligi sohasidagi ilmiy hissi e'tirofi sifatida 1995-yilda Rossiya arxitektura va qurilish fanlari akademiyasining (RAASN) xorijiy a'zosi etib saylangan. M.M. Miraxmedov 6 ta monografiya, 200 dan ortiq ilmiy maqolalar va 25 ta ixtiroga mualliflik guvohnomalari muallifidir.

Ushbu konferensiyaning asosiy maqsadi - qurilish materialshunosligi, bino va inshootlarni loyihalash va qurilish sohasidagi ilmiy tadqiqotlar natijalarini, shuningdek, muhandislik ta'limini takomillashtirish yo'llarini muhokama qilishdan iborat.





Konferensiya ishida ishtirok etish uchun oliy o'quv yurtlari va ilmiy tadqiqot institutlari olimlari, O'zbekiston Respublikasi va xorijiy davlatlarning ishlab chiqarish vakillari, ilmiy tadqiqotlarda salmoqli natijalarga ega bo'lgan mutaxassislar taklif etiladi.

“Samarali qurilish materiallari, konstruksiyalari va texnologiyalari” mavzusidagi xalqaro ilmiy-amaliy konferensiyaning asosiy yo'nalishlari quyidagilardan iborat:

1. Resurs va energiya tejovchi qurilish materiallari va texnologiyalari.
2. Atrof-muhitning transport infratuzilmasiga ta'siri va uni himoya qilish usullari.
3. Bino va inshootlarning qurilish konstruksiyalari: hisoblash va loyihalashning zamonaviy usullari.
4. Arxitektura, shaharsozlik va shahar muhitini rivojlantirish.
5. Qurilishni tashkil etishning innovatsion usullari va qurilish jarayonlari texnologiyalari.
6. Transport obyektlarini loyihalash va qurishda raqamli texnologiyalar hamda sun'iy intellekt.
7. Temir yo'l transporti infratuzilmasi obyektlarini loyihalash, qurish va ekspluatatsiya qilish.
8. Zamonaviy muhandislik ta'limi tizimini takomillashtirish.

Mazkur konferensiya ilmiy hamjamiyatning turli vakillarini bir joyga jamlab, qurilish materialshunosligi sohasidagi zamonaviy muammolar va istiqbollarni muhokama qilish uchun qulay platforma vazifasini bajardi.

On the Mechanism of the Influence of Various Micro-Fillers and Chemical Additives on the Microstructure and Strength of Cement Paste

A.I. Adilkhodzjayev¹^a, I.A. Kadirov²^b, F.E. Abdukadirov¹^c, E.V. Kakharov²^d

¹Tashkent State Transport University, Tashkent, Uzbekistan

²National Research University "TIAME", Tashkent, Uzbekistan

Abstract The paper examines the mechanism of the influence of complex micro-fillers and chemical additives on the microstructure formation and physical-mechanical properties of cement paste. The hydration and structure formation processes in binary cement composites with the introduction of active mineral admixtures and superplasticizers are analyzed. It is experimentally confirmed that the use of an optimized composition of micro-fillers contributes to a significant compaction of the cement matrix structure, a decrease in total porosity from 14.5% to 9.2%, and an increase in compressive strength by 33–34%. The research results demonstrate the effectiveness of using these composites in the production of resource-saving high-strength concretes adapted to the regional climatic conditions.

Keywords: Cement Paste, Micro-fillers, Microstructure, Strength, Porosity, Hydration, Modified Concrete

О Механизме Влияния Различных Микронаполнителей и Химических Добавок на Микроструктуру и Прочность Цементного Камня

А.И. Адилходжаев¹^a, И.А. Кадилов²^b, Ф.Э. Абдукадилов¹^c,
Кахаров Э.В.²^d

¹Ташкентский государственный транспортный университет, Узбекистан

²Национальный исследовательский университет «ТИИИМСХ», Узбекистан

Аннотация. В статье рассматриваются вопросы влияния комплексных микронаполнителей на формирование микроструктуры и физико-механические показатели цементного камня. Проанализированы процессы гидратации и структурообразования в бинарных цементных композитах при введении активных минеральных добавок и суперпластификаторов. Экспериментально подтверждено, что использование оптимизированного состава микронаполнителей способствует значительному уплотнению структуры цементной матрицы, снижению общей пористости с 14,5 % до 9,2 % и повышению прочности на сжатие на 33–34 %. Результаты исследований демонстрируют эффективность применения данных композитов в производстве ресурсосберегающих высокопрочных бетонов, адаптированных к климатическим условиям регионов.

Ключевые слова: Цементный камень, микронаполнители, микроструктура, прочность, пористость, гидратация, модифицированный бетон


1. ВВЕДЕНИЕ

Современный этап развития строительной индустрии характеризуется ростом требований к эксплуатационным характеристикам конструкционных материалов. Одним из ключевых факторов в данном контексте является создание высокопрочных и долговечных цементных систем, способных выдерживать значительные статические и динамические нагрузки в различных климатических условиях.


Традиционные подходы к повышению прочности бетона за счет простого увеличения расхода цемента на сегодняшний день признаны экономически неэффективными и экологически неоправданными.

К настоящему времени предложены и успешно внедряется ряд эффективных методов, позволяющих проектировать цементные композиты, обладающие комплексом наперед заданных свойств одним из которых являются

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

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

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

^d <https://orcid.org/0009-0002-6680-2105>



многокомпонентные модифицированные системы.

Важнейшую роль в формировании структуры и свойств таких систем играют микронаполнители, такие как карбонат кальция, минеральные порошки и активные минеральные добавки. Их введение в состав цементных композиций позволяет управлять процессом структурообразования на микроуровне. Микронаполнители выполняют функцию центров кристаллизации продуктов гидратации, способствуя более равномерному распределению новообразований и заполняют микропоры в цементной матрице. Это приводит к значительному уплотнению структуры цементного камня и улучшению его физико-механических показателей.

В рамках реализации долгосрочных планов по разработке ресурсосберегающих технологий цементных бетонов, особую актуальность приобретают вопросы изучения совместного влияния различных типов микронаполнителей и химических добавок-модификаторов [1-3].

Исследования П. Кумара Мехты (P.K. Mehta) и П. Монтейро (P. Monteiro) заложили фундамент понимания механизмов формирования микроструктуры бетона и роли ультрадисперсных добавок в повышении его долговечности [4]. В работах К. Скривенера (K. Scrivener) и Б. Лотенбаха (B. Lothenbach) подробно изучены процессы гидратации многокомпонентных вяжущих и влияние микронаполнителей на формирование кристаллического каркаса [5]. Также значительный вклад в развитие высокотехнологичных бетонов внес П.К. Эйтин (P.C. Aitcin), обосновавший эффективность комплексного применения суперпластификаторов и микрокремнезема [6-8].

Несмотря на значительное количество исследований, вопросы совместного влияния микрокремнезема и известняковой муки на процессы структурообразования цементного камня в условиях сухого жаркого климата остаются недостаточно изученными. Особенно актуальным является исследование механизмов уплотнения цементной матрицы при низком водоцементном отношении.

В данной работе представлены результаты исследований по созданию высокопрочного цементного камня. Предлагается использование синергетического эффекта взаимодействия суперпластификаторов нового поколения и

бинарных микронаполнителей, что позволяет достичь высокой плотности упаковки частиц на микроуровне и обеспечить требуемую долговечность конструкций.

Целью данного исследования является изучение влияния микронаполнителей на формирование микроструктуры, плотности и прочностных характеристик цементного камня, а также обоснование эффективности их применения в производстве строительных материалов нового поколения.

Научная новизна исследования заключается в установлении механизма совместного влияния бинарных микронаполнителей и суперпластификаторов на процессы уплотнения цементной матрицы и формирования плотной микроструктуры цементного камня.

2. МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для реализации экспериментальных исследований были выбраны материалы, широко применяемые в строительной индустрии Республики Узбекистан, что обеспечивает практическую значимость полученных результатов.

Цемент: В качестве основного вяжущего использовался портландцемент марки ПЦ 400-Д20 производства АО «Бекабадцемент» (соответствующий ГОСТ 10178). Химический состав цемента характеризуется содержанием основных оксидов: CaO (62-65%), SiO₂ (20-22%), Al₂O₃ (4-6%) и Fe₂O₃ (2-4%). Удельная поверхность цемента составляла 3000-3200 см²/г.

Микронаполнители:

- **Микрокремнезем:** ультрадисперсный материал с содержанием аморфного SiO₂ не менее 90%, обладающий высокой пуццолановой активностью.

- **Известняковая мука (микрокальцит):** тонкомолотый карбонат кальция, используемый для уплотнения структуры и ускорения процессов кристаллизации гидратных фаз.

- **Минеральные порошки:** полученные путем тонкого измельчения местных горных пород до удельной поверхности 4500-5000 см²/г.

Основные физико-химические характеристики и минералогический состав исходных материалов представлены в табл. 1.

Таблица 1

Физико-химические характеристики исходных материалов

Материал	Удельная поверхность, см ² /г	Плотность, г/см ³	Основной компонент
Портландцемент ПЦ 400	3100	3,12	CaO, SiO ₂
Микрокремнезем	18500	2,20	SiO ₂ (аморфный)
Известняковая мука	4200	2,65	CaCO ₃



Для изучения влияния данных материалов на свойства цементного камня были подготовлены серии образцов с различным процентным содержанием микронаполнителей. В ходе эксперимента варьировалось содержание микрокремнезема в пределах 5–10%, и известняковой муки 10–20% от массы цемента.

Процесс приготовления смесей включал предварительное сухое перемешивание цемента с микронаполнителями в течение 3 минут для достижения гомогенности состава. Затем вводилась вода затворения с предварительно растворенным в ней суперпластификатором на поликарбоксилатной основе. Перемешивание продолжалось до получения однородной массы с заданной подвижностью. Водоцементное отношение исследуемых составов составляло 0,32–0,35.

Из приготовленной смеси формовались образцы-кубы размером 70,7x70,7x70,7 мм. Уплотнение проводилось на стандартной виброплощадке в течение 30–60 секунд. Образцы выдерживались в формах в течение 24 часов, после чего подвергались распалубке и помещались в камеру нормального твердения с температурой $20 \pm 2^\circ\text{C}$ и относительной влажностью воздуха не менее 95%.

Химические добавки (Суперпластификаторы): Для обеспечения требуемой подвижности бетонной смеси при низком водоцементном отношении (В/Ц) применялись суперпластификаторы на поликарбоксилатной основе Glenium ACE 430.

Особое внимание уделялось изучению адсорбционного взаимодействия суперпластификатора с поверхностью микронаполнителей. Установлено, что дозирование добавки в пределах 0,8–1,2% от массы вяжущего позволяет эффективно распределять ультрадисперсные частицы в объеме цементного теста, предотвращая их флокуляцию (слипание).

Методика эксперимента: Изготовление образцов-кубов размером 70,7x70,7x70,7 мм проводилось в соответствии с действующими стандартами. Для каждого экспериментального состава изготавливалось не менее трех образцов. Испытания на прочность при сжатии выполнялись в возрасте 3, 7, 28 суток, а также в рамках долгосрочного мониторинга до 24 месяцев. Изучение микроструктуры цементного камня проводилось с использованием методов электронной микроскопии и рентгенофазового анализа. Исследования проводились с использованием сканирующего электронного микроскопа Tescan Vega 3 при увеличении $\times 2000$.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

В ходе проведенных экспериментальных исследований были получены данные о влиянии комплексных микронаполнителей на прочностные характеристики цементного камня в различные сроки твердения. Основные результаты испытаний на сжатие для контрольных и модифицированных составов приведены в табл. 2. Прогнозные значения прочности, полученные методом экстраполяции.

Таблица 2

Показатели прочности на сжатие (МПа)

Срок твердения	Контрольный состав (ПЦ 400)	Модифицированный состав (Ц + МК + СП)	Прирост прочности (%)
3 суток	18,5	23,2	+25%
7 суток	28,4	36,5	+28%
28 суток	42,5	56,8	+33%
6 месяцев (прогноз)	48,2	64,5	+34%

Погрешность экспериментальных измерений не превышала 5 %, что подтверждает достоверность полученных результатов.

Для наглядного представления интенсивности набора прочности и сравнительного анализа динамики твердения бинарных систем была построена гистограмма (рис. 1)

Анализ прочностных характеристик. Экспериментальные исследования прочности на сжатие проводились в сроки от 3 суток до 24 месяцев, что позволило оценить как раннюю прочность, так и долговечность бинарных систем. Установлено, что образцы с комплексными микронаполнителями (микрокремнезем +

известняковая мука) показывают стабильный рост прочности на всех этапах.

- В ранние сроки (3–7 суток) прочность модифицированных составов выше контрольных на 15–20%, что объясняется ускорением гидратации минералов цемента на поверхности микронаполнителей.

- К 28 суткам прирост прочности достигает 30–35% при оптимальной дозировке суперпластификатора.

- Прогнозные показатели согласно 24-месячному плану исследований указывают на сохранение положительной динамики без признаков деструкции, что подтверждает высокую стабильность структуры.



Помимо прочностных показателей, введение комплексных добавок существенно влияет на физические характеристики материала.

Сравнительные данные по плотности, водопоглощению и пористости приведены в табл. 3.

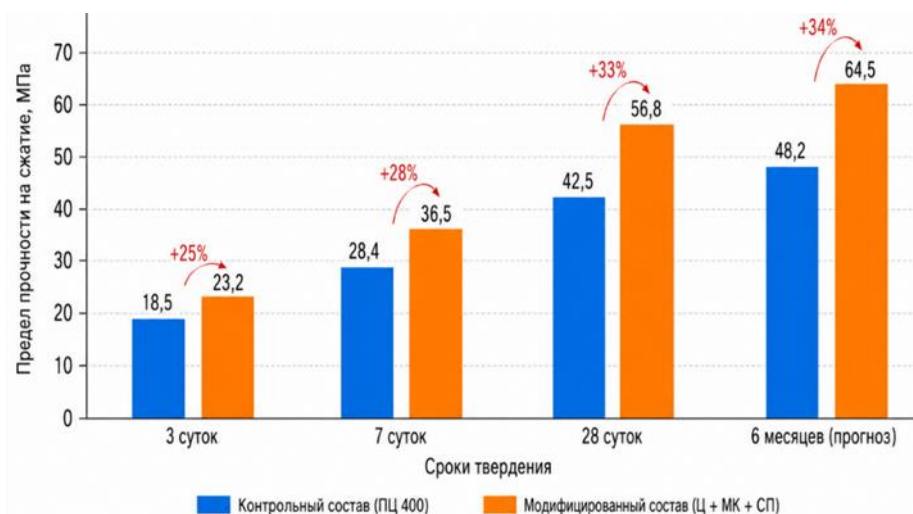


Рис. 1. Влияние комплексного модифицирования на динамику набора прочности цементного камня

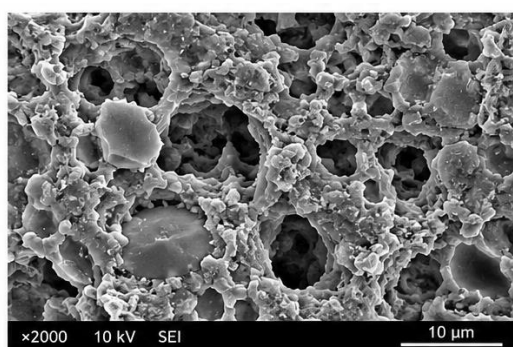
Таблица 3

Влияние комплексных микронаполнителей на физические свойства цементного камня

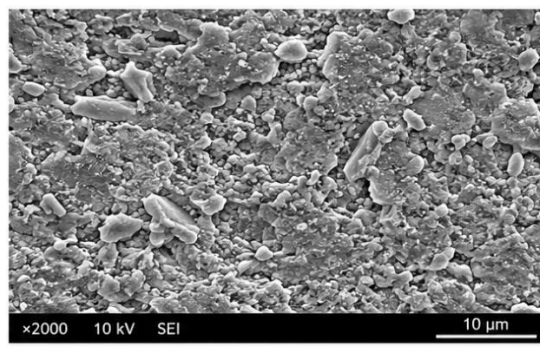
Состав	Плотность, кг/м ³	Водопоглощение, %	Пористость, %
Контрольный	2150	5,8	14,5
С микронаполнителями	2310	3,1	9,2

Особый интерес представляет изучение влияния микронаполнителей на микроструктуру цементного камня. Методом сканирующей электронной микроскопии было установлено, что введение ультрадисперсных добавок

способствует значительному уплотнению матрицы. На рис. 2 представлены микрофотографии скола образцов, подтверждающие заполнение капиллярных пор продуктами гидратации и частицами микронаполнителей.



Контрольный образец



Модифицированный образец

Рис. 2. СЭМ-микрофотографии структуры цементного камня при увеличении $\times 2000$ (масштаб 10 μm)

На основании результатов СЭМ-анализа была предложена теоретическая модель уплотнения цементной матрицы. Теоретическая модель формирования структуры (рис.3) наглядно демонстрирует механизм взаимодействия

микронаполнителей с цементными зернами, где ультрадисперсные частицы эффективно заполняют межзерновое пространство, создавая плотный кристаллический каркас.



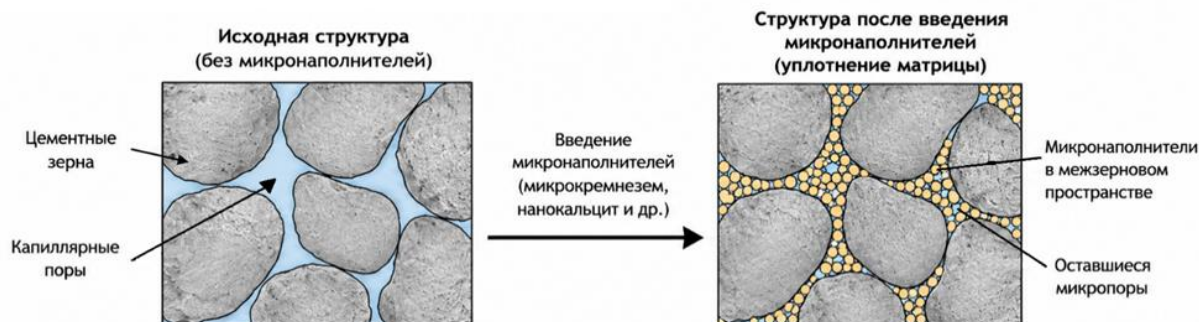


Рис. 3. Структурная схема уплотнения цементной матрицы при введении микрополннителей

Изучение микроструктуры цементного камня методом сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) выявило качественные изменения в строении матрицы. В контрольных образцах наблюдается наличие капиллярных пор и фрагментарное расположение кристаллов гидросиликата кальция. Установлено, что введение микрополннителей способствует более интенсивному образованию низкоосновных гидросиликатов кальция (C-S-H), обеспечивающих повышение плотности цементной матрицы:

- в модифицированных составах микрополннители эффективно выполняют роль «микрофиллера», плотно заполняя пространство между зернами цемента;
- микроструктура характеризуется высокой плотностью и минимальным количеством макропор;
- продукты гидратации располагаются более компактно, формируется более плотная пространственная структура гидросиликатов кальция (C-S-H).

Плотность и водопоглощение. Эффективность заполнения пор в цементной матрице напрямую отразилась на физических свойствах камня.

- Плотность: введение комплексных микрополннителей позволило повысить среднюю плотность образцов на 5-8% (с 2150 до 2310 кг/м³).
- Водопоглощение: благодаря перекрытию капиллярных каналов ультрадисперсными частицами, показатель водопоглощения снизился с 5,8% до 3,1%.

Исследованиями показано, что комплексное использование микрокремнезема и известняковой муки не только упрочняет материал, но и значительно повышает его сопротивляемость агрессивным воздействиям внешней среды, что особенно важно для транспортных сооружений (например, эстакад метро).

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании проведенных теоретических и экспериментальных исследований влияния комплексных микрополннителей на свойства цементных систем сформированы следующие выводы:

1. Повышение прочностных характеристик: Установлено, что применение комплексных микрополннителей и суперпластификаторов обеспечивает повышение прочности цементного камня на 33–34 % по сравнению с контрольными составами.

2. Эффективность структурообразования: Методами микроструктурного анализа подтверждено, что микрополннители эффективно выполняют роль «микрофиллера», плотно заполняя межзерновое пространство цементной матрицы. Это приводит к снижению общей пористости с 14,5% до 9,2% и существенному уплотнению структуры, что напрямую коррелирует с ростом прочности и долговечности материала.

3. Ресурсосбережение и экономическая эффективность: Применение разработанных составов является высокоэффективным с точки зрения ресурсосбережения. Использование местных минеральных добавок и отходов производства позволяет снизить удельный расход дорогостоящего клинкерного цемента без потери качественных характеристик бетона. Данный подход способствует снижению себестоимости строительных конструкций и уменьшению экологической нагрузки при производстве строительных материалов.

4. Практическая значимость: Полученные результаты рекомендуются для внедрения при производстве высокопрочных бетонов для транспортного строительства, в частности для элементов эстакад метрополитена и мостовых конструкций, эксплуатируемых в условиях сухого и жаркого климата.

Таким образом, применение комплексных микрополннителей является перспективным направлением разработки высокоэффективных и



долговечных цементных композитов нового поколения.

ИСПОЛЬЗОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

[1] Адилходжаев А. И., Кадилов И. А., Абдукадилов Ф. Э. Стратегия модификации цементных систем тонкодисперсными минеральными наполнителями. Journal of Transport, ISSN: 2181-2438, Vol. 1, No. 1, 2026. P. 226–229

[2] 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).

[3] Адилходжаев А.И., Абдусаттаров А., Ниязбеков С.С., Абдукадилов Ф.Э., Кадилов И.А., Совершенствование методов расчёта тонкостенных конструкций из бетона. Монография, Lambert, ISBN 978-620-9-58598-2, 2026, 159 с

[4] Mehta P.K., Monteiro P.J.M. Concrete: Microstructure, Properties, and Materials. 4th ed. New York: McGraw-Hill Education; 2014.

[5] Scrivener K. L., Lothenbach B. Cementitious Materials: Composition, Properties and Applications. – CRC Press, 2022.

[6] Aitcin P.C. High Performance Concrete. London: CRC Press; 1998.

[7] Neville A.M. Properties of Concrete. 5th ed. London: Pearson Education; 2011.

[8] Taylor H.F.W. Cement Chemistry. 2nd ed. London: Thomas Telford; 1997.

ИНФОРМАЦИЯ INFORMATION ABOUT AUTHORS

А.И.Адилходжаев Ташкентский государственный транспортный университет, Узбекистан
anvar.adilkhodjaev@tstu.uz

И.А.Кадилов Национальный исследовательский университет «ТИИИМСХ», Узбекистан
kadirov.i@tiiame.uz

Ф.Э.Абдукадилов Ташкентский государственный транспортный университет, Узбекистан
farkhod.abduqodirov@tstu.uz

Кахаров Э.В Tashkent State Transport University, Tashkent, Uzbekistan
kaharoverkin8@gmail.com



A. Ilyasov, A. Allamuratov <i>Optimization of Foam Concrete with Fly Ash and Silica Fume for Energy-Efficient Wall Blocks.....</i>	7
A. Adilkhodjaev, T. Amirov <i>The Effect of Heavy-Duty Pavement Concrete Mix Composition on its Physico-Mechanical Properties.....</i>	10
A. Adilkhodjaev, I. Kadirov, F. Abdukadirov, E. Kakharov <i>On the Mechanism of the Influence of Various Micro-Fillers and Chemical Additives on the Microstructure and Strength of Cement Paste.....</i>	15
A. Ismaylova <i>Design-Based Assessment of Hybrid Thermal-Insulating Dry Plaster Mortars for Aerated Concrete Walls in Aral Sea REGION Conditions.....</i>	21
I. Sadikov, G. Isakova, R. Kadirbergenov <i>Visual Determination of Adhesion of Bitum Modified with Defecate with Marble Stone.....</i>	25
Z. Sattorov, N. Madraymov <i>Prospects for Using Foam Concrete That Complies with The Principles of “Green Building”.....</i>	29
Z. Sattorov, O. Otajonov <i>Research Analysis on Partial Replacement of Cement in Concrete with Fly Ash and Wollastonite.....</i>	34
J. Turgaev, N. Takhirjanov <i>Complex Modification of Cement Matrix and Bloated Vermiculite Surface to Increase the Strength of Heat-Isolating Constructional Blocks.....</i>	38
U. Turgunbaev, Y. Murodillaev, D. Sharipova <i>Study of the Effect of Hydrophobic Modifiers on the Properties of Cement Mixtures.....</i>	46
V. Soy, G. Nuriddinova, J. Turgaev, A. Jumageldiev <i>Modification of the Cementitious System As A Method For Densifying the Inter-Pore Walls of Fiber-Reinforced Foam Concrete.....</i>	50
A. Adylkhodjaev, A. Babajanov <i>Physicochemical Fundamentals and Technological Efficiency of Non-Steam Production of Dispersed Reinforced Composites.....</i>	55

