

JOURNAL OF TRANSPORT



ISSUE 3, 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 3

SEPTEMBER, 2026



jot.tstu.uz

TASHKENT STATE TRANSPORT UNIVERSITY

JOURNAL OF TRANSPORT

SCIENTIFIC-TECHNICAL AND SCIENTIFIC INNOVATION JOURNAL

VOLUME 3, ISSUE 3 SEPTEMBER, 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.

Effect of a binary micro-filler and polyfunctional admixture on the structure formation and properties of cement binders

A.I. Adylkhodjaev¹^a, I.A. Kadyrov²^b, F.E. Abdukadyrov¹^c, S.S. Niyazbekov³,
A.F. Babajanov¹^d, A.Kh. Kamalov⁴

¹Tashkent state transport university, Tashkent, Uzbekistan

²National Research University “Tashkent Institute of Irrigation and Agricultural Mechanization Engineers”

³Uzbek-Japan Innovation Center of Youth, Tashkent, Uzbekistan

⁴Ko'priksifatnazorat LLC, Tashkent, Uzbekistan

Abstract: This study investigates the structure formation and properties of a cement binder modified with a binary micro-filler (silica fume and ground marble) and a polyfunctional admixture, K1W. Using the design of experiments and response surface methodology, the mixture composition was optimized. The optimal combination of 10% silica fume, 15% marble powder, and 0.9% K1W significantly reduces water demand and maximizes the compressive strength of the hardened cement paste, achieving 74.0 MPa at 28 days and 90.2 MPa at 90 days. X-ray diffraction (XRD) analysis confirms that this complex modification intensifies the formation of calcium silicate hydrates (C-S-H) while reducing free portlandite content. The findings substantiate the efficiency of the developed binder for resource-saving and sustainable construction technologies.

Keywords: Cement binder, binary micro-filler, silica fume, ground marble powder, polyfunctional admixture (K1W), hardened cement paste, structure e formation, compressive strength, mathematical modeling, green construction, resource efficiency

Влияние бинарного микронаполнителя и полифункциональной добавки на формирование структуры и свойств цементного вяжущего

Адилходжаев А.И.¹^a, Кадиров И.А.²^b, Абдукадиров Ф.Э.¹^c, Ниязбеков С.С.³,
Бабажанов А.Ф.¹^d, Камалов А.Х.⁴

¹Ташкентский государственный транспортный университет, Ташкент, Узбекистан

²Национальный исследовательский университет «Ташкентский институт инженеров ирригации и механизации сельского хозяйства», Ташкент, Узбекистан

³Узбекско-Японский молодежный центр инноваций, Ташкент, Узбекистан

⁴ООО «Ko'priksifatnazorat», Ташкент, Узбекистан

Аннотация: В статье исследовано формирование структуры и свойств цементного вяжущего, модифицированного бинарным микронаполнителем (микрокремнезем и тонкомолотый мрамор) и полифункциональной добавкой K1W. С применением методов математического планирования и поверхностей отклика оптимизирован состав системы. Установлено, что введение 10 % микрокремнезема, 15 % мраморного наполнителя и 0,9 % добавки K1W обеспечивает снижение водопотребности и максимальный прирост прочности цементного камня (до 74,0 МПа в 28 суток и 90,2 МПа в 90 суток). По данным рентгенофазового анализа, комплексное модифицирование интенсифицирует образование гидросиликатов кальция и снижает содержание свободного портландита. Результаты подтверждают эффективность разработанного вяжущего для применения в ресурсосберегающих технологиях экологичного строительства.

Ключевые слова: Цементное вяжущее, бинарный микронаполнитель, микрокремнезем, мраморный микронаполнитель, полифункциональная добавка, K1W, цементный камень, структурообразование, прочность, математическое моделирование, зелёное строительство, ресурсосбережение

^a <https://orcid.org/0000-0001-5729-5178>

^b <https://orcid.org/0000-0003-3924-0864>

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

^d <https://orcid.org/0009-0002-7990-0206>



1. Введение

Современное развитие строительной отрасли связано с необходимостью перехода к ресурсосберегающим и экологически ориентированным технологиям, обеспечивающим снижение материалоемкости и энергетических затрат при сохранении требуемого уровня эксплуатационных характеристик строительных материалов. В рамках концепции зелёного строительства особое значение приобретает разработка эффективных вяжущих систем с использованием минеральных компонентов местного происхождения, позволяющих рационально использовать природные ресурсы и одновременно повышать качество цементных материалов.

Одним из перспективных направлений является модифицирование цементных вяжущих высокодисперсными минеральными компонентами и химическими добавками. Применение микронаполнителей позволяет целенаправленно регулировать гранулометрическую упаковку, процессы гидратации и формирование поровой структуры цементного камня. Использование тонкодисперсных минеральных материалов также создаёт возможность частичного замещения цементной составляющей и более рационального использования сырьевых ресурсов.

Особый интерес представляет применение бинарных микронаполнителей, сочетающих компоненты с различным механизмом воздействия на цементную систему. Совместное использование микрокремнезёма и тонкодисперсного мраморного микронаполнителя позволяет одновременно реализовать пуццолановый, микронаполняющий и структурообразующий эффекты. При этом эффективность минерального модифицирования может быть дополнительно повышена за счёт применения полифункциональных химических добавок, регулирующих водопотребность и процессы структурообразования цементного теста.

С научной и практической точки зрения важным является установление закономерностей совместного действия минеральных и химических модификаторов, поскольку именно их взаимодействие определяет формирование структуры цементного камня и его последующие физико-механические свойства. Рациональное сочетание компонентов позволяет получать более плотную структуру, снижать водопотребность и повышать эффективность использования цементного вяжущего, что соответствует основным принципам ресурсосберегающего и экологически ориентированного строительства.

Целью исследования является установление влияния бинарного микронаполнителя и полифункциональной добавки на формирование структуры, технологические и физико-механические свойства цементного вяжущего и определение их рационального сочетания.

Научная новизна заключается в установлении закономерностей совместного действия бинарного микронаполнителя на основе микрокремнезёма и мраморного микронаполнителя и полифункциональной добавки K1W на формирование структуры и свойств цементного вяжущего, а также в обосновании их рационального сочетания для снижения

водопотребности и формирования плотной структуры цементного камня.

2. Методика исследования

2.1. Применяемые материалы

В качестве основного вяжущего материала использовали портландцемент СЕМ I 42.5N. Его химический состав характеризовался содержанием SiO_2 – 21,08 %, Al_2O_3 – 5,12 %, Fe_2O_3 – 4,74 %, CaO – 63,7 %, MgO – 2,63 % и SO_3 – 0,43 %. Минералогический состав цемента включал C_3S – 54,8 %, C_2S – 18,2 %, C_3A – 5,8 % и C_4AF – 14,4 %. Нормальная плотность цемента составляла 29 %, начало и конец схватывания – 168 и 311 мин соответственно, удельная поверхность – $3681 \text{ см}^2/\text{г}$, плотность – $3,18 \text{ г}/\text{см}^3$, а прочность при сжатии в возрасте 28 суток – 44 МПа.

В качестве минерального модификатора применяли бинарный микронаполнитель, состоящий из микрокремнезёма и тонкомолотого мраморного наполнителя. Мрамор получен из месторождения Газган Навоийской области и характеризуется стабильным химическим составом и однородной структурой. Основными компонентами мрамора являются CaO и CO_2 , содержание которых составляет соответственно 53–55 и 42–43 %.

Микрокремнезём представлял собой высокодисперсный порошок, основу материала составляют сферические частицы диоксида кремния; содержание SiO_2 составляет 85–90 %.

На первом этапе содержание микрокремнезёма и мраморного микронаполнителя изменяли в диапазоне 0–20 % от массы цемента. Для установления рационального сочетания компонентов был реализован полный двухфакторный эксперимент, включавший 25 составов. Удельная поверхность микрокремнезёма изменялась от 12000 до $20000 \text{ см}^2/\text{г}$, мраморного наполнителя — от 2000 до $4000 \text{ см}^2/\text{г}$.

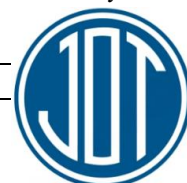
В качестве химического модификатора применяли полифункциональную добавку K1W, обладающую водоредуцирующим действием и способностью влиять на кинетику твердения цементной системы. Для исследования влияния добавки её содержание изменяли от 0,3 до 1,5 % от массы вяжущего.

2.2. Методы исследования

Исследование проводилось в несколько последовательных этапов. На первом этапе определяли влияние компонентов бинарного микронаполнителя на основные технологические и прочностные характеристики цементной системы. Нормальную плотность и водопотребность цементного теста определяли с использованием прибора Вика по глубине погружения пестика. Начало и конец схватывания также определяли с использованием прибора Вика в соответствии с требованиями действующих нормативных документов.

Для оценки влияния полифункциональной добавки определяли нормальную плотность и сроки схватывания цементного теста без минерального модификатора и в присутствии оптимального бинарного микронаполнителя. Данный комплекс показателей использовали для оценки изменения водопотребности и характера начальных процессов гидратации.

Для исследования процессов раннего структурообразования определяли кинетику



пластической прочности цементного теста. Данный показатель использовали для оценки продолжительности индукционного периода, скорости формирования межчастичных контактов и перехода цементной системы от пластического состояния к пространственно связанной структуре. Исследования проводили для контрольного, бинарно-модифицированного, K1W-модифицированного и комплексно-модифицированного составов.

Для оценки развития механических свойств определяли прочность при сжатии цементного камня в возрасте 2, 7, 28 и 90 суток. Образцы формовали в металлических формах размером 20×20×20 мм и испытывали на гидравлическом прессе при постоянной скорости нагружения. Твердение осуществляли в нормальных влажностно-температурных условиях при температуре (20±2) °C и относительной влажности воздуха не менее 95 %.

Для исследования кинетики набора прочности комплексно-модифицированного цементного камня испытания проводили в возрасте 1, 3, 7, 14, 28 и 90 суток, что позволило сопоставить развитие прочности на ранних и поздних стадиях твердения.

2.3. Математическое моделирование

Для установления количественных закономерностей влияния компонентов бинарного микронаполнителя на свойства цементного вяжущего применяли математическое планирование эксперимента и регрессионный анализ. В качестве основных факторов рассматривали содержание микрокремнезема и тонкомолотого мраморного микронаполнителя, а в качестве выходных параметров – нормальную плотность цементного теста и прочность цементного камня.

Для математического описания экспериментальных зависимостей использовали полиномиальную модель второго порядка, учитывающую линейное, квадратичное и совместное влияние исследуемых факторов:

$$Y = b_0 + \sum b_i x_i + \sum b_{ii} x_i^2 + \sum b_{ij} x_i x_j, \quad (1)$$

• где Y — прогнозируемое значение функции отклика (прочность при сжатии R_n и нормальная плотность цементного теста);

- b_0 — свободный член уравнения;
- b_i , b_{ii} , b_{ij} — коэффициенты линейных, квадратичных и парных взаимодействий факторов;
- x_i — кодированные значения независимых переменных.

Для оценки влияния полифункциональной добавки K1W дополнительно исследовали зависимость нормальной плотности, сроков схватывания и прочности цементного камня от ее дозировки. Полученные зависимости использовали для определения рационального содержания химической добавки в комплексно-модифицированном цементном вяжущем.

На основании полученных регрессионных уравнений строили поверхности отклика и линии равного уровня, характеризующие изменение исследуемых свойств в зависимости от содержания компонентов бинарного микронаполнителя. Это позволило определить область рациональных составов и установить характер совместного влияния микрокремнезема и мраморного микронаполнителя.

Адекватность математических моделей оценивали путем сопоставления расчетных и экспериментальных значений, а также по коэффициенту детерминации R^2 и

величине остаточных отклонений. Рациональный состав определяли на основе комплексного анализа математических моделей и экспериментальных результатов с учетом минимизации водопотребности и обеспечения требуемого уровня прочности цементного камня.

Применение математического моделирования позволило количественно оценить влияние отдельных компонентов и их взаимодействия, определить область рационального содержания бинарного микронаполнителя и полифункциональной добавки K1W, а также подтвердить экспериментально установленный оптимальный состав комплексно-модифицированного цементного вяжущего.

3. Результаты и обсуждение

3.1. Влияние бинарного микронаполнителя на свойства цементного вяжущего

На первом этапе исследования изучалось влияние содержания и дисперсности компонентов бинарного микронаполнителя — микрокремнезема и тонкомолотого мраморного микронаполнителя — на технологические и физико-механические свойства цементного вяжущего. Экспериментальные исследования проводились на 25 составах с различным содержанием и удельной поверхностью компонентов. Основные результаты исследований представлены в таблице 1.

Для контрольного состава нормальная плотность цементного теста составляла 26 %. Введение мраморного микронаполнителя в количестве 15–20 % способствовало снижению нормальной плотности до 25 %. Данный эффект связан с улучшением гранулометрической упаковки твердых частиц и заполнением межзернового пространства более мелкими частицами мраморного наполнителя.

Введение микрокремнезема, напротив, сопровождалось увеличением водопотребности цементного теста. При содержании микрокремнезема 15–20 % нормальная плотность увеличивалась до 28–29 %. Это связано с высокой дисперсностью микрокремнезема и значительным увеличением удельной поверхности твердой фазы, требующей дополнительного количества воды для формирования пластичной цементной системы.

Изменение сроков схватывания также зависело от природы и содержания микронаполнителей. При увеличении содержания мраморного микронаполнителя до 20 % начало схватывания сокращалось с 140 до 120 мин, а конец схватывания — с 210 до 185 мин. Для микрокремнезема характер изменения был более сложным. При его содержании 5–10% наблюдалось ускорение структурообразования, тогда как дальнейшее увеличение содержания до 15–20 % приводило к некоторому замедлению процессов вследствие повышения водопотребности.



Таблица 1

Влияние бинарного микронаполнителя на свойства цементного вяжущего

Состав	МК, %	Дисп. МК, см ² /г	Мрамор, %	Дисп. мрамор, см ² /г	НГ, %	Начало, мин	Конец, мин	R ₂ , МПа	R ₇ , МПа	R ₂₈ , МПа	R ₉₀ , МПа
МК0_МА0	0	—	0	—	26	140	210	30,16	45,24	58,00	70,76
МК0_МА5	0	—	5	2563	26	135	200	30,81	46,22	59,25	72,28
МК0_МА10	0	—	10	2850	26	130	200	31,46	47,19	60,50	73,81
МК0_МА15	0	—	15	3220	25	125	190	32,11	48,16	61,75	75,33
МК0_МА20	0	—	20	3520	25	120	185	32,76	49,14	63,00	76,86
МК5_МА0	5	14500	0	—	27	150	220	32,50	48,75	62,50	76,25
МК5_МА5	5	14800	5	3050	27	145	215	33,15	49,73	63,75	77,77
МК5_МА10	5	15100	10	3300	26	135	200	33,80	50,70	65,00	79,30
МК5_МА15	5	15400	15	3550	26	130	200	34,45	51,68	66,25	80,83
МК5_МА20	5	15700	20	3900	26	125	195	35,10	52,65	67,50	82,35
МК10_МА0	10	15100	0	—	28	155	225	34,84	52,26	67,00	81,74
МК10_МА5	10	15300	5	3300	27	150	220	35,49	53,23	68,25	83,27
МК10_МА10	10	15500	10	3600	27	145	215	36,14	54,21	69,50	84,79
МК10_МА15	10	15620	15	3720	26	130	200	38,20	57,10	74,00	90,20
МК10_МА20	10	15800	20	3980	27	140	210	37,10	55,60	71,50	87,10
МК15_МА0	15	16200	0	—	28	160	230	33,28	49,92	64,00	78,08
МК15_МА5	15	16500	5	3200	28	150	225	33,93	50,90	65,25	79,61
МК15_МА10	15	16800	10	3500	28	150	220	34,58	51,87	66,50	81,13
МК15_МА15	15	17100	15	3750	28	145	215	35,23	52,84	67,75	82,66
МК15_МА20	15	17400	20	4000	27	135	210	35,88	53,82	69,00	84,18
МК20_МА0	20	17600	0	—	29	170	240	31,72	47,58	61,00	74,42
МК20_МА5	20	17800	5	3000	29	165	235	32,37	48,55	62,25	75,94
МК20_МА10	20	18000	10	3350	29	160	230	33,02	49,53	63,50	77,47
МК20_МА15	20	18200	15	3700	28	150	220	33,67	50,51	64,75	79,00
МК20_МА20	20	18400	20	4000	28	145	220	34,32	51,48	66,00	80,52

Наиболее существенные изменения были выявлены при исследовании прочности цементного камня. В возрасте 2 суток максимальная прочность при использовании бинарного микронаполнителя достигала 38,20 МПа по сравнению с 30,16 МПа для контрольного состава. В возрасте 7 суток соответствующие значения составляли 57,10 и 45,24 МПа.

В возрасте 28 суток прочность контрольного цементного камня составляла 58,0 МПа, тогда как для оптимального состава с бинарным микронаполнителем значение достигало 74,0 МПа. В возрасте 90 суток прочность увеличивалась до 90,20 МПа против 70,76 МПа у контрольного состава. Таким образом, применение бинарного микронаполнителя обеспечивало не только повышение ранней прочности, но и существенный прирост прочности на поздних стадиях твердения.

Наиболее эффективным было определено сочетание 10 % микрокремнезёма и 15 % мраморного микронаполнителя. При этом рациональная удельная поверхность микрокремнезёма составляла 15000–16000 см²/г, а мраморного микронаполнителя — 3300–3800 см²/г.

Повышение прочности при данном сочетании компонентов связано с совместным проявлением микронаполняющего и пуццоланового эффектов. Мраморный микронаполнитель способствует уплотнению упаковки частиц цементной системы, тогда как активный кремнезём взаимодействует с гидроксидом кальция с образованием дополнительных гидросиликатов кальция. В результате формируется более плотная структура цементного камня.

3.2. Математическое моделирование и

определение рационального состава

Для количественной оценки влияния компонентов бинарного микронаполнителя на свойства цементного вяжущего применялось математическое планирование эксперимента и регрессионный анализ.

В качестве варьируемых факторов рассматривались содержание микрокремнезёма, содержание мраморного микронаполнителя и их удельная поверхность. Функциями отклика являлись нормальная густота цементного теста и прочность цементного камня при сжатии.

Для описания экспериментальных зависимостей использовалась математическая модель второго порядка. Полученные регрессионные уравнения позволили определить влияние отдельных факторов, их квадратичных эффектов и совместного взаимодействия.

Для прочности цементного камня в возрасте 28 суток получено следующее уравнение:

$$R_{28} = 69.12 + 3.68x_1 + 2.84x_2 + 1.18x_1x_2 - 5.94x_1^2 - 1.76x_2^2,$$

где R_{28} — прочность цементного камня при сжатии в возрасте 28 суток, МПа;

x_1 — содержание микрокремнезёма;

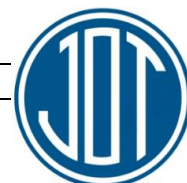
x_2 — содержание мраморного микронаполнителя.

Для нормальной густоты цементного теста получено уравнение:

$$НГ = 27.1 + 1.55x_1 - 0.85x_2 - 0.3x_1x_2 + 0.42x_1^2 + 0.15x_2^2,$$

где НГ — нормальная густота цементного теста, %.

Полученные математические зависимости использовались для построения поверхностей отклика и определения области рациональных составов.



Анализ поверхностей отклика показывает наличие выраженной области оптимума. Максимальные значения прочности соответствуют содержанию микрокремнезёма около 10 % и мраморного микронаполнителя около 15 %. Дальнейшее увеличение содержания микрокремнезёма приводит к повышению водопотребности, что ограничивает эффективность его дальнейшего введения.

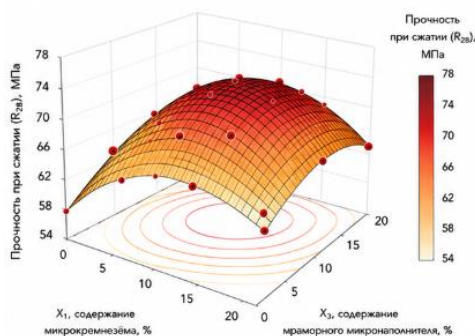


Рис. 1. Поверхность отклика зависимости прочности цементного камня в возрасте 28 суток от содержания микрокремнезёма и мраморного микронаполнителя

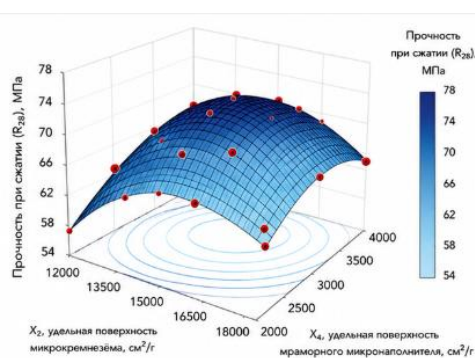


Рис. 2. Поверхность отклика зависимости прочности цементного камня от удельной поверхности микрокремнезёма и мраморного микронаполнителя

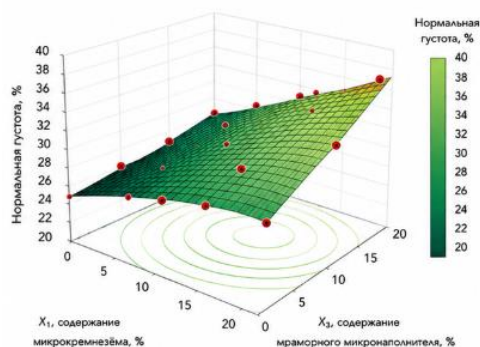


Рис. 3. Поверхность отклика зависимости нормальной плотности цементного теста от содержания микрокремнезёма и мраморного микронаполнителя

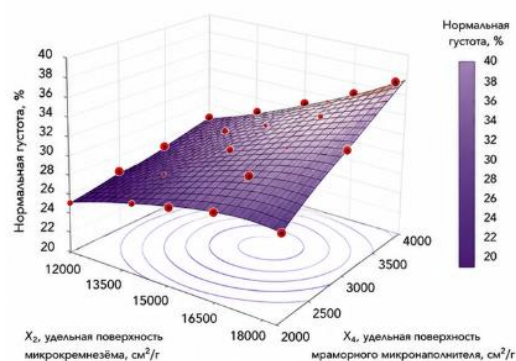


Рис. 4. Поверхность отклика зависимости нормальной плотности цементного теста от удельной поверхности компонентов бинарного микронаполнителя

Полученные результаты математического моделирования согласуются с экспериментальными данными. Это подтверждает адекватность выбранной модели и позволяет обосновать рациональный состав бинарного микронаполнителя.

Таким образом, математическое моделирование подтвердило, что оптимальное сочетание компонентов достигается при содержании 10 % микрокремнезёма и 15 % мраморного микронаполнителя.

3.3. Влияние полифункциональной добавки K1W на свойства цементного теста

На следующем этапе исследовалось влияние полифункциональной добавки K1W на технологические характеристики цементного теста. Содержание добавки изменяли в диапазоне от 0,3 до 1,5 % от массы вяжущего. Результаты представлены в таблице 2.

Для контрольного состава нормальная плотность составляла 26 %. При увеличении содержания K1W до 0,3 % она снижалась до 25 %, при 0,6 % — до 23 %, а при 0,9 % — до 22 %. При дальнейшем увеличении дозировки до 1,2–1,5 % нормальная плотность снижалась до 20 %.

Таким образом, добавка K1W обладает выраженным водоредуцирующим действием. Наиболее существенное снижение водопотребности наблюдается до дозировки 0,9 %, тогда как дальнейшее увеличение содержания добавки практически не приводит к дополнительному эффекту.

Таблица 2
Влияние дозировки K1W на нормальную плотность и сроки схватывания цементного теста

№	Состав	НГ, %	Начало схватывания, мин	Конец схватывания, мин
1	Контрольный состав	26	140	210
2	K1W (0,3 %)	25	145	225
3	K1W (0,6 %)	23	165	245
4	K1W (0,9 %)	22	175	250
5	K1W (1,2 %)	20	175	250

6	K1W (1,5 %)	20	175	250
---	----------------	----	-----	-----

Одновременно с изменением водопотребности изменялись сроки схватывания цементного теста. При увеличении содержания K1W начало и конец схватывания несколько увеличивались. Это свидетельствует о влиянии добавки на кинетику начальных процессов гидратации цемента.

Полученные результаты позволяют принять дозировку 0,9 % K1W в качестве рациональной для дальнейших исследований. Именно при данной концентрации достигается эффективное снижение водопотребности без существенного дополнительного увеличения дозировки химического модификатора.

3.4. Совместное влияние бинарного микронаполнителя и K1W на раннее структурообразование

Для определения характера совместного действия минерального и химического модификаторов исследовалась кинетика пластической прочности цементного теста. Сравнивались контрольный состав, состав с бинарным микронаполнителем, состав с K1W и комплексно-модифицированный состав.

Результаты представлены на рисунке 5.

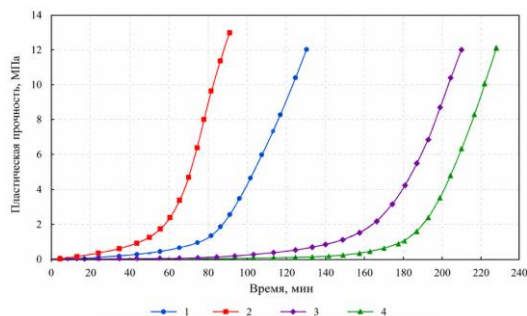


Рис. 5. Кинетика формирования пластической прочности цементного теста при различных способах модифицирования. 1 – Цемент + МК10 % + МА15 %; 2 – Контрольный состав; 3 – Цемент + МК10 % + МА15 % + K1W (0,9 %); 4 – Цемент + K1W (0,9 %)

Введение бинарного микронаполнителя способствует более интенсивному формированию начальной структуры цементного теста. Это связано с увеличением количества твердых частиц и центров кристаллизации гидратных новообразований.

При введении K1W наблюдается определенное замедление раннего структурообразования. Данный эффект может быть связан с адсорбцией компонентов химической добавки на поверхности цементных частиц и изменением скорости начальных гидратационных процессов.

В комплексно-модифицированной системе наблюдается сочетание указанных эффектов. На начальном этапе действие K1W несколько замедляет формирование структуры, однако в дальнейшем снижение водопотребности и присутствие высокодисперсных минеральных компонентов способствуют формированию более плотной цементной матрицы.

Таким образом, ранняя кинетика структурообразования и конечные прочностные

характеристики не всегда изменяются синхронно. Некоторое замедление раннего структурообразования в присутствии химической добавки компенсируется последующим более интенсивным развитием прочности.

3.5. Влияние комплексного модифицирования на кинетику набора прочности

Для оценки развития прочностных характеристик образцы цементного камня исследовали в возрасте 1, 3, 7, 14, 28 и 90 суток. Полученные результаты представлены на рисунке 6.

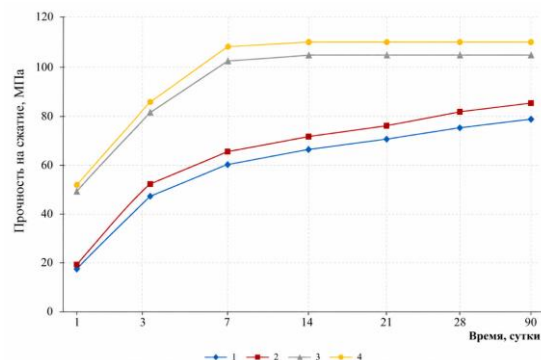


Рис. 6. Кинетика набора прочности цементного камня при различных способах модифицирования. 1 – Контрольный состав; 2 – Цемент + МК10 % + МА15 %; 3 – Цемент + K1W (0,9 %); 4 – Цемент + МК10 % + МА15 % + K1W (0,9 %)

Контрольный состав характеризуется наиболее низкими значениями прочности на всех исследованных этапах твердения. Введение бинарного микронаполнителя приводит к существенному увеличению прочности уже на ранних сроках твердения.

Применение K1W также обеспечивает повышение прочности цементного камня. Это связано прежде всего со снижением водопотребности цементной системы и уменьшением количества капиллярных пор после твердения.

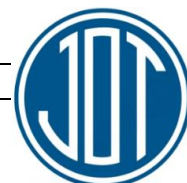
Наибольший эффект наблюдается при совместном использовании бинарного микронаполнителя и K1W. Комплексное модифицирование обеспечивает более высокую прочность по сравнению с контрольным и отдельно модифицированными составами.

В возрасте 28 суток прочность комплексно-модифицированного цементного камня достигает 74,0 МПа, а в возрасте 90 суток — 90,2 МПа. Полученные результаты свидетельствуют о продолжающемся структурном уплотнении цементного камня и развитии процессов гидратации на поздних сроках твердения.

Повышение прочности комплексно-модифицированного состава обусловлено синергетическим действием компонентов. K1W снижает водопотребность, а бинарный микронаполнитель обеспечивает физическое уплотнение структуры и дополнительное образование гидросиликатов кальция.

4. Заключение

В результате проведенных исследований установлены закономерности влияния бинарного микронаполнителя и полифункциональной добавки



K1W на формирование структуры и свойств цементного вяжущего.

1. Установлено, что совместное применение микрокремнезёма и тонкомолотого мраморного микронаполнителя обеспечивает более эффективное изменение свойств цементного вяжущего по сравнению с их раздельным применением. Эффект обусловлен сочетанием пуццолановой активности микрокремнезёма и микронаполняющего действия мраморного компонента.

2. На основании экспериментальных исследований и математического моделирования определён рациональный состав бинарного микронаполнителя, включающий 10 % микрокремнезёма и 15 % мраморного микронаполнителя. Для данного состава рациональная удельная поверхность компонентов составляет 15000–16000 и 3300–3800 см²/г соответственно.

3. Установлено выраженное водоредуцирующее действие полифункциональной добавки K1W. Рациональной определена дозировка 0,9 % от массы вяжущего, при которой достигается эффективное снижение водопотребности без существенной необходимости дальнейшего увеличения содержания добавки.

4. Комплексное применение бинарного микронаполнителя и K1W обеспечивает формирование более плотной цементной структуры и повышение прочности цементного камня. При оптимальном составе прочность достигает 74,0 МПа в возрасте 28 суток и 90,2 МПа в возрасте 90 суток.

5. Результаты рентгенофазового анализа подтверждают изменение фазового состава комплексно-модифицированного цементного камня, выражающееся в снижении количества свободного портландита и формировании дополнительных гидросиликатов кальция. Это подтверждает химическую составляющую механизма структурного уплотнения.

6. Математическое моделирование позволило количественно оценить влияние исследуемых факторов, установить область рациональных составов и подтвердить соответствие расчётных зависимостей экспериментальным результатам.

В целом комплексное модифицирование цементного вяжущего бинарным микронаполнителем и полифункциональной добавкой K1W представляет собой эффективный способ управления процессами структурообразования и формирования эксплуатационных характеристик цементного камня. Полученный подход соответствует принципам ресурсосберегающего и экологически ориентированного строительства за счёт рационального использования минеральных компонентов и повышения эффективности цементной системы.

Использованная литература / References

[1] Taylor H.F.W. Cement Chemistry. — 2nd ed. — London: Thomas Telford, 1997.

[2] Scrivener K.L., Nonat A. Hydration of cementitious materials, present and future // Cement and Concrete Research. — 2011. — Vol. 41. — P. 651–665.

[3] Мехта П.К., Монтейру П.Дж.М. Бетон. Микроструктура, свойства и материалы. — М.: АСВ, 2013.

[4] Дворкин Л.И., Дворкин О.Л. Основы бетоноведения. — СПб.: Стройиздат СПб, 2006. — 696 с.

[5] Каприелов С.С., Шейнфельд А.В. Влияние структуры минеральных добавок на свойства модифицированных бетонов // Бетон и железобетон. — 2019. — № 2.

[6] Bonavetti V. et al. Limestone filler cement in low w/c concrete: A rational use of energy // Cement and Concrete Research. — 2003. — Vol. 33. — P. 865–871.

[7] Lothenbach B. et al. Influence of limestone on the hydration of Portland cement // Cement and Concrete Research. — 2008. — Vol. 38.

[8] Wang D. et al. A review on use of limestone powder in cement-based materials: Mechanism, hydration and microstructures // Construction and Building Materials. — 2018. — Vol. 181.

[9] De Weerd K. et al. Hydration mechanisms of ternary Portland cements containing limestone powder and fly ash // Cement and Concrete Research. — 2011. — Vol. 41. — P. 279–291.

[10] Bentz D.P. et al. Limestone and silica powder replacements for cement: Early-age performance // Cement and Concrete Composites. — 2017. — Vol. 78. — P. 43–56.

[11] Holland T.C. Silica Fume User's Manual. — Federal Highway Administration, Washington, DC, 2005. — Report No. FHWA-IF-05-016.

[12] Каприелов С.С., Травуш В.И. и др. Особенности применения микрокремнезема в бетонах // Строительные материалы. — 2017. — № 10.

[13] Чернышов Е.М., Коротких Д.Н. Модифицирование структуры цементного камня микро- и наноразмерными частицами кремнезема (вопросы теории и приложений) // Строительные материалы, оборудование и технологии XXI века. — 2008. — № 5. — С. 30–32.

[14] Aïtcin P.-C., Flatt R.J. Science and Technology of Concrete Admixtures. — Woodhead Publishing, 2015. — 640 p.

[15] Plank J. et al. The chemistry of polycarboxylate superplasticizers // Cement and Concrete Research. — 2015. — Vol. 78. — P. 136–147.

[16] Flatt R.J., Houst Y.F. A simplified view on chemical effects perturbing the action of superplasticizers // Cement and Concrete Research. — 2001. — Vol. 31. — P. 1169–1176.

[17] Yamada K. et al. Effects of the chemical structure on the properties of polycarboxylate-type superplasticizer // Cement and Concrete Research. — 2000. — Vol. 30. — P. 197–207.

[18] Scrivener K.L. et al. Eco-efficient cements: Potential economically viable solutions for a low-CO₂ cement-based materials industry // Cement and Concrete Research. — 2018. — Vol. 114. — P. 2–26.

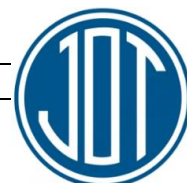
[19] Adler Yu.P., Markova E.V., Granovsky Yu.V. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий. — М.: Наука, 1976. — 279 с.

[20] Adilkhodjaev A., Kadyrov I., Khasanov B., Radjabov M., Umarov I. Effect of binary microbrake based on "quartz+carbonate" additions on the properties of cement stone // AIP Conference Proceedings. DOI: 10.1063/5.0267412.



Информация об авторах/ Information about the authors

Адилходжаев Анвар Ишанович / Anvar Adilkhodjaev	Ташкентский государственный транспортный университет, д.т.н., профессор, https://orcid.org/0000-0001-5729-5178	Farhod Abdukadirov	https://orcid.org/0000-0003-2271-3768
Кадиров Илхом Абдуллаевич / Ilkhom Kadirov	DSc, профессор, Национальный исследовательский университет «Ташкентский институт инженеров иригации и механизации сельского хозяйства» https://orcid.org/0000-0003-3924-0864	Ниязбеков Саидмурад Саидрасулович / Saidmurad Niyazbekov	к.т.н., директор, Узбекско- японский молодежный центр инноваций при Ташкентском государственном техническом университете
Абдукадиров Фарход Эркинович /	PhD, доцент, Ташкентский государственный транспортный университет	Бабажанов Азиз Файзитдинович / Aziz Babajanov	докторант, Ташкентский государственный транспортный университет E-mail: babajanov.aziz@gmail.com Tel.:+998909542901 https://orcid.org/0009-0002-7990-0206
		Камалов Азамат Хусниддинович / Azamat Kamalov	директор, ООО «Ko'priksifatnazorat»



K. Mustafaeva, Sh. Jumaev, A. Makhkamov, Sh. Suyunbaev

Research on the time norms for performing technological operations with multi-group trains at railway stations.....234

F. Khasanov

Study of the magnetocaloric effect in magnetic materials.....242

F. Khasanov

The magnetocaloric effect as a basis for energy-efficient magnetic refrigeration.....247

D. Safaeva, Sh. Tashmammedova, D. Zairov

IR spectroscopic study of the formation of functional groups on the surface of polymer materials for packaging under the influence of corona discharge.....251

A. Azimov

Improving the cold-start process in fourth-generation gas-cylinder vehicles operating on compressed natural gas fuel.....254

A. Beliy, Sh. Kadirova

Improvement of the method for assessing the need for electrochemical protection of reinforced concrete bridge piers259

A. Adylkhodjaev, I. Kadyrov, F. Abdukadyrov,

S. Niyazbekov, A. Babajanov, A. Kamalov

Effect of a binary micro-filler and polyfunctional admixture on the structure formation and properties of cement binders.....264

A. Karshiboev

Numerical analysis of tunnel lining for a metro station.....272

U. Berdiev, G. Kahhorova

Improving energy performance through the application of single-phase capacitor asynchronous electric motors in auxiliary circuits of electric rolling stock.....278

N. Sanaeva

Stress-strain state characteristics of closed reinforced concrete frames considering infill wall effects.....282