Научная статья / Original article
УДК 691.54
https://doi.org/10.15828/2075-8545-2025-17-3-224-234

Исследование устойчивости цеолитовых суспензий для цементных систем

Светлана Васильевна Самченко, Ирина Васильевна Козлова*, Мария Вячеславовна Синотова, Дмитрий Николаевич Вовченский, Ксения Александровна Сироткина
Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, Москва, Россия
* Автор, ответственный за переписку: e-mail: iv.kozlova@mail.ru

АННОТАЦИЯ

Введение. Для развития строительной отрасли в Российской Федерации уделяется большое внимание разработке новых материалов, обладающих высокой функциональностью, долговечностью, прочностью, а также имеющих различные уникальные характеристики. Для возведения объектов, требующих повышенной прочности, или проведения ремонтных работ, где имеет значение ранний набор прочности ремонтной смеси, применяются в составе вяжущего материала различные тонкодисперсные добавки. Для обеспечения повышения физико-механических характеристик затвердевшей цементной пасты, содержащей в своем составе такие добавки, необходимо рассматривать вопрос равномерности распределения частиц субмикронного уровня в объеме цементного композита. Исследование этого вопроса является одной из задач настоящего исследования. **Материалы и методы.** В качестве объекта исследования выбран тонкодисперсный цеолит, который обладает высокими ионообменными, сорбционными, каталитическими свойствами, и оценена возможность его введения в состав цемента в виде стабилизированной суспензии вместо воды затворения. Цеолитовая суспензия с концентрацией 10, 30, 50 г/л готовилась посредством механического перемешивания с помощью магнитной мешалки и ультразвукового диспергирования в термостатированных условиях. Время механической и ультразвуковой обработки суспензий составило 20 мин. Суспензии готовились в двух дисперсионных средах – водной и водно-полимерной (вода + пластификатор). Физико-механические испытания образцов проводились в соответствии с действующими национальными и межгосударственными стандартами и методиками. **Результаты.** Исследования седиментационной устойчивости суспензий показали, что наиболее устойчива суспензия, стабилизированная ультразвуковой обработкой и пластификатором. Скорость оседания частиц суспензии в первый период составляет $(3.43 \div 3.83) \cdot 10^{-6}$ м/с, во второй период – $(0{,}98 \div 1{,}17) \cdot 10^{-6}$ м/с. Исследование дисперсности частиц цеолита в суспензиях показало, что ультразвуковое диспергирование приводит к более значительному сдвигу дисперсности частиц в сторону уменьшения с 25 мкм до 3 мкм как в водных, так и в водно-полимерных суспензиях с концентрацией 10–30 г/л. Проведенные физико-механические испытания образцов показали, что при введении в состав цемента водно-полимерной цеолитовой суспензии, стабилизированной ультразвуковой обработкой, наблюдается увеличение начальной и марочной прочности в 3,3 раза и на 51%, соответственно. Анализ результатов по прочности на сжатие показал наибольшую эффективность при введении суспензии цеолита в состав цемента вместо воды затворения в количестве 10–30 г/л. **Заключение.** Проведенные исследования показали эффективность применения ультразвуковой обработки в комплексе с пластификатором к стабилизации цеолитовой суспензии. Стабилизированные частицы цеолита, равномерно распределяясь в объеме цементной матрицы, выступают в качестве подложки для зарождения и роста кристаллогидратных фаз, тем самым интенсифицируя процесс гидратации и формирования кристаллогидратного каркаса с плотной и прочной структурой цементного камня. Таким образом, целесообразность рассмотрения цеолитов в качестве компонентов композиционных материалов является перспективным направлением в решении многоплановых задач строительной отрасли.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: цеолитовая суспензия, цементная система, дисперсность, устойчивость, ультразвуковая обработка, механическая обработка, пластификатор, прочность

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:
Самченко С.В., Козлова И.В., Синотова М.В., Вовченский Д.Н., Сироткина К.А. Исследование устойчивости цеолитовых суспензий для цементных систем. *Нанотехнологии в строительстве.* 2025;17(3):224–234. https://doi.org/10.15828/2075-8545-2025-17-3-224-234. – EDN: ZQIZZV.

Study of the stability of zeolite suspensions for cement systems

Svetlana V. Samchenko, **Irina V. Kozlova***, **Maria V. Sinotova**, **Dmitry N. Vovchensky**, **Ksenia A. Sirotkina**

National Research Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russia

* Corresponding author: e-mail: iv.kozlova@mail.ru

ABSTRACT

Introduction. In Russia, the focus of scientific research in the construction industry is on the development of new materials with high functionality, durability, and strength. These materials also have various unique properties that make them suitable for a wide range of applications. Fine dispersed additives are used in the binder, for the construction of objects that require increased strength, or for repair work where early strength gain of the repair mixture is important. To improve the physical and mechanical properties of the hardened cement paste, which contains finely dispersed additives, it is necessary to consider the issue of uniform distribution of submicron particles in the volume of the cement composite. The study of this issue is one of the objectives of this study. **Materials and methods.** Fine dispersed zeolite, which has high ion-exchange, sorption, catalytic properties, was selected as the object of study, and the possibility of its introduction into the cement composition in the form of a stabilized suspension instead of mixing water was assessed/ Zeolite suspension with concentration of 10, 30, 50 g/l was prepared by mechanical stirring with a magnetic stirrer and ultrasonic dispersion under thermostatted conditions. The time of mechanical and ultrasonic treatment of suspensions was 20 min. Suspensions were prepared in two dispersion media – water and water-polymer (water + plasticizer). Physicomechanical tests of samples were carried out in accordance with current national and international standards and methods. **Results.** Studies of sedimentation stability of suspensions showed that the most stable suspension was stabilized by ultrasonic treatment and plasticizer. The sedimentation velocity of suspension particles in the first period was $(3.43 \div 3.83) \cdot 10^{-6}$ m/s, in the second period – $(0.98 \div 1.17) \cdot 10^{-6}$ m/s. The study of zeolite particle dispersion in suspensions showed that ultrasonic dispersion leads to a more significant shift in particle dispersion downwards from 25 µm to 3 µm, both in aqueous and aqueous-polymer suspensions with a concentration of 10–30 g/l. The conducted physical and mechanical tests of the samples showed that the introduction of an ultrasonic-stabilized aqueous-polymer zeolite suspension into the cement composition results in an increase in the initial and grade strength by 3.3 times and 51%, respectively. The analysis of the results for compressive strength showed the greatest efficiency when introducing a zeolite suspension into the cement composition instead of mixing water in an amount of 10–30 g/l. **Conclusion.** The studies conducted have shown the effectiveness of using ultrasonic treatment in combination with a plasticizer to stabilize the zeolite suspension. Stabilized zeolite particles, uniformly distributed in the volume of the cement matrix, act as a substrate for the nucleation and growth of crystal hydrate phases, thereby intensifying the process of hydration and formation of a crystal hydrate framework with a dense and strong structure of cement stone. Thus, the feasibility of considering zeolites as components of composite materials is a promising direction in solving multifaceted problems in the construction industry.

KEYWORDS: zeolite suspension, cement system, dispersion, stability, ultrasonic treatment, mechanical treatment, plasticizer, strength

FOR CITATION:
Samchenko S.V., Kozlova I.V., Sinotova M.V., Vovchensky D.N., Sirotkina K.A. Study of the stability of zeolite suspensions for cement systems. *Nanotechnologies in Construction.* 2025;17(3):224–234. https://doi.org/10.15828/2075-8545-2025-17-3-224-234. – EDN: ZQZZZV.

ВВЕДЕНИЕ

В Российской Федерации уделяется большое внимание разработке новых материалов для развития строительной отрасли. Необходимо стремиться к получению таких материалов, которые обладали бы высокой функциональностью, долговечностью, прочностью, а также имели бы различные уникальные характеристики. На территории нашей страны в этом направлении проводятся многочисленные научные исследования, изучаются свойства материалов природного и техногенного происхождения, в том числе активно проводятся работы, связанные с утилизацией промышленных отходов [1—4].

Для возведения объектов, требующих повышенной прочности (фундамент, стены, перекрытия, колонны, балки и т.д.), или проведения ремонтных работ, где имеет значение ранний набор прочности ремонтной смеси, применяются в составе вяжущего материала различные тонкодисперсные добавки [5—7].

Для обеспечения повышения физико-механических характеристик затвердевшей цементной пасты, содержащей в своем составе такие добавки, необходимо рассматривать вопрос равномерности распределения частиц субмикронного уровня в объеме цементного композита [8–9]. При нестабильности распределения тонкодисперсных компонентов в матричной системе наблюдается ухудшение прочности цементного камня [10]. Исследование этого вопроса является одной из задач настоящего исследования.

Для определения дозировки тонкодисперсных материалов в составе цементной системы проводится корректировка водоцементного отношения. Такие манипуляции позволяют снизить расход цемента и повысить прочность конечного продукта [11].

Введение пуццолановых добавок в состав цемента, которые придают материалу специфические свойства (повышенную водостойкость, устойчивость к агрессивному воздействию минерализованных и пресных вод и др.), приводит к снижению ранней прочности и увеличению поздней прочности при использовании в оптимальных пропорциях [12–14]. Разновидностью пуццоланов является цеолит, который представляет собой алюмосиликаты со скелетной структурой, имеющей полости наноразмерного уровня, заполненные катионами щелочных и щелочноземельных металлов и молекулами воды, способными свободно удаляться и поглощаться. Протекающие процессы в структуре цеолита приводят к ионному обмену и обратимой дегидратации, при этом сама структура цеолита не изменяется [15, 16].

Физико-химические свойства цеолитов зависят от геометрии их пористой структуры, химии каркаса и природы внекаркасных структур [17, 18]. Благодаря этому они обладают высокими ионообменными, сорбционными, каталитическими свойствами, что высоко оценено в строительной отрасли. Наблюдается положительная тенденция в получении различных строительных материалов на основе цеолита, обладающих уникальными эксплуатационными свойствами [19–22].

В качестве примера можно привести анализ экспериментальных данных, представленный в работе [15]. Авторами показано, что с увеличением концентрации цеолита до 17%, используемого как наполнитель, прочность бетона на начальном этапе возрастает, т.к. формируется плотный каркас структуры. При дальнейшем увеличении концентрации цеолита происходит снижение прочности, что соответствует полиструктурной теории композиционных строительных материалов, разработанной академиком В.И. Соломатовым. Авторы [23] утверждают, что с помощью природных цеолитов можно производить «зеленый» бетон, значительно сокращая потребление цемента. В работе [24] доказана эффективность использования цеолита в многокомпонентных мелкозернистых бетонах для строительной 3D-печати. Предлагается вводить цеолит в количестве 5–15%, что обеспечивает сокращение времени схватывания на 1,0–1,20 ч и увеличение прочности образцов. Интересное технологическое решение использования цеолита привели индонезийские коллеги в работе [25]. Ими предложено из-за нехватки пресной воды применять цеолиты для опреснения морской воды с последующим затворением ее бетонной смеси. Было установлено, что увеличение содержания цеолита для опреснения морской воды коррелируется со снижением солености, тем самым повышая прочность бетона на сжатие. В работе [26] показана технология производства теплоизоляционного материала из пеностеклокерамики, содержащей цеолитовую породу по экструзивному методу, которая способна повысить насыпную плотность материала до 220 кг/м^3, теплопроводность до 0,078 Вт/(м·°С), что свидетельствует о возможности его использования для дорожного строительства в сложных геокриологических условиях. Рассмотренные примеры подтверждают целесообразность использования цеолитов в создании строительных материалов, что актуально для решения многоплановых задач строительной отрасли.

Таким образом, перед нами стоит задача продолжить исследование свойств цеолитов в составе цементных систем. Предлагаются к рассмотрению тонкодисперсные цеолиты и их возможность стабилизации для введения в состав цемента в виде стабилизированной суспензии вместо воды затворения.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В ходе проведения исследований в качестве тонкодисперсной минеральной добавки использовался цеолит Холинского месторождения с преобладающим размером частиц 25 мкм (рис. 1), портландцемент Евроцемент ЦЕМ I 42,5Н, а также пластификатор Sika ViscoCrete-226 P. В табл. 1 и 2 представлены химический и минералогический состав цемента, в табл. 3 – химический состав Холинского цеолита.

Для проведения исследований готовилась цеолитовая суспензия с концентрацией 10, 30, 50 г/л посредством механического перемешивания с помощью магнитной мешалки и ультразвукового диспергирования (УЗО) на приборе УЗДН-1 при частоте 44 кГц в термостатированных условиях (t = 25±2 °С) (рис. 2). Время механической и ультразвуковой обработки суспензий составило 20 мин. Суспензии готовились в двух дисперсионных средах – водной и водно-полимерной (вода + пластификатор). Определение дисперсности частиц цеолита в суспензиях проводилось на приборе Fritsch Particle Sizer.

Физико-механические испытания образцов проводились в соответствии с действующими национальными и межгосударственными стандартами и методиками.

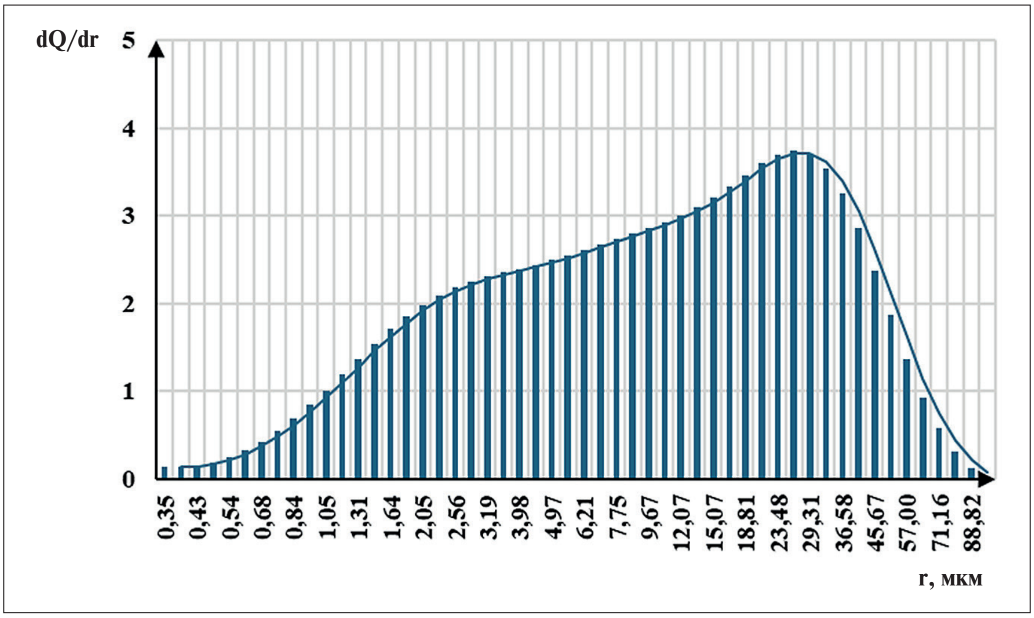


Рис. 1. Кривая распределения частиц цеолита в порошке

Таблица 1. Химический состав цементного клинкера

Компоненты	CaO, %	SiO_2, %	Al_2O_3, %	Fe_2O_3, %	MgO, %	SO_3, %	R_2O (Na_2O), %
Клинкер	66,1	21,2	5,1	4,2	0,77	0,55	0,57

Таблица 2. Минералогический состав цементного клинкера

Содержание минералов, %			
C_3S	C_2S	C_3A	C_4AF
68,4	8,3	6,5	12,6

ЭКСПЕРИМЕНТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

В рамках данной работы была исследована дисперсность частиц тонкодисперсного цеолита с преобладающим размером частиц 25 мкм в водной и водно-полимерной суспензиях, приготовленных посредством механического перемешивания и ультразвукового воздействия. Также проводились исследования по изучению седиментационной устойчивости приготовленных суспензий для предварительной оценки равномерности распределения частиц цеолита в объеме цементной матрицы.

Для установления седиментационной устойчивости частиц цеолита в суспензии приготовленные суспензии переливали в цилиндры на 100 см^3 и проводили наблюдением за процессом седиментации частиц цеолита. Замерив высоту столба оседающих частиц и время их оседания, вычисляли скорость оседания частиц в суспензии.

Оседание частиц цеолита происходило в 3 этапа: 1 – начало седиментации, оседают самые крупные частицы; 2 – оседание частиц более тонкой фракции; 3 – полное оседание частиц. Исследования показали, что даже при механическом перемешивании через 7 суток полного оседания частиц цеолита в водной дисперсионной среде не наблюдалось, поэтому было принято решение 3 периодом оседания частиц пренебречь, а для оценки седиментационной устойчивости частиц в суспензии ограничиться 2 периодом оседания, в котором считать, что седиментации подверглось $^2/_3$ частиц цеолита.

Установление оптимальной дозировки пластификатора для приготовления водно-полимерных су-

Таблица 3. Химический состав цеолита

Содержание компонентов в цеолите, %											
SiO_2	TiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	FeO	CaO	MgO	Na_2O	K_2O	MnO	SO_3	п.п.п
67,7	0,09	11,97	0,78	0,26	1,37	0,42	2,53	3,63	0,17	0,04	11,39

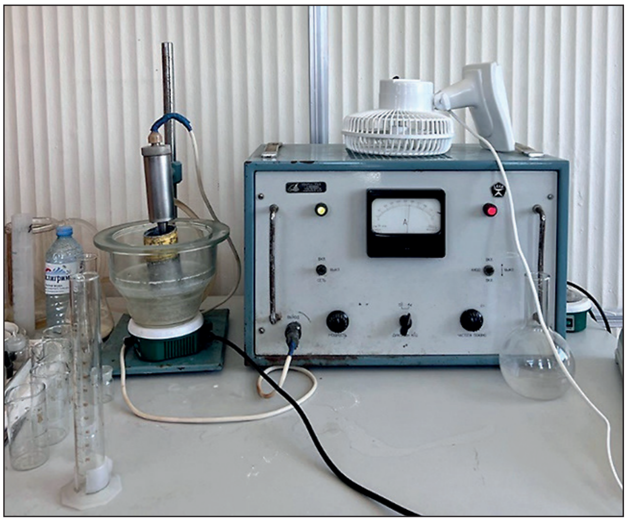


Рис. 2. Ультразвуковой диспергатор УЗДН-1

спензий проводилось по определению седиментационной устойчивости суспензий в цилиндрах объемом 100 см^3. В эксперименте рассматривались суспензии с максимальным содержанием цеолита, т.е. 50 г/л, в которых содержался пластификатор с концентрацией от 1,0 до 5,0 г/л (табл. 4).

В ходе исследований установлено, что концентрация пластификатора от 3,0 г/л и выше обеспечивает седиментационную устойчивость суспензий с содержанием цеолита 50 г/л в первый период оседания частиц до 2,5 ч при механическом перемешивании и 12,5 ч после ультразвуковой обработки. В связи с этим в дальнейших исследованиях принято решение использовать концентрацию пластификатора 3,0 г/л.

Скорость оседания частиц цеолита в суспензии, приготовленной механической и ультразвуковой обработкой в присутствии пластификатора и без него в 1 и 2 периоды оседания частиц, представлено на рис. 3. Из графиков видно, что при механической обработке скорость оседания частиц самая максимальная, особенно где содержится 50 г частиц цеолита на 1 л суспензии (рис. 3а), скорость оседания частиц в первый период оседания составляет $(283 \div 455) \cdot 10^{-6}$ м/с; во второй период – $(21{,}1 \div 26{,}1) \cdot 10^{-6}$ м/с. Наиболее устойчива суспензия, стабилизированная ультразвуковой обработкой и пластификатором (рис. 3г). Скорость оседания частиц суспензии в первый период составляет $(3.43 \div 3.83) \cdot 10^{-6}$ м/с, во второй период – $(0{,}98 \div 1{,}17) \cdot 10^{-6}$ м/с.

Параллельно с установлением седиментационной устойчивости суспензий проводилось определение размера частиц цеолита в суспензии. Результаты определений представлены на рис. 4.

Дифференциальные кривые распределения частиц показали, что в водных и водно-полимерных суспензиях с концентрацией цеолита 10 г/л, приготовленных механическим перемешиванием, преобладающий размер частиц составляет 10–12 мкм при $dQ/dr = 4{,}1–4{,}2$ (голубая и оранжевая кривые на рис. 4а).

С концентрацией 30–50 г/л в таких же суспензиях установить преобладающий размер достаточно сложно, наблюдается полифракционное распределение частиц в пределах 3–25 мкм при $dQ/dr = 3{,}0–3{,}5$ (голубая и оранжевая кривые на рис. 4б, в).

Под воздействием ультразвука в водных и водно-полимерных цеолитовых суспензиях с концентрацией 10–30 г/л преобладающий размер частиц составляет 3 мкм при $dq/dr = 4{,}6–5{,}2$ (серые и желтые кривые на рис. 4а, б). При увеличении концентрации цеолита в водной суспензии до 50 г/л наблюдается полифракционный состав с преобладающими размерами частиц 1, 5, 32 мкм при $dQ/dr = 2{,}2$; 6,7; 3,1, соответственно (серая кривая на рис. 4в). При изучении желтой кривой на рис. 4в, отвечающей за распределение размера частиц цеолита в водно-полимерной суспензии, подвергшейся УЗО, выявлен преобладающий размер частиц, равный 3 мкм при $dQ/dr = 5{,}2$.

Таблица 4. Седиментационная устойчивость цеолитовой суспензии с разным содержанием пластификатора

Наименование показателя	№ цилиндра						
	1	2	3	4	5	6	7
Концентрация пластификатора, г/л	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	4,0	5,0
Защитное число суспензии S, $*10^{-3}$ г/л	1,00	2,25	4,00	6,25	9,00	16,00	25,00
Седиментационная устойчивость цеолитовой суспензии в первый период оседания частиц без УЗО, ч–мин	1–00	1–20	1–50	2–10	2–30	2–30	2–40
Седиментационная устойчивость цеолитовой суспензии в первый период оседания частиц после УЗО, ч–мин	6–00	8–00	10–00	11–30	12–30	12–30	12–30

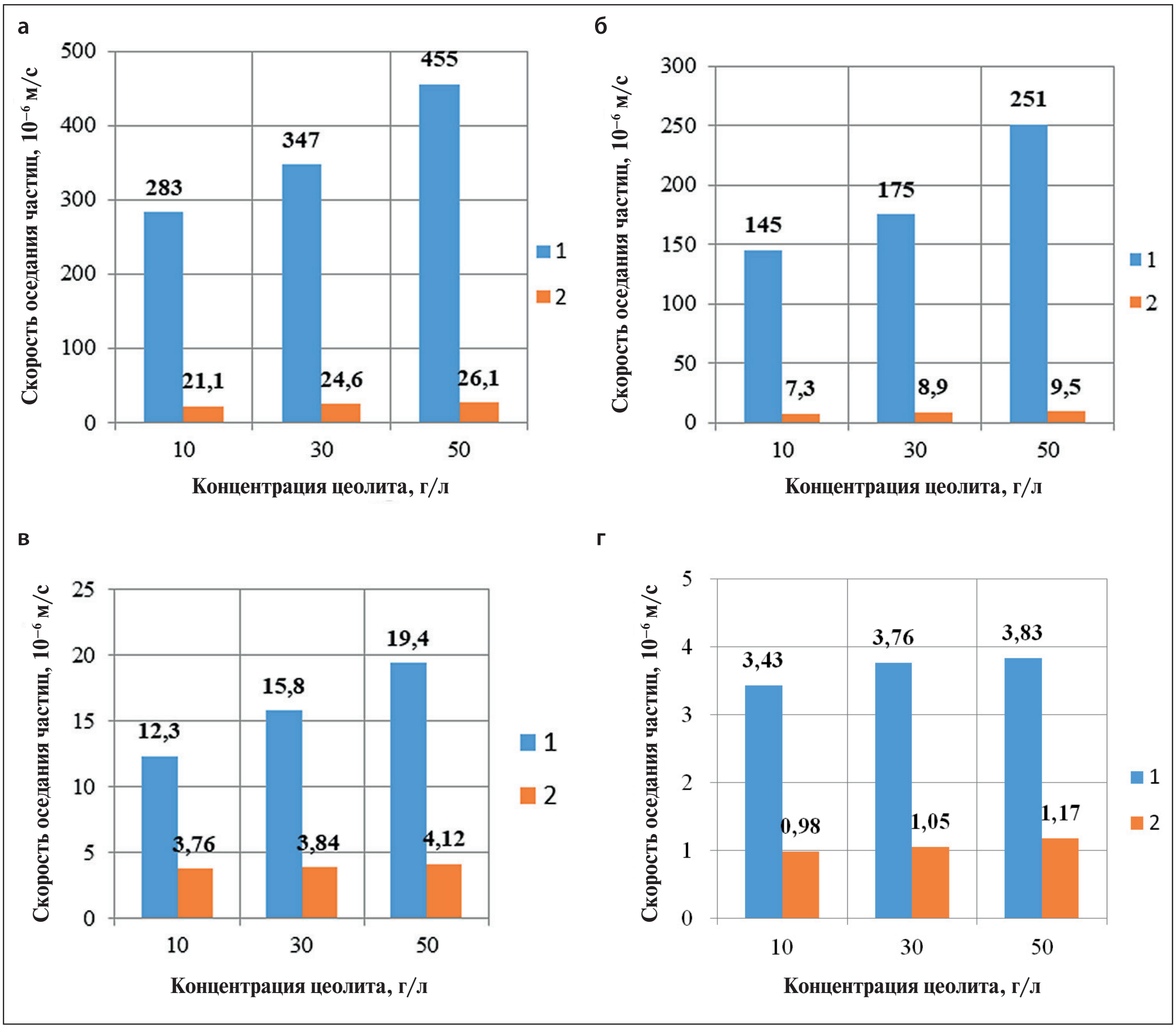


Рис. 3. Седиментационная устойчивость цеолитовой суспензии: а) механическая обработка; б) ультразвуковая обработка; в) механическая обработка + пластификатор; г) ультразвуковая обработка + пластификатор

Подводя итог, можно сделать вывод, что ультразвуковое диспергирование приводит к сдвигу дисперсности частиц в сторону уменьшения с 25 мкм до 3 мкм как в водных, так и водно-полимерных суспензиях с концентрацией 10–30 г/л. Водная суспензия, содержащая 50 г/л частиц тонкодисперсного цеолита, сложнее подвергается ультразвуковой обработке, за счет того, что в более концентрированной суспензии число столкновений между частицами выше, чем в разбавленной. Это приводит к протеканию коагуляционных процессов. При введении пластификатора частицы цеолита стабилизируются, что позволяет минимизировать протекание коагуляционных процессов в суспензии.

При механической обработке отмечается также некоторое смещение дисперсности частиц в сторону уменьшения (с 25 до 10–15 мкм), но оно незначительно выражено, в большей степени такое распределение частиц носит полифракционный характер.

Исходя из данных, полученных при изучении седиментации частиц тонкодисперсного цеолита, можно сделать вывод, что применение ультразвуковой обработки к водным и водно-полимерным цеолитовым суспензиям позволяет получать седиментационно-устойчивые суспензии, которые могут равномерно распределяться в объеме цементной матрицы и способствовать повышению физико-механических характеристик затвердевшей цементной пасты, в связи с чем были отформованы кубики 20×20×20 мм и выдержаны в воздушно-влажностных условиях. В модифицированных образцах цеолитовая суспензия вводилась в состав цемента

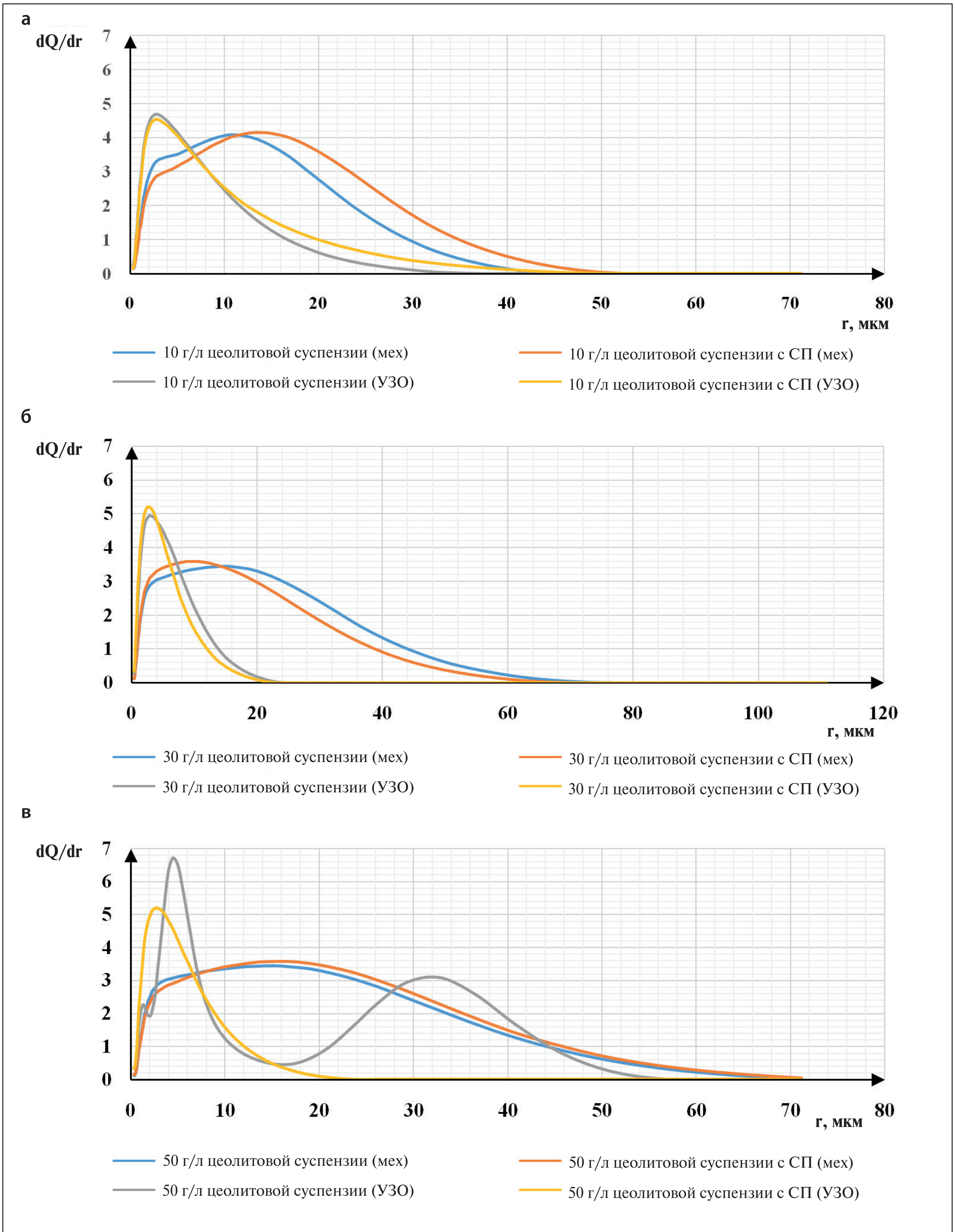


Рис. 4. Дифференциальные кривые распределения частиц цеолитовых суспензий: а) с концентрацией 10 г/л; б) с концентрацией 30 г/л; в) с концентрацией 50 г/л

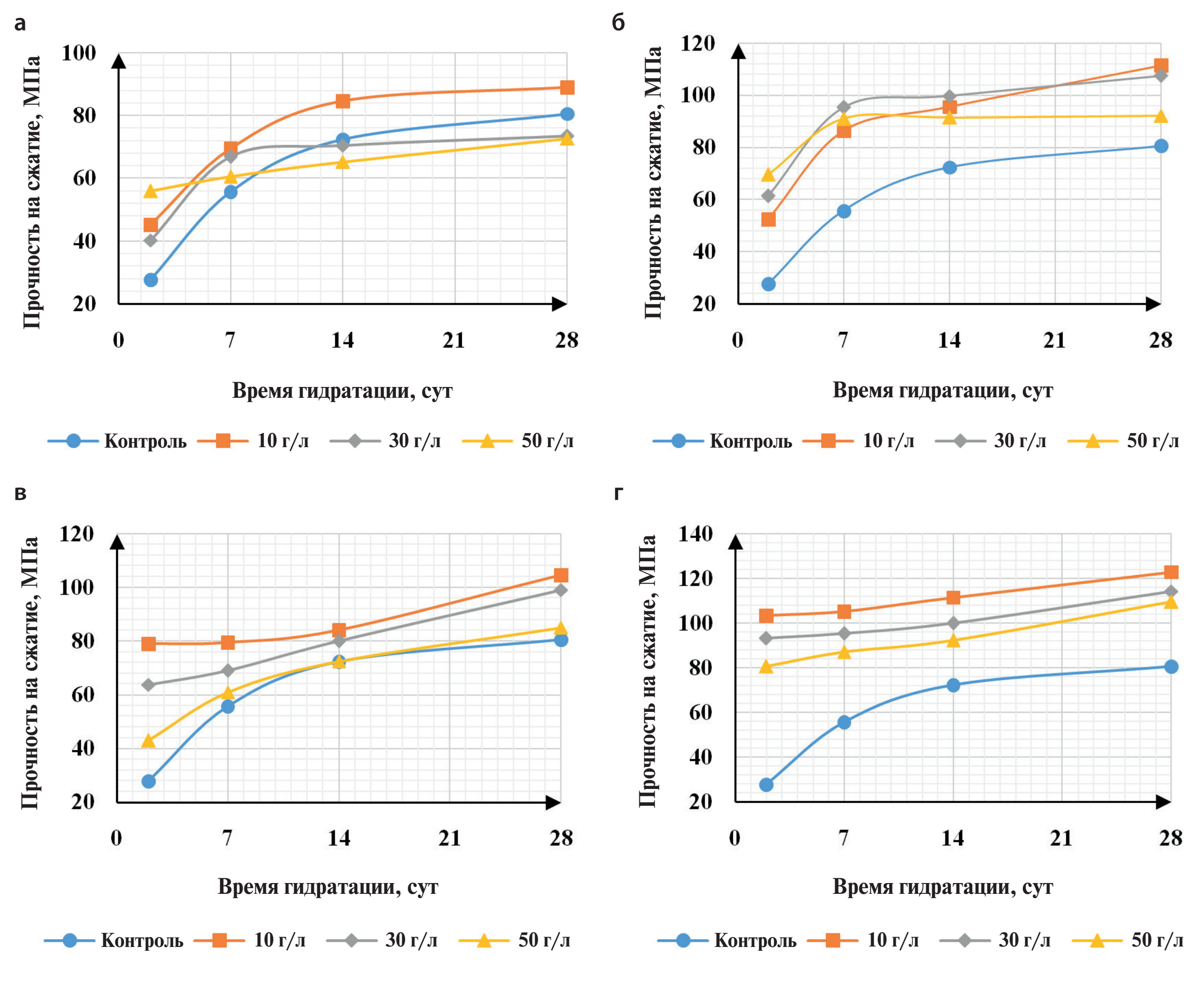
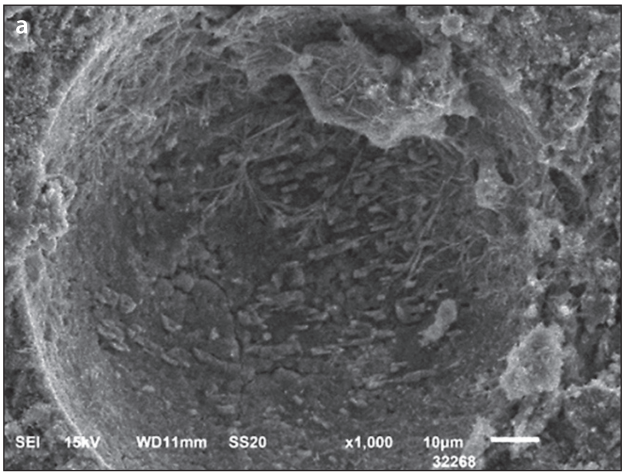


Рис. 5. Зависимость прочности от времени гидратации: а) механическая обработка; б) механическая обработка + пластификатор; в) ультразвуковая обработка; г) ультразвуковая обработка + пластификатор

вместо воды затворения. Результаты испытаний представлены на рис. 5.

Анализ полученных результатов показал, что при введении цеолитовой суспензии отмечается значительное увеличение в начальные сроки твердения (на 70%), а в марочном возрасте прирост прочности с добавкой, содержащей цеолит в количестве 10 г/л, составил 10,6%. При введении пластификатора в цеолитовую суспензию наблюдается прирост прочности во все сроки твердения: на 2 сутки прочность возросла в 2,2 раза, в марочном возрасте – на 29%. При ультразвуковой обработке цеолитовой суспензии наблюдается увеличение прочности в начальные сроки у всех модифицированных образцов в среднем в 2,2 раза, в марочном возрасте с добавкой цеолита 10–30 г/л – на 23–29%, с добавкой цеолита 50 г/л прочность сопоставима с бездобавочным образцом. При введении комплексной добавки отмечается максимальное увеличение начальной и марочной прочности в 3,3 раза и на 51%, соответственно. Анализ результатов по прочности на сжатие показал наибольшую эффективность при введении суспензии цеолита в состав цемента вместо воды затворения в количестве 10–30 г/л.

Исходя из вышеизложенного следует, что применение УЗО к стабилизации цеолитовой суспензии позволяет увеличить прочность как в начальные сроки твердения, так и в марочном возрасте. Это свидетельствует о том, что тонкодисперсный цеолит равномерно распределяется в матрице цементного камня, концентрирует вокруг себя гидратные новообразования, тем самым интенсифицируя зарождение и рост кристаллогидратных фаз, уплотняющих и упрочняющих твердеющий конгломерат, что подтверждается микрофотографиями образцов, представленными на рис. 6. На них показана пора в структуре цемент-



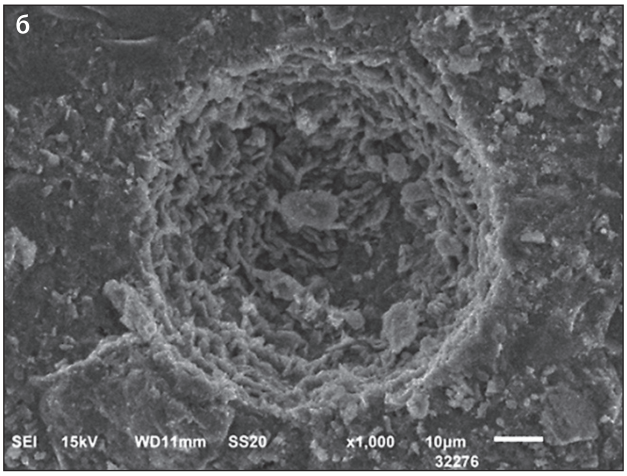


Рис. 6. Электронно-микроскопические снимки образцов в 2 сут. твердения: а) контрольный образец; б) цеолитовая суспензия с концентрацией 10 г/л, стабилизированная УЗО

ного камня в 2-суточном возрасте бездобавочного образца и образца, затворенного стабилизированной УЗО цеолитовой суспензией. При рассмотрении поры в структуре цементного камня отмечается, что при одинаковом увеличении у образца с добавкой цеолита она более интенсивно зарастает гексагональными гидросиликатами и гидроалюминатами кальция, обладающими хорошей армирующей способностью, что подтверждает уплотнение и упрочнение структуры цементного камня на ранних сроках твердения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для установления равномерности распределения частиц тонкодисперсного цеолита в составе цементной матрицы были проведены исследования по определению седиментационной устойчивости суспензий, а также установлена дисперсность частиц цеолита после механической и ультразвуковой обработки в водной и водно-полимерных дисперсионных средах.

В ходе исследований установлена оптимальная дозировка анионного пластификатора для приготовления водно-полимерных суспензий цеолита. Она составила 3,0 г/л.

Исследования седиментационной устойчивости суспензий показали, что наиболее устойчива суспензия, стабилизированная ультразвуковой обработкой и пластификатором. Скорость оседания частиц суспензии в первый период составляет $(3.43 \div 3.83) \cdot 10^{-6}$ м/с, во второй период – $(0{,}98 \div 1{,}17) \cdot 10^{-6}$ м/с.

Исследование дисперсности частиц цеолита в суспензиях показало, что ультразвуковое диспергирование приводит к более значительному сдвигу дисперсности частиц в сторону уменьшения с 25 мкм до 3 мкм как в водных, так и в водно-полимерных суспензиях с концентрацией 10–30 г/л. Водная суспензия, содержащая 50 г/л частиц тонкодисперсного цеолита, сложнее подвергается ультразвуковой обработке, за счет того, что в более концентрированной суспензии число столкновений между частицами выше, чем в разбавленной. Это приводит к протеканию коагуляционных процессов. При введении пластификатора частицы цеолита стабилизируются, что позволяет минимизировать протекание коагуляционных процессов в суспензии.

Проведенные физико-механические испытания образцов показали, что при введении в состав цемента водно-полимерной цеолитовой суспензии, стабилизированной ультразвуковой обработкой, наблюдается увеличение начальной и марочной прочности в 3,3 раза и на 51%, соответственно. Анализ результатов по прочности на сжатие показал наибольшую эффективность при введении суспензии цеолита в состав цемента вместо воды затворения в количестве 10–30 г/л.

Исходя из полученных данных, можно отметить эффективность применения УЗО в комплексе с пластификатором к стабилизации цеолитовой суспензии, что свидетельствует о равномерности распределения частиц цеолита в матрице цементного камня. Стабилизированные частицы цеолита, выступая в качестве подложки для зарождения и роста кристаллогидратных фаз, интенсифицируют процесс гидратации и формирования кристаллогидратного каркаса с плотной и прочной структурой цементного камня. Проведенные исследования подтверждают целесообразность рассмотрения цеолитов в качестве компонентов композиционных материалов, что актуально для решения многоплановых задач строительной отрасли.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Кийко П.И., Черных Т.Н. Влияние железосодержащих компонентов в фасадных покрытиях на их способность к самоочищению. *Цемент и его применение*. 2024;1:60–63. EDN: COMALL

2. Демьяненко О.В., Копаница Н.О., Сорокина Е.А. Влияние добавки термомодифицированного торфа на технологические свойства строительных смесей для 3D-печати. *Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета*. 2018;20:4:122–134. https://doi.org/10.31675/1607-1859-2018-20-4-122-134 EDN: XWCDCP

3. Ларсен О.А., Бахрах А.М., Машина Т.Ю. Органоминеральный модификатор на основе шламовой воды для получения высокопрочных самоуплотняющихся бетонов. *Техника и технология силикатов*. 2024;31(4):365–376. https://doi.org/10.62980/2076-0655-2024-365-376 EDN: MJUPXW

4. Саркисов Ю.С., Горленко Н.П., Самченко С.В., Бруяко М.Г. Использование отходов целлюлозно-бумажной промышленности в технологии вяжущих и цементных систем. *Нанотехнологии в строительстве: научный интернет-журнал*. 2024;16(4):301–309. https://doi.org/10.15828/2075-8545-2024-16-4-301-309 EDN: GCICKX

5. Кривобородов Ю.Р., Лежебоков Д.А. Активационное твердение шлакопортландцемента. *Техника и технология силикатов*. 2024;31(4):395–402. https://doi.org/10.62980/2076-0655-2024-395-402 EDN: WITTOK

6. Ушков В.А., Козлова И.В., Суров О.В., Налбандян Г.В. Влияние микро- и нанокристаллической целлюлозы на прочностные характеристики ремонтного состава. *Техника и технология силикатов*. 2021;28(2):49–53. EDN: IUZRSU

7. Кривобородов Ю.Р., Козлова И.В., Земскова О.В., Борисенков Н.С. Разработка цементных композиций с тонкодисперсным перлитом для инъекционного закрепления грунтов. *Техника и технология силикатов*. 2023;30(3):272–280. EDN: QULEOY

8. Samchenko S., Kozlova I., Zemskova O., Zamelin D., Pepelyaeva A. Complex Method of Stabilizing Slag Suspension. *Advances in Intelligent Systems and Computing*. 2019;983:817–827. https://doi.org/10.1007/978-3-030-19868-8_80

9. Kulikova A.A., Kopanitsa N.O., Shekhovtsov V.V., Demyanenko O.V. Influence of nanosized silicon dioxide on the properties of cement stone matrix: synthesis methods and experimental results. *Russian Physics Journal*. 2025. https://doi.org/10.1007/s11182-024-03303-0

10. Samchenko S.V., Zemskova O.V., Kozlova I.V. The efficiency of application of physical and chemical methods on the homogeneous dispersion of carbon nanotubes in water suspension. *Cement-Wapno-Beton*. 2015;XX/LXXXII(5):322–327.

11. Шахова Л.Д., Харченко И.Я., Строкова В.В., Нецвет Д.Д., Калатози Г.М. Особо тонкодисперсные вяжущие (микроцементы) и их применение в строительстве. *Цемент и его применение*. 2023;2:30–36. EDN: IPSJKM

12. Strokova V., Ogurtsova Yu., Gubareva E., Nerovnaya S., Antonenko M. Multifunctional anatase–silica photocatalytic material for cements and concretes. Case Studies in Construction Materials. *Journal of Composites Science*. 2024;8(6):207. https://doi.org/10.3390/jcs8060207

13. Гордина А.Ф., Полянских И.С., Жукова Н.С., Яковлев Г.И. Исследование влияния пуццоланового компонента на структуру и состав модифицированных сульфатных матриц. *Строительные материалы*.2022;8:51–58. https://doi.org/10.31659/0585-430X-2022-805-8-51-58 EDN: YRQTBA

14. Ципинов А.С., Жирикова И.А. Влияние пуццолановой добавки на прочность цементного камня в строительных растворах. *Инженерный вестник Дона*. 2024;6(114):723-730. EDN: RHVRKH

15. Макаров Ю.А., Терешкин И.П., Лукашина С.В. Возможность использования природных цеолитов в качестве минеральной добавки для бетона. *Научный альманах*. 2015;8(10):852–855. https://doi.org/10.17117/na.2015.08.852 EDN: ULGTDF

16. Alexa-Stratulat S.M., Olteanu I., Toma A.-M., Pastia C., Banu O.M., Corbu O.C., Toma I.O. The Use of Natural Zeolites in Cement-Based Construction Materials – A State of the Art Review. *Coatings*. 2023;14(1):18. https://doi.org/10.3390/coatings14010018

17. Serykh A.I., Rozhdestvenskaya N.N. Photoluminescence proper-ties of indium-exchanged zsm-5 zeolite. *Journal of Physical Chemistry C*. 2015;119(31):17612–17618.

18. Итцель-Эрнандес Г., Эрнандес М.А., Портильо Р., Петрановский В.П., Пестряков А.Н., Рубио Э. Иерархическая структура нанопористости мексиканских природных цеолитов типа клиноптилолит. *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. 2018;329(10):107–117. EDN: YNVYEH

19. Морозова Н.Н., Кайс Х.А. Получение высокопрочного мелкозернистого бетона с использованием природного цеолита. *Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета*. 2016;2(36):185–193. EDN: WGXZLH

20. Кайс Х.А., Морозова Н.Н. Свойства природного цеолита для получения высокопрочного мелкозернистого бетона. *Строительные материалы*. 2017:6:63–68. EDN: YUNGVZ

21. Vijay Kumar S. A Study on the Mechanical Properties of Alkali Activated Concrete Using Various Types of Synthetic Zeolites. *Interantional journal of scientific research in engineering and management*. 2023;07(12):1–13. https://doi.org/10.55041/IJSREM27824

22. Tran Y., Lee J., Kumar P., Kim K.H., Lee S.S. Natural Zeolite and Its Application in Concrete Composite Production. *Composites Part B Engineering*. 2019;165:354–364. https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2018.12.084

23. Nguyen-Thoi T., Alemi N., Haido J.H., Shariati M., Baradaran S., Yousif S.T. Reduction of cement consumption by producing smart green concretes with natural zeolites. *Smart Structures and Systems*. 2019;4(3):415–425. https://doi.org/10.12989/sss.2019.24.3.415

24. Puzatova A., Dmitrieva M., Leitsin V., Kogai A., Shinyaeva M. Prospects for the Use of Zeolite in Multicomponent Fine-Grained Concretes. *Proceedings of FORM*. 2022. https://doi.org/10.1007/978-3-031-10853-2_27

25. Aisyah, Erizal E., Putra H. Effectiveness of Zeolite to Desalinate Seawater as Concrete Mixture. *Civil Engineering and Architecture*.2024;12(3):1738–1748. https://doi.org/10.13189/cea.2024.120335.

26. Иванов К.С. Применение цеолитов Якутии для получения гранулированного теплоизоляционного материала. *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. 2021;332(8):160–167. https://doi.org/10.18799/24131830/2021/8/3314 EDN: PQAAHY

ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ИНФОРМАЦИЯ

Авторы заявляют о том, что при подготовке статьи не использовались технологии генеративного искусственного интеллекта и технологии, основанные на искусственном интеллекте.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Самченко Светлана Васильевна – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой Строительного материаловедения, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, Россия, Москва, samchenko@list.ru, https://orcid.org/0000-0002-3523-593X

Козлова Ирина Васильевна – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры Строительного материаловедения, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, Россия, Москва, iv.kozlova@mail.ru, https://orcid.org/0000-0001-8269-5624

Синотова Мария Вячеславовна – аспирант кафедры Строительного материаловедения, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, Россия, Москва, mashasinotova@gmail.com, https://orcid.org/0009-0009-1852-3962

Вовченский Дмитрий Николаевич – магистрант кафедры Строительного материаловедения, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, Москва, Россия, dobrov.dmitry2015@yandex.ru, https://orcid.org/0009-0003-4130-7834

Сироткина Ксения Александровна – студентка бакалавриата кафедры Строительного материаловедения, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, Москва, Россия, ks_sirotkina@mail.ru, https://orcid.org/0009-0001-1291-0429

ВКЛАД АВТОРОВ

Самченко С.В. – научное руководство; итоговые выводы.

Козлова И.В. – научное руководство; итоговые выводы, концепция исследования, написание исходного текста.

Синотова М.В. – концепция исследования; написание исходного текста; проведение экспериментальной части.

Вовченский Д.Н. – проведение экспериментальной части.

Сироткина К.А. – проведение экспериментальной части.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 06.05.2025; одобрена после рецензирования 04.06.2025; принята к публикации 08.06.2025.