

А.М. АБДУЛЛАЕВ¹, С.-А.Ю. МУРТАЗАЕВ^{1,2}, М.А.-В. АБДУЛЛАЕВ¹, М.С. САЙДУМОВ²,
Р.М. АБДУЛЛАЕВ¹

¹ Комплексный научно-исследовательский институт им. Х. И. Ибрагимова Российской академии наук, Грозный, Россия

²Грозненский государственный нефтяной технический университет им. акад. М.Д. Миллионщикова, Грозный, Россия

ВЛИЯНИЕ КОМПЛЕКСНОЙ ДОБАВКИ НА ПОВЕРХНОСТНОЕ НАТЯЖЕНИЕ ВОДЫ И ОСНОВНЫЕ СВОЙСТВА ЦЕМЕНТНОГО КАМНЯ

Аннотация. Обоснована актуальность разработки композиционных строительных материалов на основе природного бентонита месторождений Чеченской Республики. Установлена наноразмерность модификатора на основе бентонитового порошка месторождения Чеченской Республики, в комплексе с гиперпластификатором *Frem Giper S-TB*, посредством применения современных технологий и оборудования. Цель работы - изучение роли поверхностного натяжения бентонитовых суспензий отдельно и в комплексе с гиперпластификатором *Frem Giper S-TB* на прочность и плотность цементного камня, а также их взаимозависимости. В качестве материалов использовались гиперпластификатор *Frem Giper S-TB* (страна производитель Республика Беларусь) и природный бентонит, добываемый в Чеченской Республике. Для проведения экспериментальных исследований в качестве основного вяжущего применялся портландцемент АО «Чеченцемент» ЦEM I 42,5 Н. Показано снижение водоцементного отношения (В/Ц) до 24%, посредством снижения значений поверхностного натяжения воды затворения, использованием комплексного наномодификатора на основе природного сырья. Использование комплексного наномодификатора показало значительное снижение поверхностного натяжения с определением минимума при концентрациях 2-4% от массы воды. Достигнуты минимальные значения поверхностного натяжения воды равные 40-41 мН/м. Установлено, что прочность образца при совместном введении добавок *Frem Giper S-TB* 0,4% и 0,4% бентонитового порошка, по сравнению с контрольным образцом, увеличивается на 22%. Дальнейшее увеличение концентрации бентонита и гиперпластификатора отрицательно влияет на прочностные характеристики цементного камня, что является результатом чрезмерного диспергирования цемента в процессе замешивания модифицированной водой с низким поверхностным натяжением и снижения плотности цементного теста раздвижкой зерен цемента образующими мицеллами с гиперпластификатором *Frem Giper S-TB*.

Ключевые слова: комплексный наномодификатор, поверхностное натяжение, цементный камень, плотность, прочность, экология, мицеллы.

ABDULLAEV A.M.¹, MURTAZAEV S.-A.YU.^{1,2}, ABDULLAEV M.A.-V.¹, SAIDUMOV M.S.²,
ABDULLAEV R.M.¹

¹Integrated Research Institute named after Kh.I. Ibragimov of the Russian Academy of Sciences, Grozny, Russia

²Millionshchikov Grozny State Oil Technical University, Grozny, Russia

POROUS FILLER BASED ON METALLURGICAL SLAG AND LIQUID-GLASS COMPOSITION

Abstract. The relevance of developing composite construction materials based on natural bentonite from deposits in the Chechen Republic is substantiated. The nanoscale size of the modifier based on bentonite powder from the Chechen Republic deposit, in combination with the hyperplasticizer *Frem Giper S-TB*, was confirmed using modern technologies and equipment. The objective of this work is to investigate the role of the surface tension of bentonite suspensions, both individually and in combination with the hyperplasticizer *Frem Giper S-TB*, on the strength and density of cement stone, as

well as their interdependence. The materials used were the hyperplasticizer *Frem Giper S-TB* (manufactured in the Republic of Belarus) and natural bentonite extracted in the Chechen Republic. For the experimental research, Portland cement CEM I 42.5 N produced by JSC «Chechencement» was used as the primary binder. A reduction in the water-cement ratio (W/C) by up to 24% was demonstrated. This was achieved by lowering the surface tension of the mixing water through the use of a complex nanomodifier based on natural raw materials. The use of this complex nanomodifier showed a significant reduction in surface tension, with a minimum identified at concentrations of 2-4% by mass of water.

Minimum surface tension values of 40-41 mN/m were reached. It was established that the strength of the sample with the combined introduction of 0.4% *Frem Giper S-TB* and 0.4% bentonite powder increased by 22% compared to the control sample. A further increase in the concentration of both bentonite and the hyperplasticizer adversely affects the strength characteristics of the cement stone. This is a result of excessive dispersion of cement during the mixing process with modified low-surface-tension water, and a decrease in the density of the cement paste due to the separation of cement grains by the formed micelles of the *Frem Giper S-TB* hyperplasticizer.

Keywords: complex nanomodifier, surface tension, cement stone, density, strength, environmental impact, micelles.

1. Введение

Для достижения однородной структуры и оптимальной плотности бетонов используются различные пластифицирующие добавки, снижающие значение В/Ц, а в частности и показатели поверхностного натяжения воды, цемента, а также других компонентов образуемой системы, что приводит к ее диспергированию в бетонной смеси [1-3]. Однако, как с экономической, так и экологической точки зрения представляет интерес исследование возможности использования дешевых местных природных материалов и модификаторов синтетического происхождения, в качестве наноструктурированных добавок в бетон [4-7].

Поскольку, наноструктурированные добавки являются системами с высокоразвитой поверхностью, очевидна ведущая роль межфазных явлений в процессах формирования их свойств и взаимодействия с цементной матрицей. Основной трудностью в процессе использования наноматериалов является способ введения тонкодисперсного компонента в объем цементной матрицы и равномерность его распределения: именно однородное распределение частиц добавки в цементном композите способствует повышению физико-механических характеристик, интенсифицирует гидратацию минералов цементного клинкера, приводит к получению более прочной и плотной структуры цементного камня [8]. В настоящей работе, авторами предлагается распределение нанодисперсной добавки в воде затворения, с учетом самопроизвольного диспергирования, для более полного распределения по всему объему. Кроме того, известно [9], что процессы диспергирования в водных суспензиях бентонитов, являющейся гидрофильной системой, протекают самопроизвольно.

Сущность самопроизвольного диспергирования заключается в стремлении дисперсной фазы к равномерному распределению по объему системы (как и распределение растворенного вещества в истинных растворах), в которых в процессе самопроизвольного диспергирования способны возникать наноразмерные частицы. Эти частицы могут иметь размеры от нескольких десятков до нескольких сотен нм шириной и длиной, и от 1 до 1,5 нм толщиной [10,11]. Такие частицы могут участвовать в тепловом движении, накапливаться на границе раздела фаз, влиять на величину поверхностного натяжения. Согласно [2,10-12], совместное использование ограниченно растворимых поверхностно-активных веществ в жидких средах должно понизить поверхностное натяжение. Само присутствие наноразмерных частиц определяет характер взаимодействия между суспензией и цементной основой в бетонной смеси, являясь слабыми концентраторами напряжений, вызывающего уплотнение и упрочнение материала [13-16]. В работах [3,17,18] отмечается, что снижение поверхностного натяжения на межфазных границах приводит дисперсионную систему к повышению активности, происходит сглаживание поверхности и уплотнение структуры данной системы.

Целью настоящей работы является изучение роли поверхностного натяжения бентонитовых суспензий отдельно и в комплексе с гиперпластификатором Frem Giper S-TB на прочность и плотность цементного камня, а также их взаимозависимости.

2. Модели и методы

В представленной работе использованы следующие материалы: гиперпластификатор Frem Giper S-TB страна производитель Республика Беларусь; природный бентонит месторождения Чеченской Республики [11]. Для проведения экспериментальных исследований в качестве основного вяжущего применялся портландцемент АО «Чеченцемент» ЦЕМ I 42,5 Н, основные свойства используемого цемента приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Основные свойства цемента

Завод изготовитель и марка	Удельная поверхность м ² /кг	ИГ, %	Плотность, кг/м ³	Сроки схватывания, час-мин.		Активность, Мпа, 28 сут	
				начало	конец	сжатие	изгиб
Чеченцемент ЦЕМ I42,5Н	330	25	3100	2-15	3-40	52,6	6,2

Для измерения поверхностного натяжения, на электронных весах измеряли количество воды и бентонитового порошка. Контролируя на весах, в воду затворения микропипеткой DV 100 добавляли гиперпластификатор Frem Giper S-TB, и тщательно перемешивали на магнитной мешалке ПЭ-6110 в течение 1 мин. Бентонитовую суспензию готовили следующим образом: взвешивали 120г воды, количество бентонита определяли по расчету концентрации компонентов (от 1 до 6%), и тщательно перемешивали на магнитной мешалке ПЭ-6110 в течение 1 мин. Полученную суспензию подвергали ультразвуковому воздействию на установке ИЛ100-6/2 в течение 10 сек. Измерения поверхностного натяжения проводили методом висящей капли на тензиометре DSA100 фирмы «Kruss» Германия [11]. Погрешность измерения поверхностного натяжения – менее 1%. На полученной воде готовили цементное тесто нормальной густоты по шесть замесов для каждой серии образцов. При этом содержание бентонита в воде увеличивалось с шагом 0,2% масс от цемента. Составы цементного теста и воды подбирались для каждого компонента отдельно, а для их комплексного использования по аналогии. Нормальную густоту цементного теста определяли по ГОСТ 310.3-76 «Цементы. Методы определения нормальной густоты и сроков схватывания». Плотность цементного камня определяли гидростатическим взвешиванием по ГОСТ 12730.1-2002 Бетоны. Методы определения плотности.

Образцы для получения цементного камня изготавливали в стандартных металлических формах-кубах размером ребра 20 мм. Изготовленные образцы извлекали из форм и до испытания на прочность хранили при нормальных условиях, в течение 28 суток. Предел прочности цементного камня при сжатии определяли механическим разрушающим способом на испытательной машине FS150AT.

3. Результаты исследования и их анализ

Известно, что природные бентониты состоят из частиц твердой фазы размерами 100-1000 нм, а для наноструктурированной добавки в бетоны необходимы частицы размерами порядка 10 – 150 нм. Поэтому, с целью диспергирования, исследуемые образцы водных суспензий бентонита были подвергнуты ультразвуковому воздействию в течение 10 – 15 сек (частота 19,5 кГц, амплитуда переменного звукового давления 6 атм, амплитуда колебаний

частиц 2,42 мкм, амплитуда ускорения частиц $3,6 \times 10^4$ м/с²). Проведенные исследования показали, что ультразвуковое воздействие приводит к повышению коэффициентов устойчивости коагуляционной структуры в 1,2 — 1,5 раза, то есть, идет пептизация супензии, свидетельствующее о влиянии ультразвука на структурно-механические показатели бентонита.

Измерения поверхностного натяжения образцов супензии бентонитов отдельно и в комплексе с гиперпластификатором Frem Giper S-TB проводились при температуре 293К. Полученные результаты представлены на рисунке 1.

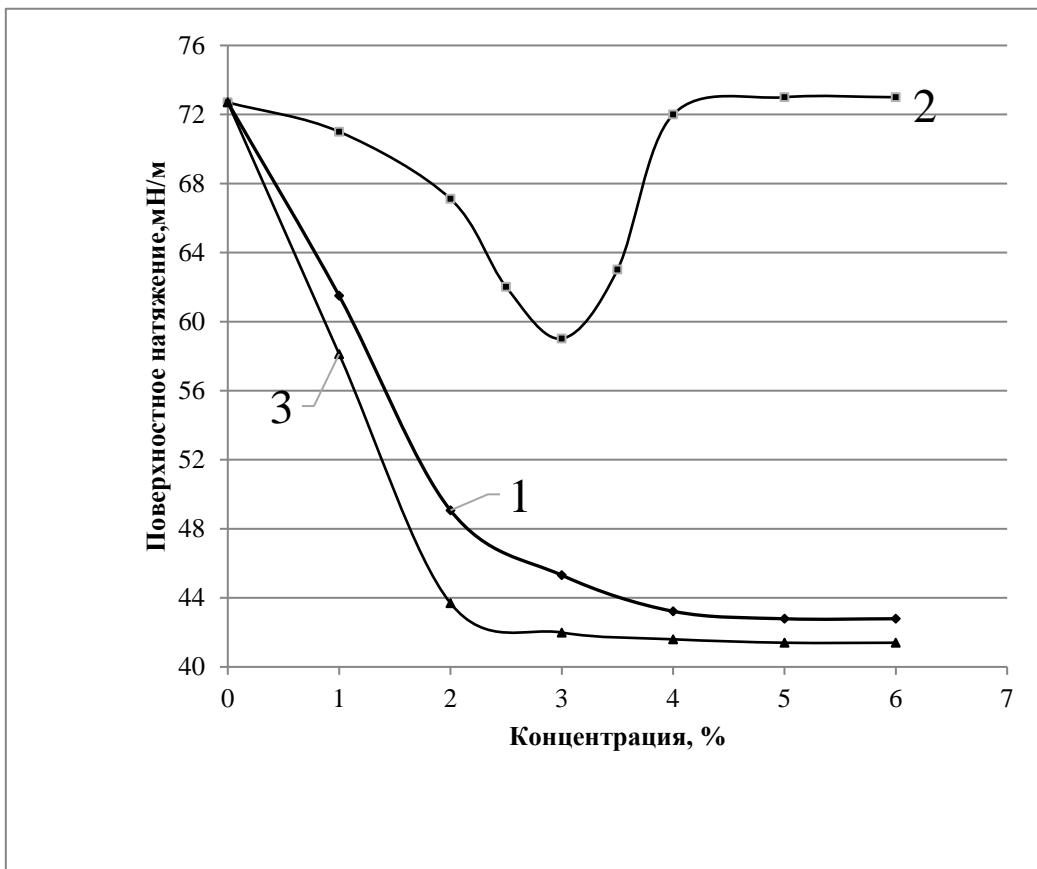


Рисунок 1 – Изотермы поверхностного натяжения:

1-Frem Giper S-TB в воде; 2-бентонитовой супензии в воде; 3-бентонитовой супензии в комплексе с Frem Giper S-TB в воде

Как показали исследования, на изотермах поверхностного натяжения при концентрации 3% масс наблюдается экстремум (изотерма 2). Монотонное снижение поверхностного натяжения до 3% массы твердой фазы позволяет сделать предположение о максимальном накоплении частиц бентонита коллоидных размеров в межфазном слое - левая часть изотермы 2. Изотерма 3 показывает, что при комплексном использовании Frem Giper S-TB с бентонитовым порошком поверхностное натяжение снижается с увеличением концентрации гиперпластификатора и бентонита интенсивнее, чем при отдельном использовании Frem Giper S-TB в воде (изотерма 1) и достигает своего минимума при концентрации 2 % масс бентонита и Frem Giper S-TB в воде. При начальной концентрации до 2% твердой фазы в супензии бентонита наблюдается снижение величины поверхностного натяжения на 10-12 мН/м, что подтверждает эффективность высокодисперсного бентонита. Появление горизонтального участка в изотермах 1 и 3, при увеличении концентрации гиперпластификатора Frem Giper S-TB и бентонита, можно предположить результатом объединения их молекул в ассоциаты в виде мицелл.

С целью изучения влияния наноразмерных добавок бентонита и бентонита в комплексе с ПАВ, при изменении значений поверхностного натяжения воды затворения, на физико-

механические свойства цементного камня были изучены их прочностные свойства (см. таблица 2).

Таблица 2 – Свойства цементного камня, полученного с использованием наноструктурированных компонентов и гиперпластификатора

Расход цемента, г	FremGiper S-TB, % мас. от цемента	Концентрация бентонитового порошка, % мас. от цемента	Поверхностное натяжение МН/м	Нормальная густота (НГ), %	Плотность цементного камня, г/см ³	Прочность на сжатие, МПа
1	2	3	4	5	6	7
1 500	-	-	72,7	23,25	2,18	112,5
2 500	-	0,2	71,0	23,25	2,204	117,4
3 500	-	0,4	67,1	23,25	2,2	121,9
4 500	-	0,6	62	24,2	2,16	120,5
5 500	-	0,8	60,1	25,3	2,16	114,3
6 500	-	1,0	72	26,8	2,11	114,8
7 500	0,2	-	63,1	21,2	2,28	122,4
8 500	0,4	-	49,1	19,6	2,32	127,6
9 500	0,6	-	45,3	18,4	2,32	132,9
10 500	0,8	-	42,79	18,25	2,32	131,3
11 500	1,0	-	42,75	18,25	2,32	130,2
12 500	0,2	0,2	56,7	18,5	2,35	133,6
13 500	0,4	0,4	43,1	17,6	2,35	137,2
14 500	0,6	0,6	41,6	17,75	2,35	136,8
15 500	0,8	0,8	41,4	17,8	2,35	132,1
16 500	1,0	1,0	41,4	17,8	2,34	128,2

В результате введения порошкообразного природного бентонита (см. таблица 2), прочность на сжатие исследуемых образцов значительно отличается от контрольных (состав 1). Прочность образца, при совместном введении добавок Frem Giper S-TB 0,4% и 0,4% бентонитового порошка, по сравнению с контрольным образцом увеличивается на 22%. Очевидно, это связано со значительным увеличением плотности такого образца от 2,18 г/см³ у контрольного до 2,35 г/см³ при модифицировании комплексной добавкой. Максимальное значение плотности и прочности исследуемых образцов цементного камня достигается в диапазоне концентрации бентонита 2,28 - 3,38 % в воде затворения.

Для более глубокого анализа, данные по прочности при сжатии и плотности цементного камня, в зависимости от концентрации бентонита в составе комплексной добавки (см. таблица 2) и результаты определения поверхностного натяжения суспензии бентонита представлены на рисунке 2.

Пример расчета концентрации комплексной добавки бентонита и Frem Giper S-TB в воде затворения цементного теста нормальной густоты для 13 строки из таблицы 2: $((0,4+0,4)*100\%)/17,6=4,545\text{г}$.

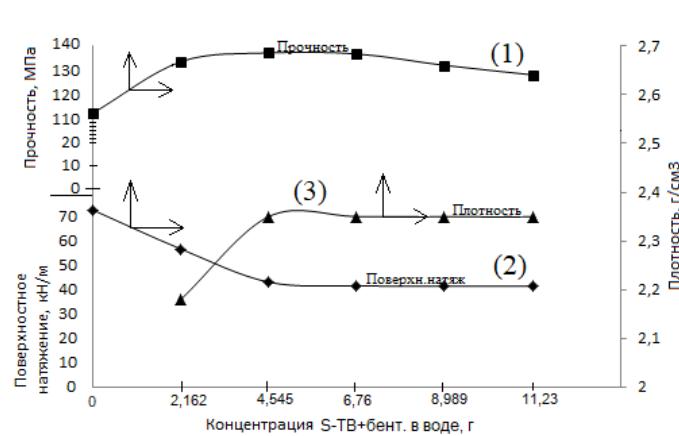


Рисунок 2 – Зависимость поверхностного натяжения воды затворения, плотности и прочности на сжатие цементного камня от концентрации твердой фазы бентонита:
(1) – зависимость прочности на сжатие цементного камня от концентрации бентонита в составе комплексной добавки; (2) – зависимость поверхностного натяжения от концентрации бентонита в суспензии; (3) – зависимость изменения плотности цементного камня (из цементного теста нормальной густоты) от концентрации бентонита в составе комплексной добавки

По изотерме 2 поверхностного натяжения видно наступление ККМ (критической концентрации мицеллообразования) при содержании в воде затворения цементного теста нормальной густоты комплексной добавки бентонит+Frem Giper S-TB 4,545г в 100г воды. Дальнейшее увеличение концентрации этой добавки в воде затворения цементного теста отрицательно влияет на прочность и плотность цементного камня, о чем свидетельствуют приведенные выше графики (рис.2).

Приведенные графики указывают на взаимосвязь между величиной поверхностного натяжения воды в присутствии комплексной добавки (бентонит- Frem Giper S-TB) а также прочностью на сжатие и плотностью цементного камня, изготовленного с применением той же добавки.

Нормальная густота цементного теста при введении бентонитового порошка изменяется незначительно. Однако, при комплексном использовании бентонита с Frem Giper S-TB это значение отличается от контрольного на 24%. Прочность образцов, изготовленных с использованием в качестве добавки бентонитового порошка, превышает значения контрольного на 8,4%. Очевидно, это связано с изменением значений поверхностного натяжения при комплексном использовании гиперпластификатора и бентонитовой глины, где оно снижается эффективнее, чем при использовании каждого из этих добавок по отдельности. Это приводит к выполнению условий устойчивости граничных пленок жидкой фазы [19] при ее утончении согласно формуле 1:

$$\frac{\partial \Pi}{\partial h} < -\frac{m\sigma}{(r+h)^2} \quad (1)$$

где $m=2$ - площадь сечения сферы (для выпуклых сферических частиц); σ – поверхностное натяжение воды; r - радиус частиц; h - толщина пленки жидкости; Π - расклинивающее давление

Из этого следует, что снижение поверхностного натяжения от 72,7 мН/м до 42 мН/м, при комплексном использовании Frem Giper S-TB и наночастиц бентонитового порошка, позволяет уменьшить толщину пленки на выпуклых поверхностях частиц с сохранением устойчивости этой пленки. Это позволяет фиксировать частицы дисперсной фазы в дисперсионной среде на близких расстояниях (h). Дальнейшее увеличение концентрации обоих составляющих отрицательно влияет на прочностные характеристики цементного камня, что, по предположению авторов настоящей работы, является результатом чрезмерного диспергирования цемента в процессе замешивания модифицированной водой с низким поверхностным натяжением. Появление горизонтального участка в изотермах 1 и 3 (рис.1), при увеличении концентрации гиперпластификатора Frem Giper S-TB и бентонита, а также снижение плотности и прочности (графики 1 и 3) из рис. 2, можно предположить результатом объединения их молекул в ассоциаты в виде мицелл.

4. Заключение

1. Снижение поверхностного натяжения воды затворения посредством применения добавок Frem Giper S-TB и бентонитового порошка, как в комплексе, так и в отдельности, эффективно отражается на механических свойствах цементного камня. Доказано увеличение прочности при сжатии цементного камня при комплексном использовании представленных добавок на 22% по сравнению с контрольным составом.

2. Показано снижение водоцементного отношения до 24% посредством снижения значений поверхностного натяжения воды затворения использованием комплексного наномодификатора на основе природного сырья. Использование комплексного наномодификатора показало значительное снижение поверхностного натяжения с определением минимума при концентрациях 2-4% от массы воды. Достигнуты минимальные значения поверхностного натяжения воды равные 40-41 мН/м.

3. Показана взаимосвязь между поверхностным натяжением бентонитовой суспензии, плотностью и прочностью цементного камня на ее основе. На основании полученных результатов, комплексная добавка на основе нанопорошка бентонита и Frem Giper S-TB может быть рекомендована в качестве модификатора для повышения прочностных свойств цементного камня с наложением ограничений по концентрации.

5. Благодарности

Работа выполнена в рамках государственного задания ГГНТУ им. акад. М.Д. Миллионщикова FZNU-2024-0003 "Разработка комплекса низкоуглеродных технологий повышения продуктивности и секвестрационного потенциала экосистемы на урбанизированных территориях с получением вторичных композиционных материалов полифункционального назначения".

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ребиндер П.А. Поверхностные явления в дисперсных системах // Физикохимическая механика. Москва: Наука, 1979. С. 246-250.
2. Данилов В.Е., Айзенштадт А.М., Королев Е.В., Шаманина А.В., Гарамов Г.А. Методические аспекты определения поверхностного натяжения минеральных порошковых систем с использованием компактов //Физика и химия обработки материалов. 2024. № 4. С. 47-64.
3. Данилов В.Е., Королев Е.В., Айзенштадт А.М., Строкова В.В. Особенности расчета свободной энергии поверхности на основе модели межфазного взаимодействия Оунса-Вендта-Рабеля-Кельблэ // Строительные материалы. 2019. № 11. С. 66-72. DOI: 10.31659/0585-430X-2019-776-11-66-72
4. Абдуллаев Р.М., Абдуллаев А.М., Абдуллаев М.А.В. Нанопорошок и его влияние на физико-механические свойства цементного камня // Известия высших учебных заведений. Строительство. 2022. № 7 (763). С. 59-67.
5. Korolev E.V., Grishina A.N., Inozemtcev A.S., Ayzenshtadt A.M. Study of the kinetics structure formation of cement dispersed systems. Part II. Nanotechnologies in Construction. 2022; 14(4): 263–273. <https://doi.org/10.15828/2075-8545-2022-14-4-263-274>.
6. Жегера К.В., Лавров И.Ю., Трощев Д.В. Оптимизация синтеза наноструктурирующей добавки для применения в рабочей смеси 3D-принтера. Региональная архитектура и строительство. 2024;2(59):60-65. DOI: 10.54734/20722958
7. Жегера К.В., Дасаева Н.А. Разработка состава бетонной смеси с применением наноструктурирующей добавки для 3d-печати малых архитектурных форм. Нанотехнологии в строительстве: научный интернет-журнал. 2025. Т. 17. № 1. С. 14-22.
8. Козлова И.В., Дударева М.О. Варианты введения тонкодисперсной добавки на основе системы TiO₂-Bi₂O₃ в цементные композиции. Нанотехнологии в строительстве: научный интернет-журнал. 2024. Т. 16. № 2. С. 90-99.
9. Дадашев Р.Х., Джамбулатов Р.С., Элимханов Д.З., Дадашев И.Н. Методика измерения поверхностного натяжения суспензии бентонитов. Журнал физической химии. 2020. Т. 94. № 7. С. 1114-1118.
10. Абдуллаев М.А.В., Абдуллаев А.М., Абдуллаев Р.М. Высокопрочные мелкозернистые бетоны на основе комплексной нанодобавки. Известия высших учебных заведений. Строительство. 2024. № 6 (786). С. 78-93.
11. Дадашев Р.Х., Межидов В.Х., Джамбулатов Р.С., Элимханов Д.З. О природе особенностей изотерм поверхностного натяжения водных суспензий бентонитов. Известия Российской академии наук. Серия физическая. 2014. Т. 78. № 4. С. 433.
12. Фролов Ю.Г. Курс коллоидной химии. Поверхностные явления и дисперсные системы. 1982. 400 с.
13. Панин В.Е., Дерюгин Е.Е., Кульков С.Н. Мезомеханика упрочнения материалов нанодисперсными включениями // Прикладная механика и техническая физика, 2010. №4, сс. 127-142.
14. Старченко С.А., Полуэктова В.А., Шаповалов Н.А., Кожанова Е.П. Получение комплексной органоминеральной добавки на основе флогоглюцинтурфурольного олигомера и наночастиц диоксида кремния. Нанотехнологии в строительстве: научный интернет-журнал. 2024. Т. 16. № 5. С. 447-462.
15. Пухаренко Ю.В., Аубакирова И.У., Хирхасова В.И. Целлюлоза в бетоне: новое направление развития строительной нанотехнологии // Строительные материалы. 2020. № 7. С. 39-44. -DOI: 10.31659/0585-430X-2020-782-7-39-44
16. Королев Е.В., Гришина А.Н., Данилов А.М., Айзенштадт А.М. Системный анализ эволюции знаний о структурообразовании строительных материалов. Промышленное и гражданское строительство. 2024. № 9. С. 18-27.
17. Смирнов А.Н. Определение изотерм поверхностного натяжения границ зерен на основе адсорбционных измерений // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования, 2005. №5. сс. 93-96.
18. Щукин Е.Д., Перцов А.В., Амелина Е.А. Коллоидная химия. - М.: Издательство Московского университета, 1982. - 348 с.
19. Дерягин Б.В. Теория устойчивости коллоидов и тонких плёнок. М.: Наука, 1986.

REFERENCES

1. Rebinder P.A. Poverhnostnye yavleniya v dispersnyh sistemah [Surface phenomena in dispersed systems] *Physico-chemical mechanics*. Moscow: Nauka Publ., 1979, pp. 246-250 (rus).
2. Danilov V.E., Aisenstadt A.M., Korolev E.V., Shamanina A.V., Garamov G.A. Metodicheskie aspekty opredeleniya poverhnostnogo natyazheniya mineral'nyh poroshkovyh sistem s ispol'zovaniem kompaktov [Methodological aspects of determining the surface tension of mineral powder systems using compacts] *Physics and Chemistry of materials processing*. 2024. No. 4. pp. 47-64 (rus).
3. Danilov V.E., Korolev E.V., Aisenstadt A.M., Strokoval V.V. Osobennosti rascheta svobodnoj energii poverhnosti na osnove modeli mezhfaznogo vzaimodejstviya Ounsa-Vendta-Rabelya-Kel'ble [Features of calculating the free energy of a surface based on the Oons-Wendt-Rabel-Kjellbl interfacial interaction model] *Building materials*. 2019. No. 11. pp. 66-72. DOI: 10.31659/0585-430X-2019-776-11-66-72 (rus).
4. Abdullaev R.M., Abdullaev A.M., Abdullaev M.A.V. Nanoporoshok i ego vliyanie na fiziko-mekhanicheskie svojstva cementnogo kamnya [Nanopowder and its effect on the physico-mechanical properties of cement stone] *News of higher educational institutions. Construction*. 2022. No. 7 (763). pp. 59-67 (rus).
5. Korolev E.V., Grishina A.N., Inozemtcev A.S., Ayzenshtadt A.M. Study of the kinetics structure formation of cement dispersed systems. Part II. Nanotechnologies in Construction. 2022; 14(4): 263–273. <https://doi.org/10.15828/2075-8545-2022-14-4-263-274>.
6. Zhegera K.V., Lavrov I.Yu., Troschnev D.V. Optimizaciya sinteza nanostrukturiruyushchej dobavki dlya primeneniya v rabochej smesi 3D-printera [Optimization of the synthesis of a nanostructuring additive for use in the working mixture of a 3D printer]. *Regional architecture and construction*. 2024; 2(59):60-65. DOI: 10.54734/20722958 (rus).
7. Zhegera K.V., Dasaeva N.A. Razrabotka sastava betonnoj smesi s primeneniem nanostrukturiujuayshchey dobavki dlya 3d-pechati malyh arhitekturnykh form [Development of the composition of a concrete mixture using a nanostructuring additive for 3D printing of small architectural forms] *Nanotechnology in construction: scientific online journal*. 2025. Vol. 17. No. 1. pp. 14-22 (rus).
8. Kozlova I.V., Dudareva M.O. Varianty vvedeniya tonkodispersnoj dobavki na osnove si-stemy TiO₂-Bi₂O₃ v cementnye kompozicii [Options for introducing a finely dispersed additive based on the TiO₂-Bi₂O₃ system into cement compositions] *Nanotechnology in construction: scientific online journal*. 2024. Vol. 16. No. 2. pp. 90-99 (rus).
9. Dadashev R.H., Dzhambulatov R.S., Elimkhanov D.Z., Dadashev I.N. etodika izmereniya poverhnostnogo natyazheniya suspenzii bentonitov [Method of measuring the surface tension of bentonite suspension] *Journal of Physical Chemistry*. 2020. Vol. 94. No. 7. pp. 1114-1118 (rus).
10. Abdullaev M.A.V., Abdullaev A.M., Abdullaev R.M. Vysokoprochnye melkozernistye betony na osnove kompleksnoj nandobavki [High-strength fine-grained concretes based on complex nano-additives] *News of higher educational institutions. Construction*. 2024. No. 6 (786). pp. 78-93 (rus).
11. Dadashev R.Kh., Mezhidov V.Kh., Dzhambulatov R.S., Elimkhanov D.Z. O prirode osobennostej izoterm poverhnostnogo natyazheniya vodnyh suspenzij bentonitov [On the nature of the surface tension isotherms of aqueous bentonite suspensions] *Proceedings of the Russian Academy of Sciences. The series is physical*. 2014. Vol. 78. No. 4. P. 433. (rus).
12. Frolov Yu.G. Kurs kolloidnoj himii [Course of colloidal chemistry. Surface phenomena and dispersed systems]. 1982. 400 p. (rus).
13. Panin V.E., Deryugin E.E., Kulkov S.N. Mezomechanika uprochneniya materialov nanodispersnymi vkl'yucheniymi [Mesomechanics of hardening materials with nanodisperse inclusions] *Applied Mechanics and Technical Physics*, 2010. No. 4, pp. 127-142. (rus).
14. Starchenko S.A., Poluektova V.A., Shapovalov N.A., Kozhanova E.P. Poluchenie kompleksnoj organomineral'noj dobavki na osnove floroglyucinfurfurol'nogo oligomera i nanochastic dioksida kremniya [Obtaining complex organomineral additives based on phloroglucinifurfural oligomer and silicon dioxide nanoparticles] *Nanotechnology in construction: scientific online journal*. 2024. Vol. 16. No. 5. pp. 447-462. (rus).
15. Pukharenko Yu.V., Aubakirova I.U., Hirkhasova V.I. Cellyuloza v betone: novoe napravlenie razvitiya stroitel'noj nanotekhnologii [Cellulose in concrete: a new direction in the development of construction nanotechnology] *Building materials*. 2020. No. 7. pp. 39-44. -DOI: 10.31659/0585-430X-2020-782-7-39-44(rus).
16. Korolev E.V., Grishina A.N., Danilov A.M., Aisenstadt A.M. Sistemnyj analiz evolyucii znanij o strukturoobrazovanii stroitel'nyh materialov [A systematic analysis of the evolution of knowledge about the structure formation of building materials] *Industrial and civil engineering*. 2024. No. 9. pp. 18-27. (rus).
17. Smirnov A.N. Opredelenie izoterm poverhnostnogo natyazheniya granic zeren na osnove adsorbcionnyh izmerenij [Determination of surface tension isotherms of grain boundaries based on adsorption measurements] *Surface. X-ray, synchrotron and Neutron Research*, 2005. No. 5. pp. 93-96. (rus).
18. Shchukin E.D., Pertsov A.V., Amelina E.A. Kolloidnaya himiya [Colloidal Chemistry]. Moscow: Moscow University Press, 1982. 348 p. (rus).
19. Deryagin B.V. Teoriya ustojchivosti kolloidov i tonkih plynok [Theory of stability of colloids and thin films]. Moscow: Nauka Publ., 1986 (rus).

Информация об авторах

Абдуллаев Абухан Магомедович

Комплексный научно-исследовательский институт им. Х.И. Ибрагимова Российской академии наук (КНИИ РАН), Грозный, Россия, научный сотрудник,
E-mail: han-100@mail.ru

Муртазаев Сайд-Альви Юсупович

Грозненский государственный нефтяной технический университет имени академика М.Д. Миллионщикова, Грозный, Россия, д-р техн. наук, проф., зав. кафедрой «Технология строительного производства», E-mail: s.murtazaev@mail.ru

Абдуллаев Магомед Абдул-Вахабович

Комплексный научно-исследовательский институт им. Х.И. Ибрагимова Российской академии наук (КНИИ РАН), Грозный, Россия, научный сотрудник,
E-mail: mgdaa@mail.ru

Сайдумов Магомед Саламович

Грозненский государственный нефтяной технический университет имени академика М.Д. Миллионщикова, Грозный, Россия, канд. техн. наук, доцент кафедры «Технология строительного производства», E-mail: saidumov_m@mail.ru

Абдуллаев Рамзан Магомедович

Комплексный научно-исследовательский институт им. Х.И. Ибрагимова Российской академии наук (КНИИ РАН), Грозный, Россия, аспирант,
E-mail: ramzan007abd@mail.ru

Information about authors

Abdullaev Abukhan M.

Integrated Research Institute named after Kh.I. Ibragimov of the Russian Academy of Sciences, Grozny, Russia
Researcher,
E-mail: han-100@mail.ru

Murtazaev Sayd-Alvi Y.

Millionshchikov Grozny State Oil Technical University, Grozny, Russia
Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department "Technology of Construction Production",
E-mail: s.murtazaev@mail.ru

Abdullaev Magomed Abdul-Vakhabovich

Integrated Research Institute named after Kh.I. Ibragimov of the Russian Academy of Sciences, Grozny, Russia
Researcher,
E-mail: mgdaa@mail.ru

Saidumov Magomed S.

Millionshchikov Grozny State Oil Technical University, Grozny, Russia
candidate in tech. sc., docent of the Department of "Technology of Construction Production",
E-mail: saidumov_m@mail.ru

Abdullaev Ramzan M.

Integrated Research Institute named after Kh.I. Ibragimov of the Russian Academy of Sciences, Grozny, Russia
postgraduate student,
E-mail: ramzan007abd@mail.ru

Статья поступила в редакцию 30.08.2025

Одобрена после рецензирования 23.09.2025

Принята к публикации 01.10.2025

The article was submitted 30.08.2025

Approved after reviewing 23.09.2025

Accepted for publication 01.10.2025