

Научная статья

УДК 691.32

<https://doi.org/10.24866/2227-6858/2025-1/155-165>

Влияние модифицирования цементной матрицы тонкодисперсной минеральной добавкой на её характеристики

Лилия Владимировна Ильина✉, Сергей Михайлович Анпилов, Денис Анатольевич Цекарь

Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет,
Новосибирск, Российская Федерация

✉ nsklika@mail.ru

Аннотация. В статье рассмотрено изменение количества гидратных новообразований при модифицировании цементной системы тонкодисперсной минеральной добавкой, которое позволяет понять причины ускорения процесса схватывания цементной матрицы при введении в неё добавки. В качестве модифицирующей добавки предлагается тонкодисперсный порошок гидратированного цемента, измельчённого при различной продолжительности (30 и 45 сек, 1, 3 и 5 мин) в мельнице планетарного типа АГО-2. Моделирование состава цементной матрицы и технологических параметров диспергирования минеральной добавки осуществлялось методом многофакторного планирования эксперимента. В результате получены модели зависимости сроков схватывания цементной системы от продолжительности помола и количества добавки. Результатами комплексного термического анализа констатирована более глубокая гидратация цементных систем при введении исследуемой тонкодисперсной добавки. Глубокая гидратация цементных систем объясняет ускорение процесса её схватывания при введении предложенной авторами добавки.

Ключевые слова: сроки схватывания, минеральная добавка, гидратированный цемент, продолжительность помола

Для цитирования: Ильина Л.В., Анпилов С.М., Цекарь Д.А. Влияние модифицирования цементной матрицы тонкодисперсной минеральной добавкой на её характеристики // Вестник Инженерной школы Дальневосточного федерального университета. 2025. № 1(62). С. 155–165.

CONSTRUCTION MATERIALS AND PRODUCTS

Original article

Influence of modification of cement matrix with fine mineral additive on its characteristics

Liliia V. Iliina✉, Sergey M. Anpilov, Denis A. Tsekar

Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering,
Novosibirsk, Russian Federation

✉ nsklika@mail.ru

Abstract. The article considers the change in the amount of hydrate neoplasms when modifying a cement system with a finely dispersed mineral additive, which allows us to understand the reasons for the acceleration of the cement matrix setting process when the additive is introduced into it. A finely dispersed powder of hydrated cement, ground at different durations (30 and 45 sec, 1, 3 and 5 min) in an AGO-2 planetary mill, is proposed as a modifying additive. The modeling of the cement matrix composition and the technological parameters of the mineral additive dispersion was carried out using the method of multifactorial experimental planning. As a result, models were obtained for the dependence of the setting time of the cement system on the grinding duration and the amount of additive. The results of a comprehensive thermal analysis revealed a deeper hydration

of cement systems when the studied finely dispersed additive was introduced. Deep hydration of cement systems explains the acceleration of the setting process when the additive proposed by the authors was introduced.

Keywords: setting time, mineral additive, hydrated cement, grinding time

For citation: Ilina L.V., Anpilov S.M., Tsekar D.A. Influence of modification of cement matrix with fine mineral additive on its characteristics. *FEFU: School of Engineering Bulletin*, 2025, no. 1(62), pp. 155–165. (In Russ.).

Введение

Основополагающей целью в технологии тяжёлых бетонов является улучшение эксплуатационных характеристик бетонов и технологических свойств бетонных смесей путём совмещения процессов химического взаимодействия с процессами формирования межагрегатных связей, в которых наряду с цементными минералами участвует материал добавок [1–10]. К решению данной цели может привести модифицирование цементных систем нано- и микродисперсными минеральными добавками [11–18].

Введение дисперсных минеральных добавок позволяет получать бетоны, обладающие повышенными эксплуатационными свойствами при сохранении расхода портландцемента, или снизить расход вяжущего вещества при получении цементных композитов с требуемыми свойствами, либо ускорить процессы гидролиза и гидратации клинкерных минералов и сократить тем самым продолжительность и температуру тепловлажностной обработки или полностью отказаться от неё. Влияние минеральных добавок на формирование кристаллогидратов, микроструктуру и свойства цементных систем при этом определяется:

- химическим и минералогическим составом как портландцемента, так и самой добавки [6, 9, 11–14, 19–22];
- удельной поверхностью и технологическими параметрами режима твердения цементного композита [6, 8, 11, 12, 15, 23–26].

Эффективными упрочняющими и ускоряющими добавками, влияющими на микроструктуру цементной системы, могут выступать тонкодисперсные минеральные добавки, которые могут быть как активными (микрокремнезём, зола-унос, шлак и др.), так и инертными (дисперсные порошки).

На основании закона подобия [14, 27–29, 30] выбор добавок должен определяться близостью их термодинамических характеристик и химического состава с минералами клинкера и, следовательно, возможностью данных добавок выступать подложками для кристаллизации гидратных новообразований [21, 31, 32]. Результатом их введения в систему является ускорение гидратации и набор ранней прочности портландцемента [15, 26–28, 33, 34].

Так как наибольшего упрочнения цементной матрицы можно достичь при наименьшей пустотности между частицами добавки и вяжущего, то ряд учёных указывает на необходимость контроля размерности их зёрен [34–37].

Таким образом, при выборе дисперсных минеральных добавок необходимо сопоставлять их химический и минеральный состав и энергетические характеристики с клинкерными минералами и гидратными новообразованиями. Количество добавки при этом будет определяться её дисперсностью.

Целью работы явилась разработка научно обоснованного технологического решения, обеспечивающего получение быстросхватывающихся и быстротвердеющих цементных систем путём введения тонкодисперсного модификатора (гидратированного цемента), выступающего центром кристаллизации кристаллогидратов вследствие химического сродства гидратированного цемента с клинкерными минералами.

Материалы и методы

В качестве вяжущего вещества в работе использовался портландцемент ЦЕМ I 42,5Н ООО «Ачинский цемент» (г. Ачинск, Красноярский край), который имел следующий минеральный состав: C_3S – 67 %, C_2S – 11 %, C_3A – 5 %, C_4AF – 13 %. Химический состав клинкера, по данным производителя, приведён в табл. 1.

Таблица 1 / Table 1

Химический состав портландцементного клинкера, % мас.
Chemical composition of Portland cement clinker, % by weight

CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	SO ₃	R ₂ O _{общ}	CaO _{св}	Cl ⁻	Нерастворимый остаток	п.п.п.
62,68	20,15	4,43	3,79	3,32	2,45	1,00	0,14	0,032	0,29	1,19

Дисперсная минеральная добавка изготавливалась путём помола цементного камня, полученного из цементного теста нормальной густоты из цемента ЦЕМ I 42,5Н ООО «Ачинский цемент». Цементный камень твердел при этом 28 суток в стандартных условиях.

Измельчение минеральной добавки осуществлялось в мельнице-активаторе планетарного типа АГО-2. Для определения дисперсности частиц применялся лазерный анализатор размеров частиц Shimadzu (Шимадзу) SALD-7500 nano, оборудованный проточной ячейкой SALD-MS75. Дисперсионной средой являлась дистиллированная вода. Суспензия воды и минерального порошка приготавливалась на ультразвуковом диспергаторе мощностью 40 Вт при частоте 32 кГц. Продолжительность перемешивания составляла 5 минут. Показатель преломления порошок/дисперсионная среда составлял 1,33. Тип распределения – объёмное распределение.

Комплексный термический анализ проводился на синхронном термическом анализаторе STA 409 PC/PG Netzsch (Германия) в атмосфере азота при скорости нагрева 20/10,0 К/мин. Термогравиметрический анализ выполнен в интервале 30–1000 оС с использованием термовесов Netzsch TG 209 F1. Для трактовки полученных эффектов использовался справочник В.С. Горшкова, В.В. Тимашева, В.Г. Савельева [38].

Для приготовления цементного теста полученную добавку вводили в портландцемент в сухом состоянии, перемешивали, после чего сухая смесь затворялась водой. Моделирование состава цементной матрицы и технологических параметров диспергирования минеральной добавки осуществлялось методом многофакторного планирования эксперимента.

Планирование, результаты и обсуждение эксперимента

Для определения оптимального размера частиц дисперсной минеральной добавки и влияния дисперсности добавки и её количества на сроки схватывания цементных систем измельчение добавки проводили в течение 30 и 45 сек, 1, 3 и 5 мин. Результаты по изменению дисперсности добавки от продолжительности помола приведены в табл. 2. Контрольный состав – это измельчённый в ступке гидратированный цемент до дисперсности, позволяющей пройти ему через сито № 008.

Таблица 2 / Table 2

Зависимость дисперсности минеральной добавки от продолжительности помола
Dependence of the dispersion of the mineral additive on the duration of grinding

Продолжительность помола	Средний размер частиц добавки, мкм
Контрольный состав	45,300
30 секунд	17,444
45 секунд	13,009
1 минута	5,867
2 минуты	5,061
3 минуты	3,569
5 минут	4,271
7 минут	4,324
9 минут	3,939
11 минут	3,767

Анализируя изменение дисперсности добавки от продолжительности помола, следует отметить, что наименьшей дисперсностью обладают частицы добавки, измельчённые в течение

ние трёх минут. Дальнейшее измельчение, по-видимому, приводит к агломерации частиц, в результате чего диаметр увеличивается.

Далее проводили оценку влияния дисперсности и количества минеральной добавки на сроки схватывания цементного теста (табл. 3). Для этого минеральную добавку измельчали в течение 30, 45 секунд и 1, 3 и 5 минут. Для получения объективных данных необходимо объединить полученные модели процесса схватывания. Для этого продолжительность помола была приведена к единой шкале: 30 секунд = 0,5 минуты; 45 секунд = 0,75 минуты.

Анализ данных, приведённых в табл. 3, показал, что наименьшими сроками схватывания обладает цементное тесто с введённой тонкодисперсной добавкой в количестве 1 мас. %, измельчённой в течение 1 минуты. Начало схватывания составило 35 минут (сократилось в 4 раза), конец схватывания составил 90 минут (сократился в 2,3 раза).

Таблица 3 / Table 3

Влияние продолжительности помола добавки на сроки схватывания цементного теста

The effect of additive grinding duration on the setting time of cement paste

Характеристика минеральной добавки		Сроки схватывания, мин	
количество, мас. % от ПЦ	продолжительность помола добавки, мин	начало	конец
0	-	140	205
1	0,5	120	180
1	0,75	90	130
1	1	35	90
1	3	55	130
1	5	85	150
3	0,5	100	160
3	0,75	80	115
3	1	45	110
3	3	65	140
3	5	80	150
5	0,5	110	145
5	0,75	70	105
5	1	50	120
5	3	75	155
5	5	110	170

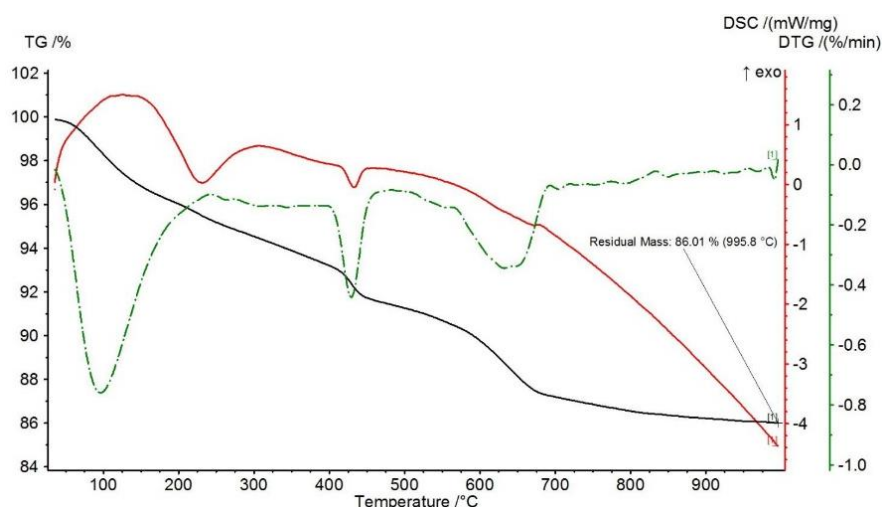


Рис. 1. Кривые комплексного термического анализа цементного камня с введённой дисперсной минеральной добавкой в количестве 3 % (диаметр частиц – 45,300 мкм)

Fig. 1. Curves of complex thermal analysis of cement stone with introduced dispersed mineral additive in the amount of 3 % (particle diameter – 45.300 μm)

Для объяснения полученного ускорения твердения был проведён комплексный термический анализ цементного камня с полученной тонкодисперсной добавкой. Результаты термического анализа приведены на рис. 1–3.

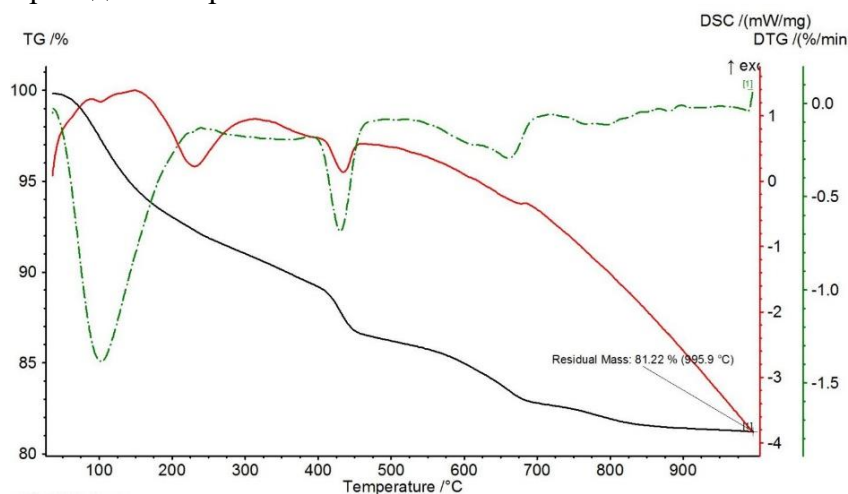


Рис. 2. Кривые комплексного термического анализа цементного камня с введённой дисперсной минеральной добавкой в количестве 1%, продолжительность измельчения – 1 минута (диаметр частиц – 5,867 мкм)
 Fig. 2. Curves of complex thermal analysis of cement stone with introduced dispersed mineral additive in the amount of 1%, grinding duration – 1 minute (particle diameter – 5.867 μm)

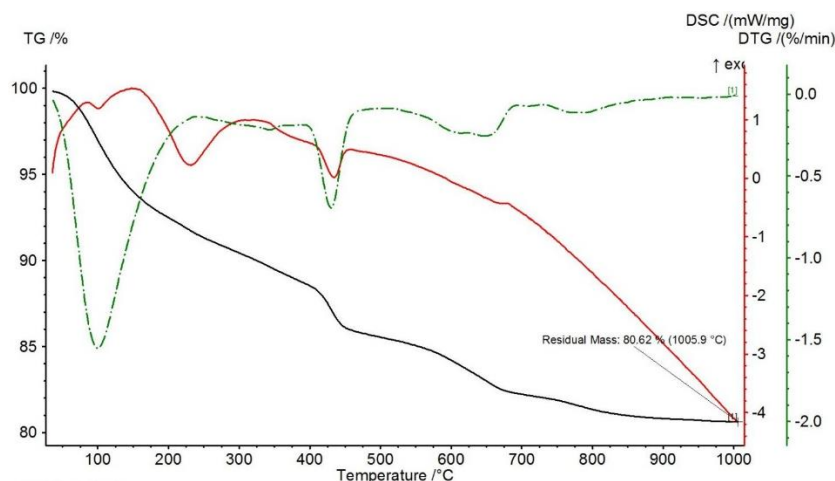


Рис. 3. Кривые комплексного термического анализа цементного камня с введённой дисперсной минеральной добавкой в количестве 5%, продолжительность измельчения – 5 минут (диаметр частиц – 4,271 мкм)
 Fig. 3. Curves of complex thermal analysis of cement stone with introduced dispersed mineral additive in the amount of 5 %, grinding duration – 5 minutes (particle diameter – 4.271 μm)

Процессы, связанные с дегидратацией гидратных новообразований при повышении температуры, являются важными для понимания структуры и свойств цементных систем. Исследования показывают, что при определённой температуре происходит:

- 100–120 °C – разложение этtringита и гидросиликатов кальция (ГСК (II));
- 420–450 °C – разложение гидроксида кальция;
- 620–680 °C – разложение отдельных гидросиликатов кальция;
- выше 730 °C – разложение карбоната кальция, который может образовываться при

взаимодействии CaO с CO_2 , выделяющегося из Ca(OH)_2 и с CO_2 , содержащемся в воздухе во время проведения ДТА.

Потери массы, связанные с разложением гидратных новообразований при различных температурах, приведены в табл. 4.

Таблица 4 / Table 4

**Потери массы, связанные с разложением гидратных новообразований
модифицированного цементного камня**
Mass losses associated with the decomposition of hydrate formations of modified cement stone

Характеристика добавки		Потери массы, связанные с разложением гидратных новообразований при различных температурах				
диаметр частиц, мкм	количество добавки, мас. %	химически связанная вода	эттрингит и ГСК (II)	гидроксид кальция	гидросиликаты кальция	карбоната кальция
45,300	3,0	12,6	5,0	5,3	43,3	2,3
5,867	1,0	17,5	9,2	11,5	66,2	2,8
4,271	5,0	17,0	9,2	11,2	63,9	2,7

При анализе характера кривых комплексного термического анализа можно отметить, что у цементного камня с введённой дисперсной минеральной добавкой в количестве 3 % (диаметр частиц – 45,300 мкм) интенсивность эндозффекта при температурах 100–120, 420–450 и 620–680 °С значительно ниже и потеря массы при этом меньше, чем у цементного камня, модифицированного более дисперсной минеральной добавкой, измельчённой в течение 1–5 минут. Это свидетельствует о большем количестве образовавшихся кристаллогидратов в модифицированном тонкодисперсной добавкой цементном камне. Кроме того, при модифицировании цемента тонкодисперсной добавкой у цементного камня увеличивается количество химически связанной воды.

Заклучение

Таким образом, можно констатировать, что разработано научно обоснованное технологическое решение, обеспечивающее получение быстросхватывающихся и быстротвердеющих цементных систем путём введения тонкодисперсного модификатора (гидратированного цемента), выступающего центром кристаллизации кристаллогидратов вследствие химического сродства гидратированного цемента с клинкерными минералами. При этом термическим анализом подтверждается более глубокая гидратация цементных систем, которая объясняет ускорение процесса схватывания цементной системы при введении тонкодисперсной минеральной добавки.

ВКЛАД АВТОРОВ | CONTRIBUTION OF THE AUTHORS

Л.В. Ильина – разработка концепции и схемы исследования, анализ и интерпретация результатов; С.М. Анпилов – сбор данных, анализ и интерпретация результатов; Д.А. Цекарь – проведение исследования, анализ результатов; подготовка и редактирование текста. Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

L.V. Ilina – development of the concept and scheme of the study, analysis and interpretation of the results; S.M. Anpilov – data collection, analysis and interpretation of the results; D.A. Tsekar – conducting the study, analysis of the results; preparation and editing of the text. All authors read and approved the final version of the manuscript.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ | DISCLOSURE

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
The authors declare no conflict of interest.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Калашников В.И., Тараканов О.В., Володин В.М., Ерофеева И.В., Абрамов Д.А. Бетоны переходного и нового поколений. Состояние и перспективы // Технологии бетонов. 2023. № 2(187). С. 33–38.
2. Каприелов С.С., Шейнфельд А.В., Дондуков В.Г. Цементы и добавки для производства высокопрочных бетонов // Строительные материалы. 2017. № 11. С. 4–10. EDN: ZWUFVB

3. Лесовик В.С., Федюк Р.С. Композиты нового поколения для специального строительства // Строительные материалы. 2021. № 3. С. 9–17. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2021-789-3-9-17>
4. Калашников В.И., Тараканов О.В. О применении комплексных добавок в бетонах нового поколения // Строительные материалы. 2017. № 1–2. С. 62–67. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2017-745-1-2-62-67>
5. Тараканов О.В., Фишер Х.Б. Принципы получения высокопрочных бетонов с использованием местных сырьевых ресурсов // Эксперт: теория и практика. 2024. № 3(26). С. 112–117. DOI: https://doi.org/10.51608/26867818_2024_3_112
6. Вовк А.И. Гидратация C3S и структура C–S–H-фазы: новые подходы, гипотезы и данные // Цемент и его применение. 2012. № 3. С. 89–92.
7. Тараканов О.В., Акчурин Т.К., Белякова Е.А., Душко О.В. Перспективы применения комплексных органоминеральных добавок в бетонах нового поколения // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. 2023. № 2(91). С. 88–98. EDN: VXXWGFN
8. Senhadji Y., Escadeillas G., Mouli M., Khelafi H., Benosman. Influence of natural pozzolan, silica fume and limestone fine on strength, acid resistance and microstructure of mortar // Powder Technology. 2014. № 254. P. 314–323. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2014.01.046>
9. Dabbaghi F., Sadeghi-Nik A., Libre N.A., Nasrollahpour S. Characterizing fiber reinforced concrete incorporating zeolite and metakaolin as natural pozzolans // Structures. 2021. № 34. P. 2617–2627. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2021.09.025>
10. Ma H., Yi C., Wu C. Review and outlook on durability of engineered cementitious composite (ECC) // Construction and Building Materials. 2021. № 287. Art. 122719. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.122719>
11. Калашников В.И., Суздальцев О.В., Дрянин Р.А., Сехспоян Г.П. Роль дисперсных наполнителей в бетонах нового поколения // Известия вузов. Строительство. 2014. № 7. С. 11–21.
12. Величко Е.Г., Шумилина Ю.С. К проблеме формирования дисперсного состава и свойств высокопрочного бетона // Вестник МГСУ. 2020. Т. 15. С. 235–243. EDN: MTNVMX
13. Тараканов О.В., Акчурин Т.К., Душко О.В., Стефаненко И.В., Санягина Я.А. Формирование ранней структуры и прочности модифицированных цементных материалов // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. 2023. № 5(93). С. 71–81.
14. Ahmad J., Zhou Zh. Waste marble based self compacting concrete reinforced with steel fiber exposed to aggressive environment // Journal of Building Engineering. 2024. Vol. 81. Art. 108142. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2023.108142>
15. Salamanova M.Sh., Murtazaev S.-A.Yu., Alaskhanov A.Kh., Ismailova Z.Kh. Development of multicomponent binders using fine powders // Proceedings of the International Symposium “Engineering and Earth Sciences: Applied and Fundamental Research” dedicated to the 85th anniversary of H.I. Ibragimov (ISEES 2019). Atlantis Press, 2019. P. 524–528. DOI: <https://doi.org/10.2991/isees-19.2019.58>
16. Nochaiya T., Chaipanich A. Behavior of multi-walled carbon nanotubes on the porosity and microstructure of cement-based materials // Applied Surface Science. 2011. Vol. 257, № 6. P. 1941–1945. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2010.09.030>
17. Xu S., Liu J., Li Q. Mechanical properties and microstructure of multi-walled carbon nanotube-reinforced cement paste // Construction and Building Materials. 2015. № 76. P. 16–23. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.11.049>
18. Dong S., Wang D., Ashour A., Han B., Ou J. Nickel plated carbon nanotubes reinforcing concrete composites: from nano/micro structures to macro mechanical properties // Composites. Part A: Applied Science and Manufacturing. 2021. Vol. 141. Art. 106228. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2020.106228>
19. Тараканов О.В., Иващенко Ю.Г., Ерофеева И.В. Влияние карбонатных минеральных добавок на формирование микроструктуры и прочность минеральных вяжущих веществ // Региональная архитектура и строительство. 2024. № 1(58). С. 47–58. DOI: https://doi.org/10.54734/20722958_2024_1_47
20. Zhang Z., Yang F., Liu J.-C., Wang S. Eco-friendly high strength, high ductility engineered cementitious composites (ECC) with substitution of fly ash by rice husk ash // Cement and Concrete Research.

2020. Vol. 137. Art. 106200. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2020.106200>
21. Doughmi K., Baba K., Nounah A. Mechanical properties of eco-friendly cement based composite mortars plastic fiber reinforced partially replaced by natural pozzolan and marble waste // *Materials Today: Proceedings*. 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.07.203>
22. Bouaissi A., Li L.Y., Abdullah M.M.A.B., Ahmad R., Razak R.A., Yahya Z. Fly ash as a cementitious material for concrete // *Sustainable Building Materials*. IntechOpen: London, UK, 2020.
23. Wang N., Xia Z., Amin M. N., Ahmad W., Khan K., Althoey F., Alabduljabbar H. Sustainable strategy of eggshell waste usage in cementitious composites: An integral testing and computational study for compressive behavior in aggressive environment // *Construction and Building Materials*. 2023. Vol. 386. Art. 131536. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.131536>
24. Cement paste modified by nano-montmorillonite and carbon nanotubes // *ACI Materials Journal*. 2022. Vol. 119, № 3. DOI: <https://doi.org/10.14359/51734612>
25. Ahmad J., Aslam F., Martinez-Garcia R., de-Prado-Gil J., Qaidi S., Brahmia A. Effects of waste glass and waste marble on mechanical and durability performance of concrete // *Scientific Reports*. 2021. № 11. Art. 21525. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-021-00994-0>
26. She A., Li G., Tan L., Wei Y., Zuo J., Yao W. Comprehensive analysis of early-stage hydration and microstructure evolution in Sufflaminate cement: Insights from low-field NMR and isothermal calorimetry // *Journal of Building Engineering*. 2023. Vol. 80. Art. 108076. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.job.2023.108076>
27. Fediuk R., Lesovik V., Vavrenyuk S., Zaiakhanov M., Bituyev A., Klyuev S., Yu K., Lesovik Ya., Bakatov K. Composite cement materials for structures foundation strengthening // *Magazine of Civil Engineering*. 2024. Vol. 17, № 3(127). DOI: <https://doi.org/10.34910/MCE.127.1>
28. Subash N., Avudaiappan S., Adish Kumar S., Amran M., Vatin N., Fediuk R., Aepuru R. Experimental investigation on geopolymer concrete with various sustainable mineral ashes // *Materials*. 2021. № 14(21). DOI: <https://doi.org/10.3390/ma14247596>
29. Лесовик В.С. Строительные материалы. Настоящее и будущее // *Вестник МГСУ*. 2017. Т. 12, № 1(100). С. 9–16. <https://doi.org/10.22227/1997-0935.2017.1.9-1610>
30. Лесовик В.С. Геоника (геомиметика). Примеры реализации в строительном материаловедении. Белгород: Изд-во БГТУ им. В.Г. Шухова, 2016. 287 с.
31. Ильина Л.В., Самченко С.В., Раков М.А., Зорин Д.А. Моделирование процессов кинетики цементных композитов, модифицированных кальций-содержащими добавками // *Нанотехнологии в строительстве: научный интернет-журнал*. 2023. Т. 15, № 5. С. 494–503. DOI: <https://doi.org/10.15828/2075-8545-2023-15-5-494-503>
32. Ilina L.V., Mukhina I.N., Semenova M.M. Hardening cement conglomerates by mining industries waste // *Solid State Phenomena*. 2021. № 316. P. 1061–1066. DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/ssp.316.1061>
33. Diamond S. Densified silica fume: particle size and dispersion in concrete // *Materials and Structures*. 2006. Vol. 39, № 9. P. 849–859. DOI: <https://doi.org/10.1617/s11527-006-9087-y>
34. Ilina L., Kudyakov A., Rakov M. Aerated dry mix concrete for remote northern territories // *Magazine of Civil Engineering*. 2022. № 5(113). Art. 11310. DOI: <https://doi.org/10.34910/MCE.113.10>
35. Самченко С.В., Каприелов С.С., Дыкин И.В. Оптимизация структуры и свойств порошково-активированного бетона путём применения портландцементов различной дисперсности // *Техника и технология силикатов*. 2022. Т. 29, № 1. С. 64–74.
36. Копаница Н.О., Демьяненко О.В., Куликова А.А. Комплексные добавки на основе вторичных ресурсов для модификации цементных композиций // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. 2023. Т. 334, № 1. С. 136–144. DOI: <https://doi.org/10.18799/24131830/2023/1/4045>
37. Ильина Л.В., Молодин В.В., Гичко Н.О., Туляганов А.К. Повышение прочностных характеристик цементных конгломератов добавками направленного действия // *Строительные материалы*. 2023. № 7. С. 36–42. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2023-815-7-36-42>
38. Горшков В.С., Тимашев В.В., Савельев В.Г. Методы физико-химического анализа вяжущих веществ. Москва: Высшая школа, 1981. 335 с.

REFERENCES

1. Kalashnikov V.I., Tarakanov O.V., Volodin V.M., Erofeeva I.V., Abramov D.A. Concretes of transitional and new generations. Status and prospects. *Concrete Technologies*, 2023, no. 2(187), pp. 33–38. (In Russ.).
2. Kaprielov S.S., Sheinfeld A.V., Dondukov V.G. Cements and additives for the production of high-strength concrete. *Construction Materials*, 2017, no. 11, pp. 4–10. (In Russ.).
3. Lesovik V.S., Fedyuk R.S. New generation composites for special facilities. *Construction Materials*, 2021, no. 3, pp. 9–17. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2021-789-3-9-17>
4. Kalashnikov V.I., Tarakanov O.V. About the use of complex additives in concretes of a new generation. *Construction Materials*, 2017, no. 1–2, pp. 62–67. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2017-745-1-2-62-67>
5. Tarakanov O.V., Fisher H.B. Principles of obtaining high-strength concrete using local raw materials. *Expert: Theory and Practice*, 2024, no. 3(26), pp. 112–117. (In Russ.). DOI: https://doi.org/10.51608/26867818_2024_3_112
6. Vovk A.I. Hydration of C3S and C–S–H phase structure: new approaches, hypotheses and data. *Journal Cement and its Applications*, 2012, no. 3, pp. 89–92. (In Russ.).
7. Tarakanov O.V., Akchurin T.K., Belyakova E.A., Dushko O.V. Prospects for the use of complex organomineral additives in new generation concrete. *Bulletin of the Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering. Series: Construction and Architecture*, 2023, no. 2(91), pp. 88–98. (In Russ.).
8. Senhadji Y., Escadeillas G., Mouli M., Khelafi H., Benosman. Influence of natural pozzolan, silica fume and limestone fine on strength, acid resistance and microstructure of mortar. *Powder Technology*, 2014, vol. 254, pp. 314–323. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2014.01.046>
9. Dabbaghi F., Sadeghi-Nik A., Libre N.A., Nasrollahpour S. Characterizing fiber reinforced concrete incorporating zeolite and metakaolin as natural pozzolans. *Structures*, 2021, no. 34, pp. 2617–2627. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2021.09.025>
10. Ma H., Yi C., Wu C. Review and outlook on durability of engineered cementitious composite (ECC). *Construction and Building Materials*, 2021, no. 287, art. 122719. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.122719>
11. Kalashnikov V.I., Suzdaltsev O.V., Dryanin R.A., Sekhsposyan G.P. The role of dispersed and fine-grained filler in concrete of new generation. *News of Universities. Construction*, 2014, no. 7, pp. 11–21. (In Russ.).
12. Velichko E.G., Shumilina Yu.S. To the problem of forming the high-strength concrete dispersed composition and properties. *Bulletin of Moscow State University of Civil Engineering*, 2020, vol. 15, pp. 235–243. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.22227/1997-0935.2020.2.235-243>
13. Tarakanov O.V., Akchurin T.K., Dushko O.V., Stefanenko I.V., Sanyagina Ya.A. Formation of early structure and strength of modified cement materials. *Bulletin of the Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering. Series: Construction and Architecture*, 2023, no. 5(93), pp. 71–81. (In Russ.).
14. Ahmad J., Zhou Zh. Waste marble based self compacting concrete reinforced with steel fiber exposed to aggressive environment. *Journal of Building Engineering*, 2024, vol. 81, art. 108142. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2023.108142>
15. Salamanova M.Sh., Murtazaev S.-A.Yu., Alaskhanov A.Kh., Ismailova Z.Kh. Development of Multicomponent Binders Using Fine Powders. *Proceedings of the International Symposium “Engineering and Earth Sciences: Applied and Fundamental Research” dedicated to the 85th anniversary of H.I. Ibragimov (ISEES 2019)*. Atlantis Press, 2019, pp. 524–528. DOI: <https://doi.org/10.2991/isees-19.2019.58>
16. Nochaiya T., Chaipanich A. 2011. Behavior of multi-walled carbon nanotubes on the porosity and microstructure of cement-based materials. *Applied Surface Science*, no. 257(6), pp. 1941–1945. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2010.09.030>
17. Xu S., Liu J., Li Q. 2015. Mechanical properties and microstructure of multi-walled carbon nanotube-reinforced cement paste. *Construction and Building Materials*, no. 76, pp. 16–23. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.11.049>
18. Dong S., Wang D., Ashour A., Han B., Ou J. Nickel plated carbon nanotubes reinforcing concrete composites: from nano/micro structures to macro mechanical properties. *Composites. Part A: Applied*

- Science and Manufacturing*, 2021, vol. 141, art. 106228. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2020.106228>
19. Tarakanov O.V., Ivaschenko Yu.G., Erofeeva I.V. Influence of carbonate mineral additives on the formation of microstructure and strength of mineral binders. *Regional Architecture and Construction*, 2024, no. 1(58), pp. 47–58. (In Russ.). DOI: https://doi.org/10.54734/20722958_2024_1_47
20. Zhang Z., Yang F., Liu J.-C., Wang S. 2020. Eco-friendly high strength, high ductility engineered cementitious composites (ECC) with substitution of fly ash by rice husk ash. *Cement and Concrete Research*, no. 137, art. 106200. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2020.106200>
21. Doughmi K., Baba K., Nounah A. Mechanical properties of eco-friendly cement based composite mortars plastic fiber reinforced partially replaced by natural pozzolan and marble waste. *Materials Today: Proceedings*, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.07.203>
22. Bouaissi A., Li L.Y., Abdullah M.M.A.B., Ahmad R., Razak R.A., Yahya Z. Fly ash as a cementitious material for concrete. *Sustainable Building Materials*. London, UK, IntechOpen, 2020.
23. Wang N., Xia Z., Amin M. N., Ahmad W., Khan K., Althoey F., Alabduljabbar H. Sustainable strategy of eggshell waste usage in cementitious composites: An integral testing and computational study for compressive behavior in aggressive environment. *Construction and Building Materials*, 2023, vol. 386, art. 131536. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.131536>
24. Cement paste modified by nano-montmorillonite and carbon nanotubes. *ACI Materials Journal*, 2022, vol. 119, no. 3, art. 173. DOI: <https://doi.org/10.14359/51734612>
25. Ahmad J., Aslam F., Martinez-Garcia R., de-Prado-Gil J., Qaidi S., Brahmia A. Effects of waste glass and marble waste on mechanical and durability performance of concrete. *Scientific Reports*, 2021, no. 11, art. 21525. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-021-00994-0>
26. She A., Li G., Tan L., Wei Y., Zuo J., Yao W. Comprehensive analysis of early-stage hydration and microstructure evolution in Sufflaminate cement: Insights from low-field NMR and isothermal calorimetry. *Journal of Building Engineering*, 2023, vol. 80, art. 108076. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2023.108076>
27. Fediuk R., Lesovik V., Vavrenyuk S., Zaiakhanov M., Bituyev A., Klyuev S., Yu K., Lesovik Ya., Bakatov K. Composite cement materials for structures foundation strengthening. *Magazine of Civil Engineering*, 2024, vol. 17, no. 3(127). DOI: <https://doi.org/10.34910/MCE.127.1>
28. Subash N., Avudaiappan S., Adish Kumar S., Amran M., Vatin N., Fediuk R., and Aepuru R. Experimental investigation on geopolymers concrete with various sustainable mineral ashes. *Materials*, 2021, no. 14(21). DOI: <https://doi.org/10.3390/ma14247596>
29. Lesovik V.S. Construction materials. Present and future. *Bulletin of MGSU*, 2017, vol. 12, no. 1(100), pp. 9–16. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.22227/1997-0935.2017.1.9-1610>
30. Lesovik V.S. Geonics (geomimetics). Examples of implementation in construction materials science. Belgorod, Publishing house of BSTU named after V.G. Shukhov, 2016, 287 p. (In Russ.).
31. Ilyina L.V., Samchenko S.V., Rakov M.A., Zorin D.A. Modeling of kinetic processes of cement composites modified with calcium-containing additives. *Nanotechnology in Construction: scientific online journal*, 2023, vol. 15, no. 5, pp. 494–503. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.15828/2075-8545-2023-15-5-494-503>
32. Ilina L.V., Mukhina I.N., Semenova M.M. Hardening cement conglomerates by mining industries waste. *Solid State Phenomena*, 2021, no. 316, pp. 1061–1066. DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/ssp.316.1061>
33. Diamond S. Densified silica fume: particle size and dispersion in concrete. *Materials and Structures*, 2006, vol. 39, no. 9, pp. 849–859. DOI: <https://doi.org/10.1617/s11527-006-9087-y>
34. Ilina L., Kudyakov A., Rakov M. Aerated dry mix concrete for remote northern territories. *Magazine of Civil Engineering*, 2022, no. 5(113), art. 11310. DOI: <https://doi.org/10.34910/MCE.113.10>
35. Samchenko S.V., Kaprielov S.S., Dykin I.V. Optimization of the structure and properties of powder-activated concrete by using Portland cements of different dispersion. *Silicate Engineering and Technology*, 2022, vol. 29, no. 1, pp. 64–74. (In Russ.).
36. Kopanitsa N.O., Demyanenko O.V., Kulikova A.A. Complex additives based on secondary resources for modification of cement compositions. *Bulletin of Tomsk Polytechnic University. Georesources Engineering*, 2023, vol. 334, no. 1, pp. 136–144. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.18799/24131830/2023/1/4045>

37. Ilyina L.V., Molodin V.V., Gichko N.O., Tulyaganov A.K. Improving the strength characteristics of cement conglomerates with targeted additives. *Construction materials*, 2023, no. 7, pp. 36–42. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2023-815-7-36-42>
38. Gorshkov V.S., Timashev V.V., Savelyev V.G. Methods of physicochemical analysis of binders: Textbook, manual. Moscow, Higher School, 1981, 335 p. (In Russ.).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ | INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Ильина Лилия Владимировна – доктор технических наук, профессор, директор Института цифровых и инженерных технологий, Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Новосибирск, Российская Федерация).

✉ nsklika@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8520-4453>

Liliya V. Ilyina, Doctor of Engineering Sciences, Professor, Director of the Institute of Digital and Engineering Technologies, Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Novosibirsk, Russian Federation).

Анпилов Сергей Михайлович – доктор технических наук, профессор кафедры технологии и организации строительства, Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Новосибирск, Российская Федерация).

✉ anpilovsm@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6512-5803>

Sergey M. Anpilov, Doctor of Engineering Sciences, Professor of the Department of Technology and Organization of Construction, Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Novosibirsk, Russian Federation).

Цекарь Денис Анатольевич – аспирант, Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Новосибирск, Российская Федерация).

✉ tsekden@gmail.com

Denis A. Tsekar, Postgraduate Student, Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Novosibirsk, Russian Federation).

Статья поступила в редакцию / Received: 11.02.2025.

Доработана после рецензирования / Revised: 26.02.2025.

Принята к публикации / Accepted: 18.03.2025.