

В.Т. ЕРОФЕЕВ¹, Е.С. ДЕРГУНОВА², М.А. ГОНЧАРОВА², В.В. ДЕРГУНОВА²

¹ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет»

²ФГБОУ ВО «Липецкий государственный технический университет»

ДЕФОРМАЦИИ УСАДКИ И ТРЕЩИНОСТОЙКОСТЬ БЕТОНОВ, МОДИФИЦИРОВАННЫХ УРЕАЗНЫМИ БИОДОБАВКАМИ

Аннотация. Статья посвящена изучению влияния уреазных биодобавок на трещиностойкость и деформацию усадки бетонов. Образцы изготавливались путем модифицирования уреазы микроорганизмами *Sporosarcina pasteurii* и *Sporosarcina ureae*, продуцирующих фермент уреазу. Оценены свойства бетонных смесей по таким показателям как удобоукладываемость и подвижность. Изучена поверхность среза образцов модифицированного бетона, исследовалось поровое пространство с применением оптического и сканирующего электронного микроскопов, идентифицировано образование новой фазы в поровом пространстве. Установлено, что применение уреазных добавок способствует снижению величины усадки бетона и повышению его трещиностойкости, а также прочность при растяжении на изгибе повышается более чем на 30 %, модуль упругости бетона возрастает в 1,5 раза. Эффект упрочнения поровой структуры материалы достигается за счет образования карбоната кальция в результате жизнедеятельности бактерий. Полученные результаты открывают перспективы для разработки экологически чистых и эффективных методов улучшения свойств строительных материалов

Ключевые слова: портландцемент, деформации усадки, уреазные биодобавки, прочность, трещиностойкость, бетон.

V.T. YEROFEEV¹, E.S. DERGUNOVA², M.A. GONCHAROVA², V.V. DERGUNOVA²

¹Moscow State University of Civil Engineering (National Research University)

²Lipetsk State Technical University

SHRINKAGE DEFORMATION AND CRACK RESISTANCE OF CONCRETE MODIFIED WITH UREASE BIOADDITIVES

Abstract. This article examines the effect of urease bioadditives on the crack resistance and shrinkage deformation of concrete. The study involved introducing the urease-producing microorganisms *Sporosarcina pasteurii* and *Sporosarcina ureae* into the concrete mix. The properties of the concrete mixes were assessed for workability and flowability. The cut surfaces of modified concrete samples were examined, and the pore space was examined using optical and scanning electron microscopes to identify the formation of a new phase in the pore space. It was found that the use of urease additives reduces concrete shrinkage and improves its crack resistance, increases flexural strength by more than 30%, and increases the elastic modulus of concrete by 1.5 times. This is achieved through the formation of calcium carbonate as a result of bacterial activity, which strengthens the structure of the material. The results obtained open up prospects for the development of environmentally friendly and effective methods for improving the properties of building materials

Keywords: Portland cement, shrinkage deformations, urease bioadditives, strength, crack resistance, concrete.

1. Введение

Образование трещин в бетонном материале представляет собой критическое явление, которое может существенно снизить уровень безопасности эксплуатации сооружений, особенно в условиях значительных механических нагрузок или воздействия агрессивных сред. Своевременное обнаружение и предотвращение процессов трещинообразования является важным аспектом обеспечения надежности и долговечности бетонных конструкций. Также усадочные деформации являются одной из ключевых причин возникновения трещин в бетоне, которые снижают прочность и устойчивость сооружения, увеличивают вероятность проникновения влаги и агрессивных веществ внутрь конструкции, ускоряя коррозионные процессы и снижая срок службы сооружения [1-3].

Проблема снижения усадки бетонных и железобетонных конструкций, способствующей регулированию процессов трещинообразованию, является одной из ключевых проблем современной строительной индустрии [4-6]. Поэтому разработка способов снижения усадки является актуальной задачей, решение которой позволит создавать эффективные и долговечные бетонные композиты.

К настоящему времени для устранения повышенных усадочных деформаций в бетонных элементах и предупреждения формирования в них трещин разработаны разнообразные методы, осуществляемые на уровне микро и макроструктуры:

- оптимизация состава смесей. Правильный выбор компонентов и пропорций наполнителей и связующих веществ позволяет минимизировать усадку и обеспечить высокие прочностные характеристики готового продукта [7-11].

- контроль условий твердения. Создание благоприятных условий влажности и температуры в период набора прочности способствует равномерному распределению влаги и минимизации появления разрывов [12-13].

- применение специализированных добавок. Широко используются пластификаторы, замедляющие схватывание и улучшающие подвижность смеси, полимерные добавки, увеличивающие прочность и эластичность, а также стабилизирующие растворы, предотвращающие преждевременное обезвоживание [9-10].

- армирование цементных композитов. Применение стальной и синтетической фибры повышает сопротивление бетона воздействию растягивающих усилий и предотвращает распространение мелких трещин [13-15].

- применение каркасной технологии. Создание каркасной макроструктуры бетонов и других композиционных материалов осуществляется в два этапа: на первом – заполнители складываются в каркас, на втором пористая структура каркаса заслоняется высокоподвижной матрицей [16]. У изделий полученных по каркасной технологии усадка снижается в 2-5 раз.

- применение нано- и биологических добавок. Внедрение наночастиц оксида кремния и диоксида титана усиливает межмолекулярные взаимодействия, делая материал более плотным и менее подверженным внешним воздействиям. Использование биоминерализирующих препаратов способствует самозалечиванию дефектов и укреплению структуры бетона [17-19].

Технология биоминерализации активно развивается в последние годы, привлекая внимание исследователей и инженеров-строителей своим потенциалом значительного увеличения срока службы бетонных конструкций и снижения экологического следа производства строительных материалов [17-29]. Она представляет собой уникальный технологический процесс, позволяющий повысить эксплуатационные характеристики традиционных цементных композиций посредством внесения специально подобранных микробиологических агентов. Биоминерализацию бетонов осуществляют путем введения

специальных штаммов бактерий, обладающих способностью вырабатывать ферменты, способные инициировать химико-минеральные реакции внутри пористой структуры бетона [26]. Ключевым элементом данного процесса выступает способность некоторых видов микроорганизмов синтезировать карбонат кальция (CaCO_3) [25, 26]. Именно этот минерал играет важнейшую роль в уменьшении пористости и укреплении межзерновой связи частиц цемента, снижая вероятность образования трещин и повышая общую прочность материала [27, 28]. Таким образом, включение биологического компонента в технологию изготовления бетона становится новым перспективным направлением развития отрасли, сочетающим преимущества традиционной химии цемента с возможностями живых организмов.

Цель данной работы – изучение усадочных деформаций и трещиностойкости бетонов, модифицированных уреазными биодобавками. Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- сформировать бетонные смеси с биодобавками, содержащие микроорганизмы *Sporosarcina pasteurii* и *Sporosarcina ureae*, и оценить свойства бетонных смесей по таким свойствам как удобоукладываемость и подвижность.
- изучить поверхность среза образцов модифицированного бетона, исследовать поровое пространство с применением оптического и сканирующего электронного микроскопов, идентифицировать образование новой фазы в поровом пространстве.
- определить деформации усадки и оценить трещиностойкость бетонов, модифицированных уреазными биодобавками.

2. Материалы и методы

Определение деформаций усадки при сжатии осуществляли с применением ГОСТ 25544. Размеры образцов-призм принимали 150X150X60. Насыщение водой образцов бетонов осуществляли согласно ГОСТ 24452. Испытания по определению коэффициентов усадки проводили при следующих условиях: температура составляла 20 ± 1 °C при относительной влажности воздуха 62 ± 1 %.

Для приготовления образцов использовали бездобавочный портландцемент ЦЕМ 0 32,5 N, песок (стандартный полифракционный по ГОСТ 6139), щебень фракции 5-10 мм и воду. Водоцементное отношение (В/Ц) обеспечивает получения теста нормальной густоты. Консистенцию раствора определяли по распылу конуса после встряхивания.

В качестве биодобавки использовали уреазные микроорганизмы *Sporosarcina pasteurii* и *Sporosarcina ureae*, взятые в соотношении 1:1. Смесь уреазных бактерий перед использованием иммобилизовали с применением альгината натрия. Альгинат натрия растворяли в кипящей воде в концентрации 2% и автоклавировали при 125°C в течение 15 мин. После охлаждения до температуры 40°C к 20 мл альгината натрия добавляли 10 мл бактериальной суспензии. Затем полученную смесь пропускали через экструдер в объем холодного 0,1 М раствора хлорида натрия. Образованные гранулы промывали водой, высушивали и хранили в темном месте при температуре не более 22 °C [22, 24].

Для контроля химического и минералогического состава портландцемента использовалась рентгенофлуоресцентная спектроскопия.

Исследования внутренних поверхностей модифицированных бетонных образцов проводили с применением электронного сканирующего микроскопа LYRA 3 TESCAN и оптического микроскопа ЛОМО МЕТАМ ЛВ-41 (Липецк, ЛГТУ).

3. Результаты исследования и их анализ

Формирование бетонных смесей и исследование свойств и структуры бетона.

Установлено на начальном этапе, что портландцемент марки ЦЕМ 0 32,5 N, используемый в дальнейшей работе соответствует требованиям стандартов.

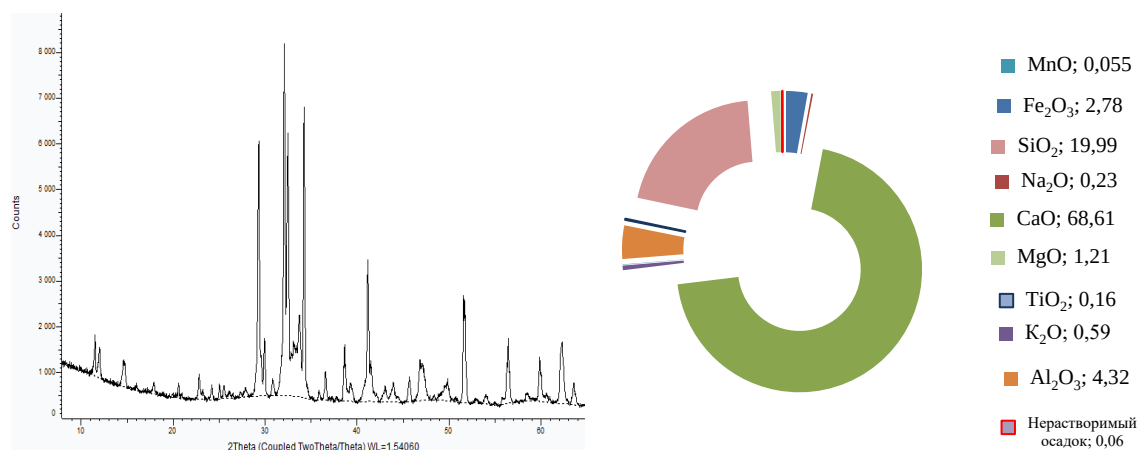


Рисунок 1 – Рентгенограмма и химический состав портландцемента ЦЕМ 0 32,5 N (% масс.)

Для исследования свойств бетонных смесей и бетонов использовали 6 составов (Табл. 1).

Таблица 1 – Состав бетонных смесей на 1 м³, кг

Наименование компонентов	Маркировка образцов в зависимости от составов бетонных смесей, кг/ м ³					
	I1	I10	I2	I20	I3	I30
Цемент	209	211	207	209	205	202
Песок	627	634	620	627	615	607
Щебень	1332	1346	1318	1332	1306	1289
Вода	63	63	83	83	102	101
Биодобавка	21	-	21	0	21	0
В/Ц	0,3	0,3	0,4	0,4	0,5	0,5

Свойства затвердевшего бетона во многом зависят от его удобоукладываемости. Для количественной оценки влияния биодобавки на удобоукладываемость свежееуложенного бетона была определена подвижность расплыву конуса согласно ГОСТ Р 57811 «Смеси бетонные. Методы испытаний». В таблице 2 приведены экспериментальные данные.

Полученные результаты показывают, что бетон, модифицированный биодобавкой даёт осадку конуса больше на 0,2 – 0,5 см, чем обычный образец, что соответствует классу консистенции П1 и позволяет использовать такой бетон для обычных конструкций, уплотняемых вручную или с вибрацией. Увеличение осадки конуса по сравнению с обычным бетонным составом за счет биодобавки, которая обладает свойствами поверхностно-активного вещества и повышает пластичность бетонной смеси. Бетонные образцы твердели в течение 24 часов, затем выдерживались в резервуаре с водой при температуре 40±2 °С в течение 7 дней. Затем образцы до окончания набора проектной прочности, помещались в резервуар с водой комнатной температуры (25 °С).

Таблица 2 – Характеристики бетонных смесей

Характеристика	Маркировка образцов					
	I1	I10	I2	I20	I3	I30
Средняя плотность смеси, кг/м ³	2242	2245	2231	2235	2220	2225
Тип смеси	П1	П1	П1	П1	П1	П1
Осадка конуса, см	1,5	1,3	1,6	1,4	2,1	1,6
Степень уплотняемости, С	1,25	1,10	1,27	1,12	1,28	1,14
Объем воздуха в бетонной смеси, л	4,8	2,2	4,9	2,4	5,2	2,6

Исследование структуры образцов проводилось с применением оптического и сканирующего электронного микроскопов. Были изучены поверхности срезов бетонных образцов, модифицированных биодобавками в возрасте 28 и 56 суток (рис. 2). Образцы материалов, модифицированные биодобавками, возрастом 28 суток, под микроскопом выглядят структурно стабилизированными, видно, что значительный объем пор заполнен продуктами гидратации, а некоторые остаются незаполненными. На фото образцов возрастом 56 суток уже появляются на месте пустых пор образования карбоната кальция. Идентификацию образовавшегося вещества проводили с применением рентгенофлуоресцентного анализатора. В результате было установлено, что полученная модификация карбоната кальция является кальцитом.

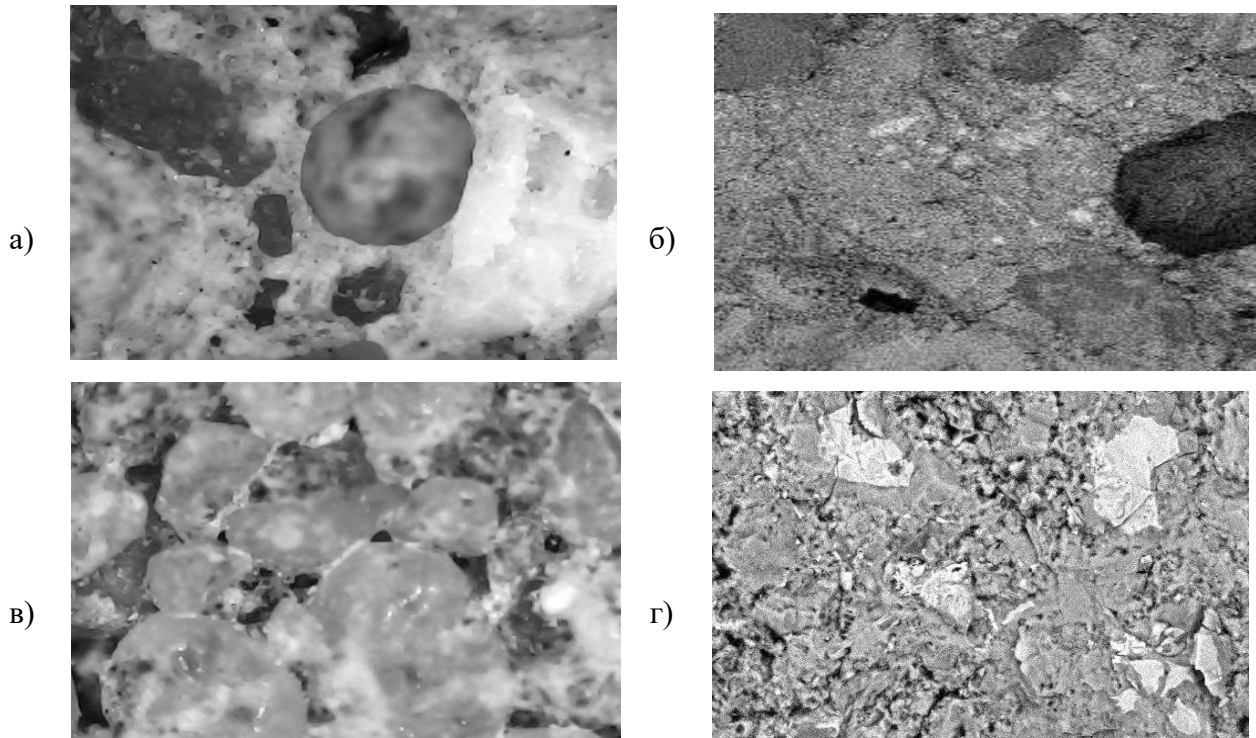


Рисунок 2 – Фото поверхности среза образца бетона, модифицированного биодобавкой в возрасте 28 (а, б) и 56 (в, г) суток (а, в – увеличение 150X, б, г – увеличение 2000X)

Результаты показали прогрессирование процессов гидратации и соответствующие биоминерализации микроструктурные преобразования (образования кальцита), заложив предпосылки для исследования усадки и трещиностойкости бетона, модифицированного биодобавками.

Исследование усадочных деформаций и трещиностойкости бетонов, модифицированных уреазными биодобавками.

Определение усадочных деформаций и трещиностойкости бетона имеет большое значение в строительной отрасли, особенно при проектировании и эксплуатации конструкций и сооружений [25, 26]. Экспериментально были определены коэффициенты общей усадки образцов бетона, модифицированных биодобавками. Установлены зависимости для каждой серии образцов коэффициента общей усадки от времени твердения (рис. 3). Измерения проводились ежедневно в одно и то же время в течение 120 суток.

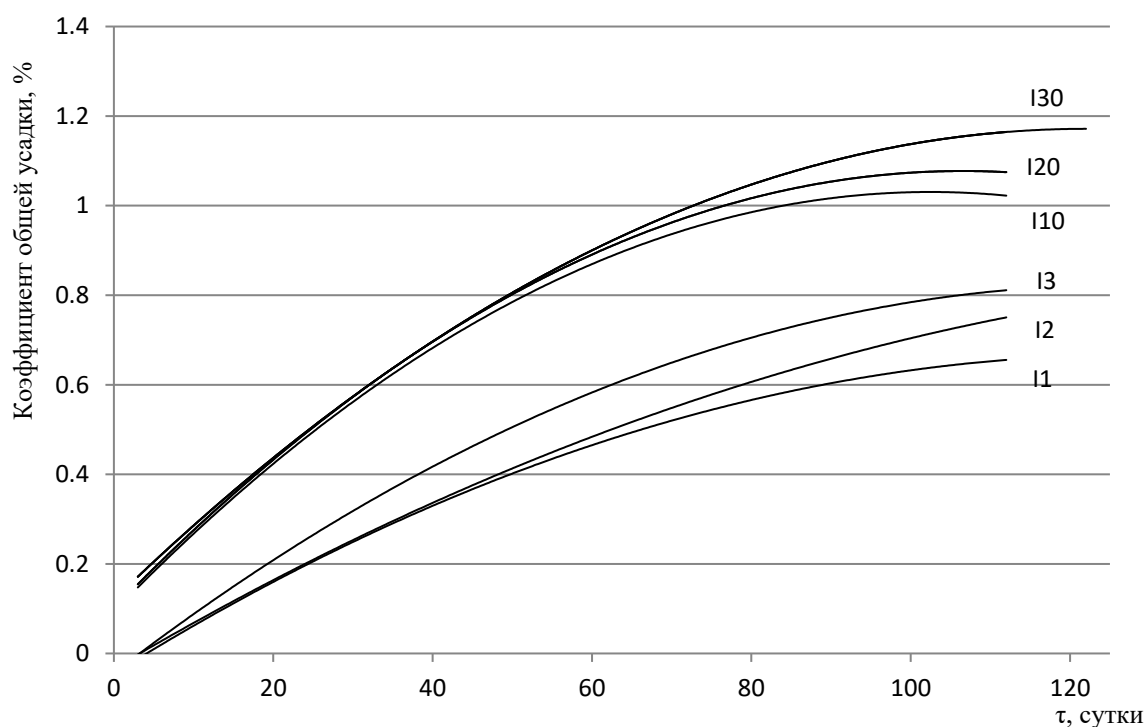


Рисунок 3 – Зависимость общего коэффициента усадки от времени для бетонов, модифицированных биодобавками

Как видно из рис. 3 коэффициенты усадки образцов бетона как модифицированного так и контрольного с возрастанием соотношения В:Ц имеют тенденцию к увеличению. Так, например, по сравнению с контрольным образцом I10 с соотношением воды и связующего 0,30, общая усадка модифицированного образца I1 снижена более чем на 30 %, соответственно. В то же время жидкая фаза альгинатной оболочки биодобавки, использованной в этом исследовании, способствует усилению гидратационных процессов цементных систем, постоянно обеспечивает потребность в гидратации системы с низким водоцементным отношением и уменьшает отрицательное давление в капиллярных порах. И этому же способствует образование плотной цементной матрицы, эффективно препятствующей потере капиллярной воды, тем самым снижая степень усадки при высыхании. В результате общая усадка за 120 дней для модифицированного биодобавками бетона может составить всего 670-680 мкм.

Бетон подвергается множеству негативных факторов, начиная от естественных процессов высыхания и заканчивая воздействием механических нагрузок и температурных колебаний. Эти факторы приводят к значительным изменениям в структуре материала, вызывая появление нежелательных дефектов, ухудшающих механические и физико-химические свойства конструкций [4, 5].

Для оценки трещиностойкости (вязкости разрушения) определяли и рассчитывали согласно ГОСТ 29167 следующие показатели: прочность на изгиб, модуль упругости (E_b), статический J-интеграл (J_i), статический критический коэффициент интенсивности напряжений (K_i), условный критический коэффициент интенсивности напряжений (K_c). Результаты приведены в таблица 3.

Таблица 3 – Характеристики трещиностойкости бетонных образцов, модифицированных биодобавкой

№ п/п	Характеристика	Образцы бетона					
		I1	I10	I2	I20	I3	I30
1	E_b , МПа	29463	19523,2	28861	18952,3	27256	18053,4
2	J_i , МДж/м ²	10,7	9,8	10,4	9,7	10,1	9,2
3	K_i , МПа×м ^{0,5}	0,81	0,73	0,79	0,71	0,78	0,69
4	K_c , кН×м ^{0,5}	0,79	0,66	0,78	0,65	0,76	0,60
5	Прочность на растяжение при изгиб, МПа	10,2	6,4	10,1	6,3	9,8	6,2

Сравнение полученных результатов, приведенных в таблице 3, показывает, что за счет введения биодобавки повышается прочность при растяжении на изгиб более чем на 30 %, модуль упругости бетона возрастает в 1,5 раза. При формировании кальцита в порах бетона (данные таблицы) происходит значительное увеличение энергии, приходящейся на развитие магистральных трещин и энергии, расходуемой на разрушение образца вследствие восприятия растягивающих напряжений скоплений кальцита. В результате условный критический коэффициент интенсивности напряжений повышается с 0,66 до 0,79. Проведенные исследования позволили подтвердить предположение о положительной роли биодобавки в бетоне для повышения его трещиностойкости, модуля упругости и прочности на изгиб.

4. Заключение

На основании результатов исследований, представленных в статье, можно сделать следующие выводы:

1. Сформированы бетонные смеси с биодобавками, содержащие иммобилизованные микроорганизмы *Sporosarcina pasteurii* и *Sporosarcina ureae* в соотношении 1:1, и оценена удобоукладываемость бетонных смесей.
2. В результате изучения поверхности среза образцов модифицированного бетона с применением электронного сканирующего микроскопа LYRA 3 TESCAN и оптического микроскопа ЛОМО МЕТАМ ЛВ-41 установлены устойчивые новой фазы кальцита в поровом пространстве.
3. Определены деформации усадки и оценены трещиностойкость бетонов, модифицированных уреазными биодобавками с учетом значений В:Ц. Установлены зависимости для каждой серии модифицированных и контрольных образцов коэффициента общей усадки от времени твердения.
4. Приведены оценки трещиностойкости бетонов по параметрам модуля упругости, статический J-интеграл, статический критический коэффициент интенсивности напряжений, условный критический коэффициент интенсивности напряжений.

Подводя итог, можно сказать, что устранение проблем усадки и трещинообразования бетона является необходимым условием для эффективного функционирования и долговечней эксплуатации железобетонных конструкций. Тщательное исследование механизмов происходящих процессов и интеграция новейших достижений науки и техники станут залогом успешного преодоления существующих трудностей и достижения высоких показателей долговечности и экономичности современного строительства.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Yardım Y., Gesoğlu M., Nahhab A. H. Durability of ultra-high performance fiber reinforced concrete against internal sulfate attack using gypsum-contaminated aggregates // *Construction and Building Materials*. 2025. V. 498. 144067. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2025.144067>.
2. Li J., Zhang Y., Wu Sh., Xin H. Effect of shrinkage-mitigating additives on flexural and compressive performance of ultra-high-performance concrete in corrosive environments // *Journal of Building Engineering*. 2025. 114761. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2025.114761>.
3. Dang J., Qian J., Zhao J., Xiao J., Jing H. Understanding the autogenous shrinkage of concrete with recycled fine brick aggregate: Effects of minimum particle size and initial water saturation // *Journal of Building Engineering*. 2025. V. 113. 114158. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2025.114158>.
4. Анпилов С. М., Ерофеев В. Т., Римшин В. И., Сколупович Ю. Л., Сорочайкин А. Н. Инновационные технологии строительства быстровозводимых зданий и сооружений // *Промышленное и гражданское строительство*. 2024. № 8. С. 5-13. doi: 10.33622/0869-7019.2024.08.05-13. EDN CXDPSN.
5. Han Y., Xie Y., Li W., Yue Q., Liu Y., Peng B. Using SAP to control the deformation of shrinkage-compensating concretes at early age // *Construction and Building Materials*. 2024. V. 416. 135139. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.135139>.
6. Gamage N., Patrisia Y., Gunasekara C., Law D.W., Houshyar S., Setunge S. Shrinkage induced crack control of concrete integrating synthetic textile and natural cellulosic fibres: Comparative review analysis // *Construction and Building Materials*. 2024. V. 427. 136275. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.136275>.
7. He M., Zhang L., Zhao J., Hadi M.N.S. A review of mixture design methods for self-compacting recycled concrete // *Journal of Building Engineering*. 2025. V. 113. 114085. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2025.114085>.
8. Shao R., Wu C., Li J. A comprehensive review on dry concrete: Application, raw material, preparation, mechanical, smart and durability performance // *Journal of Building Engineering*. 2022. V. 55. 104676. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2022.104676>.
9. Ерофеев В.Т., Афонин В.В., Зоткина М.М., Стенечкина К.С., Тюряхина Т.П., Лазарев А.В. Анализ свойств полимерных композитов с различными типами наполнителей // *Строительные материалы*. 2024. № 1–2. С. 100–109. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2024-821-1-2-100-109>. EDN ACZEED.
10. Zheng Y., Zhang Y., Zhuo J., Zhang Y., Wan C. A review of the mechanical properties and durability of basalt fiber-reinforced concrete // *Construction and Building Materials*. 2022. V. 359. 129360. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.129360>.
11. Li W., Qu F., Dong W., Mishra G., Shah S.P. A comprehensive review on self-sensing graphene/cementitious composites: A pathway toward next-generation smart concrete // *Construction and Building Materials*. 2022. V. 331. 127284. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.127284>.
12. Barbhuiya S., Das B.B., Rajput A., Katore V., Das A.K. Structural performance and implementation challenges of next-generation concrete materials // *Structures*. 2025. V. 81. 110169. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2025.110169>.
13. Bahraq A.A., Jose J., Shameem M., Maslehuddin M. A review on treatment techniques to improve the durability of recycled aggregate concrete: Enhancement mechanisms, performance and cost analysis // *Journal of Building Engineering*. 2022. V. 55. 104713. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2022.104713>.
14. Aghaee K., Khayat K.H. Effect of shrinkage-mitigating materials on performance of fiber-reinforced concrete – An overview // *Construction and Building Materials*. 2021. V. 305. 124586. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.124586>.
15. Стурова, В. А. Сталефибробетон с применением отходов местных производств для транспортных сооружений // *Строительные материалы*. 2023. № 1-2. С. 44-49. DOI 10.31659/0585-430X-2023-810-1-2-44-49. EDN OVFCJP.
16. Erofeev, V. Frame Construction Composites for Buildings and Structures in Aggressive Environments / V. Erofeev // *Procedia Engineering : Underground Urbanisation as a Prerequisite for Sustainable Development*, St.Petersburg, 12–15 сентября 2016 года. V. 165. Amsterdam: Elsevier Ltd, 2016. P. 1444-1447. DOI 10.1016/j.proeng.2016.11.877.
17. The Effect of Modifying Additives on the Performance Properties of Slag-Alkali Binders and Concretes / Zh. T. Aimenov, A. Z. Aimenov, V. T. Erofeev [et al.] // *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering*. 2024. V. 20, No. 1. P.162-170. DOI 10.22337/2587-9618-2024-20-1-162-170.
18. Дергунова Е.С., Гончарова М.А., Ерофеев В.Т. Комплексное исследование выносливости бетонов, модифицированных биодобавками// *Региональная архитектура и строительство*. 2025. № 3(64). С.20-25. DOI 10.54734/20722958_2025_3_20.
19. Vignesh J., Ramesh B., Xavier J.R., A review of recent trends in sustainable biopolymer-integrated concrete and its impact on mechanical performance and structural reliability // *International Journal of Biological Macromolecules*. 2025. V. 321. Part 2. 146408. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2025.146408>.
20. Pu Y., Li L., Shi X., Wang Q., Abomohra A. Recent advances in accelerated carbonation for improving cement-based materials and CO2 mitigation from a life cycle perspective// *Construction and Building Materials*. 2023. V. 388. 131695. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.131695>.

21. Ерофеев В.Т., Самченко С.В., Тараканов О.В., Максимова И.Н., Стенечкина К.С., Ерофеева И.В. От традиционных бетонов к бетонам нового поколения // Изв. вузов. Химия и хим. технология. 2025. Т. 68. №. 12. С. 83-95. DOI: 10.6060/ivkkt.20256812.7199.
22. Касаткин С.П., Соловьева В.Я., Степанова И.В., Кузнецов Д.В., Сеницин Д.А. Высокоэффективный наномодифицированный бетон повышенной прочности и долговечности // Нанотехнологии в строительстве. 2022. Т. 14. № 6. С. 493–500. <https://doi.org/10.15828/2075-8545-2022-14-6-493-500>.
23. Строкова В.В., Духанина У.Н., Балицкий Д.А., Дроздов О.И., Нелюбова В.В., Франк-Каменецкая О.В., Власов Д.Ю. Полиморфизм и морфология карбонатов кальция в технологиях строительных материалов, использующих бактериальную биоминерализацию (обзор) // Строительные материалы. 2022. № 1–2. С. 82–122. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2022-799-1-2-82-122>.
24. Zhang Y.S., Liu Y., Sun X.D., Zeng W., Xing H.P., Lin J.Z., Kang S.B., Yu L. Application of microbially induced calcium carbonate precipitation (MICP) technique in concrete crack repair: A review // Construction and Building Materials. 2024. V. 411. 134313. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.134313>.
25. Aytekin B., Mardani A., Yazici Ş. State-of-art review of bacteria-based self-healing concrete: Biomineralization process, crack healing, and mechanical properties // Construction and Building Materials. 2023. V. 378. 131198. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.131198>.
26. Гончарова М.А., Дергунова Е.С. Особенности применения процесса биоминерализации для улучшения структурно-прочностных свойств бетона // Строительные материалы. 2023. № 1-2. С. 25-33. DOI 10.31659/0585-430X-2023-810-1-2-25-31.
27. Строкова В.В., Власов Д.Ю., Франк-Каменецкая О.В., Духанина У.Н., Балицкий Д.А. Применение микробной карбонатной биоминерализации в биотехнологиях создания и восстановления строительных материалов: анализ состояния и перспективы развития // Строительные материалы. 2019. № 9. С. 83-103. DOI: 10.31659/0585-430X-2019-774-9-83-103.
28. Ерофеев, В. Т. Повышение долговечности и экологичности зданий и сооружений текстильной промышленности путем применения материалов, модифицированных микробиологической добавкой / В. Т. Ерофеев, С. Д. С. Аль Дулайми, А. В. Дергунова // Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности. 2021. № 3(393). С. 141-146. – DOI 10.47367/0021-3497_2021_3_141.
29. Lavlinskaya M.S., Sorokin A.V., Zuev Yu.F., Holyavka M.G., Artyukhov V.G. Adsorption immobilization of enzymes on alginates: properties and use of drugs based on them. Short review // Sorbtionnyye i khromatograficheskie protsessy. 2023. V. 23(5). pp. 924-937. (Russ.). <https://doi.org/10.17308/sorpchrom.2023.23/11727>.
30. Daneshvar D., Behnood A., Robisson A. Interfacial bond in concrete-to-concrete composites: A review // Construction and Building Materials. 2022. V. 359. 129195. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.129195>.
31. Mao Y., Liu J., Shi C. Autogenous shrinkage and drying shrinkage of recycled aggregate concrete: A review // Journal of Cleaner Production. 2021. V. 295. 126435. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126435>.

REFERENCES

1. Yardım Y., Gesoğlu M., Nahhab A. H. Durability of ultra-high performance fiber reinforced concrete against internal sulfate attack using gypsum-contaminated aggregates. Construction and Building Materials. 2025. V. 498. 144067. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2025.144067>.
2. Li J., Zhang Y., Wu Sh., Xin H. Effect of shrinkage-mitigating additives on flexural and compressive performance of ultra-high-performance concrete in corrosive environments. Journal of Building Engineering. 2025. 114761. <https://doi.org/10.1016/j.job.2025.114761>.
3. Dang J., Qian J., Zhao J., Xiao J., Jing H. Understanding the autogenous shrinkage of concrete with recycled fine brick aggregate: Effects of minimum particle size and initial water saturation. Journal of Building Engineering. 2025. V. 113. 114158. <https://doi.org/10.1016/j.job.2025.114158>.
4. Anpilov S. M., Erofeev V. T., Rimshin V. I., Skolubovich Yu. L., Sorochaykin A. N. Innovative Technologies for the Construction of Prefabricated Buildings and Structures. Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo [Industrial and Civil Engineering]. 2024. No. 8. Pp. 5-13. (rus). doi: 10.33622/0869-7019.2024.08.05-13.
5. Han Y., Xie Y., Li W., Yue Q., Liu Y., Peng B. Using SAP to control the deformation of shrinkage-compensating concretes at early age. Construction and Building Materials. 2024. V. 416. 135139. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.135139>.
6. Gamage N., Patrisia Y., Gunasekara C., Law D.W., Houshyar S., Setunge S. Shrinkage induced crack control of concrete integrating synthetic textile and natural cellulosic fibres: Comparative review analysis. Construction and Building Materials. 2024. V. 427. 136275. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.136275>.
7. He M., Zhang L., Zhao J., Hadi M.N.S. A review of mixture design methods for self-compacting recycled concrete. Journal of Building Engineering. 2025. V. 113. 114085. <https://doi.org/10.1016/j.job.2025.114085>.
8. Shao R., Wu C., Li J. A comprehensive review on dry concrete: Application, raw material, preparation, mechanical, smart and durability performance. Journal of Building Engineering. 2022. V. 55. 104676. <https://doi.org/10.1016/j.job.2022.104676>.

9. Erofeev V.T., Afonin V.V., Zotkina M.M., Stenechkina K.S., Tyuryakhina T.P., Lazarev A.V. Analysis of properties of polymer composites with various types of fillers. *Stroitel'nye Materialy [Construction Materials]*. 2024. No. 1–2, Pp. 100–109. (rus). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2024-821-1-2-100-109>.
10. Zheng Y., Zhang Y., Zhuo J., Zhang Y., Wan C. A review of the mechanical properties and durability of basalt fiber-reinforced concrete. *Construction and Building Materials*. 2022. V. 359. 129360. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.129360>.
11. Li W., Qu F., Dong W., Mishra G., Shah S.P. A comprehensive review on self-sensing graphene/cementitious composites: A pathway toward next-generation smart concrete. *Construction and Building Materials*. 2022. V. 331. 127284. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.127284>.
12. Barbhuiya S., Das B.B., Rajput A., Katare V., Das A.K. Structural performance and implementation challenges of next-generation concrete materials. *Structures*. 2025. V. 81. 110169, <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2025.110169>.
13. Bahraq A.A., Jose J., Shameem M., Maslehuddin M. A review on treatment techniques to improve the durability of recycled aggregate concrete: Enhancement mechanisms, performance and cost analysis. *Journal of Building Engineering*. 2022. V. 55. 104713. <https://doi.org/10.1016/j.job.2022.104713>.
14. Aghae K., Khayat K.H. Effect of shrinkage-mitigating materials on performance of fiber-reinforced concrete – An overview. *Construction and Building Materials*. 2021. V. 305. 124586. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.124586>.
15. Sturova V.A. Steel Fiber Concrete with the use of local production waste for transport facilities. *Stroitel'nye Materialy [Construction Materials]*. 2023. No. 1–2, Pp. 44–49. (rus.). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2023-810-1-2-44-49>.
16. Erofeev, V. Frame Construction Composites for Buildings and Structures in Aggressive Environments / V. Erofeev // *Procedia Engineering : Underground Urbanisation as a Prerequisite for Sustainable Development*, St.Petersburg, 12–15 сентября 2016 года. Vol. 165. Amsterdam: Elsevier Ltd, 2016. P. 1444-1447. DOI 10.1016/j.proeng.2016.11.877.
17. Aimenov Z., Aimenov A., Erofeev V., Sabitov L., Sanyagina Y. The Effect of Modifying Additives on the Performance Properties of Slag-Alkali Binders and Concretes. *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering*. 2024. V.20 (No 1). Pp. 162-170. <https://doi.org/10.22337/2587-9618-2024-20-1-162-170>.
18. Dergunova E.S., Goncharova M.A., Erofeev V.T. Comprehensive study of the endurance of concretes modified with bio-admixtures. *Regional architecture and engineering*. 2025. № 3(64). Pp.20-25 (rus). DOI 10.54734/20722958_2025_3_20. EDN TOOBWD.
19. Vignesh J., Ramesh B., Xavier J.R., A review of recent trends in sustainable biopolymer-integrated concrete and its impact on mechanical performance and structural reliability. *International Journal of Biological Macromolecules*. 2025. V. 321. Part 2. 146408. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2025.146408>.
20. Pu Y., Li L., Shi X., Wang Q., Abomohra A. Recent advances in accelerated carbonation for improving cement-based materials and CO2 mitigation from a life cycle perspective. *Construction and Building Materials*. 2023. V. 388. 131695. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.131695>.
21. Erofeev V.T., Samchenko S.V., Tarakanov Oh.V., Maksimova I.N., Stenechkina K.S., Erofeeva I.V. From traditional concretes to new generation concretes. *ChemChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.]*. 2025. V. 68. N 12. P. 83-95. (rus.) DOI: 10.6060/ivkkt.20256812.7199.
22. Kasatkin S.P., Soloviova V.Y., Stepanova I.V., Kuznetsov D.V., Sinitsin D.A. High-performance nano-modified concrete of increased strength and durability. *Nanotechnologies in construction*. 2022. 14(6). P. 493–500. <https://doi.org/10.15828/2075-8545-2022-14-6-493-500>. EDN: SNRCRN.
23. Strokova V.V., Dukhanina U.N., Balitsky D.A., Drozdov O.I., Nelubova V.V., Frank-Kamenetskaya O.V., Vlasov D.Yu. Polymorphism and morphology of calcium carbonates in construction materials technologies using microbial biomineralization (review). *Stroitel'nye Materialy [Construction Materials]*. 2022. No. 1–2, Pp. 82–122. (rus.). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2022-799-1-2-82-122>.
24. Zhang Y.S., Liu Y., Sun X.D., Zeng W., Xing H.P., Lin J.Z., Kang S.B., Yu L. Application of microbially induced calcium carbonate precipitation (MICP) technique in concrete crack repair: A review. *Construction and Building Materials*. 2024. V. 411. 134313. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.134313>.
25. Aytakin B., Mardani A., Yazici Ş. State-of-art review of bacteria-based self-healing concrete: Biomineralization process, crack healing, and mechanical properties. *Construction and Building Materials*. 2023. V. 378. 131198. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.131198>.
26. Goncharova M.A., Dergunova E.S. Features of the application of the bio-mineralization process to improve the structural and strength properties of concrete. *Stroitel'nye Materialy [Construction Materials]*. 2023. No. 1–2, Pp. 25–31. (rus.). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2023-810-1-2-25-31>.
27. Strokova V.V., Vlasov D.Yu., Frank-Kamenetskaya O.V., Dukhanina U.N., Balitsky D.A. Application of microbial carbonate biomineralization in biotechnologies of building materials creation and restoration: analysis of the state and prospects of development. *Stroitel'nye Materialy [Construction Materials]*. 2019. No. 9, Pp. 83–103. (rus). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2019-774-9-83-103>.
28. Ерофеев, В. Т. Повышение долговечности и экологичности зданий и сооружений текстильной промышленности путем применения материалов, модифицированных микробиологической добавкой / В. Т.

Ерофеев, С. Д. С. Аль Дулайми, А. В. Дергунова // Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности. 2021. № 3(393). С. 141-146. – DOI 10.47367/0021-3497_2021_3_141.

29. Lavlinskaya M.S., Sorokin A.V., Zuev Yu.F., Holyavka M.G., Artyukhov V.G. Adsorption immobilization of enzymes on alginates: properties and use of drugs based on them. Short review. Sorbtsionnye i khromatograficheskie protsessy. 2023. V. 23(5). Pp. 924-937. (rus). <https://doi.org/10.17308/sorpchrom.2023.23/11727>.

30. Daneshvar D., Behnood A., Robisson A. Interfacial bond in concrete-to-concrete composites: A review. Construction and Building Materials. 2022. V. 359. 129195. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.129195>.

31. Mao Y., Liu J., Shi C. Autogenous shrinkage and drying shrinkage of recycled aggregate concrete: A review. Journal of Cleaner Production. 2021. V. 295. 126435. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126435>.

Информация об авторах:

Ерофеев Владимир Трофимович

ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет», Россия, г. Москва

доктор технических наук, профессор, профессор кафедры строительных материалов

E-mail: yarofeevvt@mail.ru

Дергунова Елена Сергеевна

ФГБОУ ВО «Липецкий государственный технический университет», Россия, г. Липецк

кандидат химических наук, доцент

E-mail: dergunova14@yandex.ru

Гончарова Маргарита Александровна

ФГБОУ ВО «Липецкий государственный технический университет», Россия, г. Липецк

доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой строительного материаловедения и дорожных технологий,

E-mail: magoncharova777@yandex.ru

Дергунова Валентина Витальевна

ФГБОУ ВО «Липецкий государственный технический университет», Россия, г. Липецк

студент кафедры химии

E-mail: valedergunova@yandex.ru

Information about authors:

Yerofeyev, Vladimir T.

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

Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Building Materials

E-mail: yarofeevvt@mail.ru

Dergunova Elena S.

Lipetsk State Technical University, Lipetsk, Russia

Candidate of Chemical Sciences, Associate Professor

E-mail: dergunova14@yandex.ru

Goncharova Margarita A.

Lipetsk State Technical University, Lipetsk, Russia

Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Building Materials Science and Road Technologies,

E-mail: magoncharova777@yandex.ru

Dergunova Valentina V.

Lipetsk State Technical University, Lipetsk, Russia

student of the Department of Chemistry

E-mail: valedergunova@yandex.ru

Статья поступила в редакцию 19.02.2026

Одобрена после рецензирования 12.03.2026

Принята к публикации 01.04.2026

The article was submitted 19.02.2026

Approved after reviewing 12.03.2026

Accepted for publication 01.04.2026