

Academia. Архитектура и строительство, № 1, стр. 113–120.

Academia. Architecture and Construction, no. 1, pp. 113–120.

Исследования и теория

Научная статья

УДК 699.1

DOI: 10.22337/2077-9038-2026-1-113-120

Долговечность бетонов, модифицированных биодобавками на основе микробиологического консорциума

Гончарова Маргарита Александровна (Липецк). Доктор технических наук, профессор, советник РААСН. Липецкий государственный технический университет (Россия, 398055, Липецк, ул. Московская, 30. ЛГТУ). Эл. почта: magoncharova777@yandex.ru

Дергунова Елена Сергеевна (Липецк). Кандидат химических наук, доцент. Липецкий государственный технический университет (Россия, 398055, Липецк, ул. Московская, 30. ЛГТУ). Эл. почта: dergunova14@yandex.ru

Ерофеев Владимир Трофимович (Москва). Доктор технических наук, профессор, академик РААСН. Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (Россия, 129337, Москва, Ярославское шоссе, 26. НИУ МГСУ); Эл. почта: erofeevvt@bk.ru

Аннотация. В статье приведены данные по оценке долговечности бетонов, модифицированных биодобавками на основе микробиологического консорциума, содержащего уреазные бактерии *Urobacillus Pasteuri*, *Sporosarcina pasteurii*, *Sporosarcina ugaea* и др., выделенные из почвы. Были разработаны составы модифицированного бетона на основе портландцементов согласно ГОСТ 31108-2020 «Цементы общестроительные. Технические условия»: бездобавочный портландцемент ЦЕМ 0 32,5Н, портландцемент с известняком ЦЕМ II/A-И 32,5Н, портландцемент со шлаком ЦЕМ II/B-Ш 32,5Н. Модифицированные бетонные системы оценивались по удобоукладываемости, средней плотности, сохраняемости и показателю водоотделения (расслаиваемости), пределу прочности на сжатие после 28 дней твердения. По результатам исследований были скорректированы рецептуры исследуемых составов с учётом значений водоцементного отношения и содержания биодобавки на уровнях 0,42–0,45 и 2-3 (% масс.) соответственно. Изучены режим и условия твердения, а также оценена пористость и морозостойкость модифицированного бетона уреазными биодобавками. Рассчитаны величины критического коэффициента интенсивности напряжений при нормальном отрыве модифицированного бетона, а также остаточной долговечности после эксплуатации бетона в условиях силовых и температурно-влажностных испытаний. Применение биодобавок способствует увеличению остаточной долговечности более чем на 10-15% после эксплуатации в заданных условиях.

Ключевые слова: остаточная долговечность, бетонная смесь, пористость, морозостойкость, прочность

Для цитирования: Гончарова М.А., Дергунова Е.С., Ерофеев В.Т. Долговечность бетонов, модифицированных биодобавками на основе микробиологического консорциума // Academia. Архитектура и строительство. 2026. № 1. С. 113–120. DOI: 10.22337/2077-9038-2026-1-113-120.

Durability of Concretes Modified with Bioadditives Based on a Microbiological Consortium

Goncharova Margarita A. (Lipetsk). Doctor of Sciences in Technology, Professor, Advisor to the RAASN. Lipetsk State Technical University (30 Moskovskaya St., Lipetsk, 398055, Russia. LGTU). E-mail: magoncharova777@yandex.ru

Dergunova Elena S. (Lipetsk). Candidate of Sciences in Chemistry, Docent. Lipetsk State Technical University (30 Moskovskaya St., Lipetsk, 398055, Russia. LGTU). E-mail: dergunova14@yandex.ru

Yerofeyev Vladimir T. (Moscow). Doctor of Sciences in Technology, Professor, Academician of the RAACS. National Research Moscow State University of Civil Engineering (Russia, 129337, Moscow, Yaroslavskoe Shosse, 26. NRU MGSU); Scientific Research Institute of Building Physics of the Russian Academy of Architecture and Building Sciences (Russia, 127238, Moscow, Lokomotivny Proezd, 21. NIISF RAASN). E-mail: erofeevvt@bk.ru

Annotation. The article presents data on the assessment of the durability of concretes modified with bioadditives based on a microbiological consortium containing urease bacteria *Urobacillus Pasteuri*, *Sporosarcina pasteurii*, *Sporosarcina ureae*, etc., isolated from the soil. Modified concrete compositions based on Portland cements were developed in accordance with Russian State Standard GOST 31108-2020: Portland cement CEM 0 32.5N, CEM II/A-I 32.5N, CEM II/B-W 32.5N. Modified concrete systems were evaluated by workability, average density, durability and water separation (delamination), and compressive strength after 28 days of hardening. According to the research results, the formulations of the studied formulations were adjusted taking into account the values of the water-cement ratio and the content of dietary supplements at the levels of 0.42-0.45 and 2-3 (% mass.), respectively. The hardening regime and conditions were studied, as well as the porosity and frost resistance of modified concrete with urease additives were evaluated. The values of the critical stress intensity coefficient during normal separation of modified concrete, as well as the residual durability after concrete operation under conditions of strength and temperature and humidity tests, are calculated. The use of dietary supplements helps to increase the residual durability by more than 10-15% after use under specified conditions.

Keywords: residual durability, concrete mix, porosity, frost resistance, strength

For citation. Goncharova M.A., Dergunova E.C., Yerofeyev V.T. Durability of Concretes Modified with Bioadditives Based on a Microbiological Consortium. In: *Academia. Architecture and construction*, 2026, no. 1, pp. 113–120, doi: 10.22337/2077-9038-2026-1-113-120.

Введение

В настоящее время в строительной отрасли исследователями применяются различные природоподобные технологии для придания необходимых свойств цементным материалам. Одной из природоподобных технологий является биоминерализация – процесс образования различных минералов (например, кальцит, арагонит, гидроксипатит и др.), путём осаждения кристаллов из растворов в бактериальных клетках или внеклеточном пространстве, катализируемый ферментами микроорганизмов [1, с. 66; 2; 3]. Зарубежными и отечественными учёными проводились исследования модифицированных бетонов и цементных композитов, связанные с определением таких свойств, как прочность, морозоустойчивость, сопротивление к проникновению хлоридов и сульфатной коррозии и других характеристик [3–14]. Так описаны работы по «заживлению» поверхностных трещин и самовосстановлению внутренней матрицы цементного раствора [4–7]. Особое внимание уделяется факторам, влияющим на способность бетона, модифицированного бактериями, заживлять трещины, а именно: ширина трещин, условия твердения бетона, температура твердения, наличие внешнего источника кальция, старение бетона и прочность на сжатие. Также представлены и обобщены результаты изучения влияния бактерий на такие свойства бетона, как водопроницаемость [4], водопоглощение [9–10] и проницаемость для хлорид-ионов [10].

Отдельно были изучены минералы, полученные с применением микроорганизмов. Исследователями были применены современные методы анализа, которые позволили установить структуру образующихся кристаллов. В большинстве случаев, это была модификация карбоната кальция – кальцит [9,

11], получаемого по реакции $\text{Ca}^{2+} + \text{CO}_2 = \text{CaCO}_3$, в отдельных случаях получали арагонит и другие кристаллы [11].

Однако вопросы, связанные с долговечностью бетона, изготовленного с использованием биодобавок на основе уреазных микроорганизмов, остаются открытыми. Необходимо учитывать множество факторов, влияющих на способность строительного материала сохранять свои эксплуатационные свойства на протяжении длительного периода эксплуатации [12-21]. Следовательно, крайне важно провести детальное исследование и оценить долговечность модифицированных бетонов уреазными биодобавками в реальных условиях окружающей среды. Цель данной работы – исследовать долговечность модифицированных бетонов уреазными биодобавками. Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- 1) разработать состав модифицированного бетона консорциумом микроорганизмов;
- 2) оценить влияние режима и условия твердения, пористость и морозостойкость модифицированных бетонных систем;
- 3) провести исследования по влиянию условий окружающей среды (влажность, температура, влияние химических веществ) на прочность модифицированных бетонных систем;
- 4) оценить значения остаточной долговечности после эксплуатации бетона в условиях силовых и температурно-влажностных испытаний с применением величин критического коэффициента интенсивности напряжений при нормальном отрыве модифицированного бетона.

В качестве вяжущего использовали портландцементы согласно ГОСТ 31108-2020 «Цементы общестроительные. Технические условия»¹: бездобавочный портландцемент ЦЕМ

О 32,5Н, портландцемент с известняком ЦЕМ II/A-И 32,5Н, портландцемент со шлаком ЦЕМ II/B-Ш 32,5Н.

В качестве мелкого заполнителя применяли полифракционный песок (ГОСТ 6139-2020 «Песок для испытаний цемента. Технические условия»²).

В качестве крупного заполнителя использовали щебень из гравия согласно ГОСТ 8267-93 «Щебень и гравий из плотных горных пород для строительных работ. Технические условия (с Изменениями N 1-4)»³ фракции 5-20.

Воду для приготовления растворов использовали согласно ГОСТ 23732-2011 «Вода для бетонов и строительных растворов. Технические условия»⁴.

В качестве добавок использовали консорциум микроорганизмов, содержащих уреазные бактерии, иммобилизованные методом «инкапсуляции в гель» с применением каппа-каррагинана с добавлением мочевины и питательных веществ для поддержания жизнедеятельности бактерий.

Консорциум микроорганизмов, включал в себя бактерии *Urobacillus Pasteuri*, *Sporosarcina pasteurii*, *Sporosarcina ureae* и др., выделенные из почвы. Идентификацию микроорганизмов в консорциуме проводили методом ПЦР. Оценку активность консорциума осуществляли по уреазному тесту с применением мочевины.

Для оценки долговечности использовали данные, полученные при определении пористости, прочности, водонепроницаемости, морозостойкости, химической стойкости бетонов согласно следующим стандартам: ГОСТ 12730.4-2020 «Бетоны. Методы определения параметров пористости»⁵, ГОСТ 18105-2018 «Бетоны. Правила контроля и оценки прочности»⁶, ГОСТ 12730.5-2018 «Бетоны. Методы определения водонепроницаемости»⁷, ГОСТ 10060-2012 «Бетоны. Методы определения морозостойкости»⁸, ГОСТ Р 58896-2020 «Бетоны химически стойкие. Методы испытаний»⁹.

Для исследования свойств полученных бетонных образцов использовали следующее оборудование: пресс гидравлический ПСУ-50, электропечь лабораторная SNOL 6.7/1300, измеритель морозостойкости «БЕТОН-Фрост», устройство для испытания бетона на водонепроницаемость УВБ-МГ4.01, климатическая камера для коррозионных испытаний с градиентом температуры (диапазон испытаний 5–80 °С), камера нормального твердения и автоклав лабораторный для твердения цементных композитов КЛАВ-Ц-2000, камера солнечной радиации с регуляцией температуры и влажности.

Под долговечностью бетона понимается состояние сохранности его внутренней структуры, обеспечивающее со-

противление кратковременным и длительным воздействиям различной природы и характеризующейся уровнями расчётной докритической трещиностойкости [22–25]. Наряду с такими важными факторами, влияющими на долговечность бетона, как его структура и состав, наличие добавок имеет весьма существенное значение для формирования прочного и долговечного бетона [9–13].

Разработка составов бетонных смесей, модифицированных биодобавками

Как было указано ранее, для создания бетонных смесей использовали различные типы портландцемента:

I – ЦЕМ О 32,5Н;

II – портландцемент с известняком ЦЕМ II/A-И 32,5Н;

III – портландцемент со шлаком ЦЕМ II/B-Ш 32,5Н;

Выбор вяжущих был основан на результатах изучения влияния свойств портландцементов с инертными (известняк) и активными (шлак) минеральными добавками на поведение биодобавок в различных бетонных смесях. Водоцементное отношение – 0,4-0,6. Содержание биодобавки для бетона варьировали от 1 до 5% (масс.). Активность добавки составила $7,32 \cdot 10^8$ КОЕ/мл. Состав бетонных смесей на примере портландцемента I приведён в таблице 1 (расход цемента и песка постоянный – 419 кг, 502 кг соответственно).

Формирование бетонных смесей для портландцементов ЦЕМ II/A-И 32,5Н и ЦЕМ II/B-Ш 32,5Н проводили, как и для портландцемента ЦЕМ О 32,5Н. Оценку качества каждого образца бетонной смеси проводили по удобоукладываемости, средней плотности, сохраняемости и показателю водоотделения (расслаиваемости) после однократного вибрирования, а также оценивали предел прочности на сжатие после 28 дней твердения. По результатам исследования (табл. 2) были скорректированы рецептуры исследуемых составов (водоцементное отношение и содержание биодобавки) и выбраны рациональные.

Установлено, что для всех образцов, изготовленных с применением различных типов портландцемента, существенное влияние на показатели бетонных смесей оказывает биодобавка. Положительное воздействие на данные показатели демонстрируется тем, что при применении её происходит повышение удобоукладываемости и увеличение сохраняемости бетонной смеси. Этот эффект достигается за счёт использования био-

Таблица 1. Состав бетонных смесей на основе портландцемента I – ЦЕМ О 32,5Н на 1 м³

Маркировка партии образцов	Щ, кг	Вода, кг	В:Ц	*Соответствующее содержание биодобавки, %
I-40-Д*	1130	167	0,40	1...5
I-45-Д*	1130	189	0,45	1...5
I-50-Д*	1125	210	0,50	1...5
I-50-Д*	1125	225	0,55	1...5
I-60-Д*	1121	251	0,60	1...5

¹ https://m-certif.ru/sites/default/files/gost_31108-2020.pdf

² <https://docs.cntd.ru/document/1200174753>

³ <https://docs.cntd.ru/search?q=ГОСТ%208267-93%20>

⁴ <https://docs.cntd.ru/search?q=ГОСТ%2023732-2011>

⁵ <https://docs.cntd.ru/document/1200177302>

⁶ <https://docs.cntd.ru/document/1200164028>

⁷ <https://docs.cntd.ru/document/1200163874>

⁸ <https://docs.cntd.ru/document/1200100906>

⁹ <https://docs.cntd.ru/document/1200173807>

Таблица 2. Характеристика бетонных смесей на основе портландцементов различных типов

№п/п	Характеристика бетонных смесей	Бетонные составы на основе		
		I – ЦЕМ 0 32,5Н	II – ЦЕМ II/A-II 32,5Н	III – ЦЕМ II/B-Ш 32,5Н
1	Маркировка партии образцов	I-50-3	II-40-2	III-45-3
2	Содержание биодобавки, %	3	2	3
3	Водоцементное отношение	0,50	0,40	0,45
4	Удобоукладываемость	П2	П3	П2
5	Средняя плотность, кг/м ³	2310	2420	2570
6	Сохраняемость, ч	4	4,5	4
7	Показатель водоотделения, %	<0,4	<0,4	<0,4
	Предел прочности на сжатие, МПа	46,6	51,2	53,9

полимерной оболочки, сохраняющей микроорганизмы, – из каппа-карагинана, способствующего снижению поверхностного натяжения между фазами в смеси и увеличению смачиваемости цемента, что ведёт к увеличению удобоукладываемости.

Влияние технологии модифицирования бетона (режим и условия твердения бетона, пористость, морозостойкость)

Технология производства бетона играет ключевую роль в обеспечении качества строительных конструкций. Важнейшими аспектами этой технологии являются достижение однородности распределения компонентов бетона, оптимизация режима и условий твердения, а также контроль пористости и морозостойкости материала. Однако применение биоматериалов требует более тщательно подходить к технологии производства модифицированного бетона. Скорость твердения бетона зависит от условий окружающей среды и характеристик бетонной смеси. Решающим фактором при выборе способа твердения модифицированного бетона является температура, так как уреазные микроорганизмы при высоких температурах могут погибнуть или вернуться в споривидное состояние. Также была оценена пористость и морозостойкость бетонных образцов, модифицированных биодобавками. Были получены фотографии срезов образцов бетонов с применением сканирующего электронного микроскопа TESCAN Mira 3 LMU (рис. 1).

Также по результатам пориметрии было построено распределение пор по размерам в образцах бетона, модифицированных биодобавками (рис. 2).

Как видно из полученных данных, размер пор у бетона на основе портландцемента III варьируется в диапазоне 1500–1000 Å, это связано с тем, что присутствие шлака в матрице образует более прочную структуру, формируя неоднородные поры, однако применение биодобавки сглаживает и уменьшает пористость по сравнению с контрольным образцом. Присутствие известняка в цементе позволяет получать равномерные смеси, здесь биодобавка демонстрирует синергию, уменьшая поры и снижая их общий объём по сравнению с соответствующим образцом без добавок. Также была проведена оценка морозостойкости модифицированных образцов согласно ГОСТ 10060–2012. Полученные результаты представлены на рисунке 3.

Как видно из приведённых данных, морозостойкость контрольных и модифицированных образцов бетона на портландцементе ЦЕМ II/A-II 32,5Н и ЦЕМ II/B-Ш 32,5Н выше, чем на портландцементе ЦЕМ 0 32,5Н. Это связано с тем, что введение шлака в портландцемент увеличивает вязкость разрушения бетона за счёт стабилизации внутренних объёмных изменений в процессе замораживания-оттаивания. При введении известняка в состав цемента уменьшается вероятность образования вторичного эттрингита, что приводит к повышению морозостойкости затвердевшего цементного камня. Введение биодобавки также способствует повышению морозостойкости образцов более чем на 10 %. Также необходимо отметить корреляцию общей пористости и морозостойкости модифицированных образцов бетона (рис. 3).

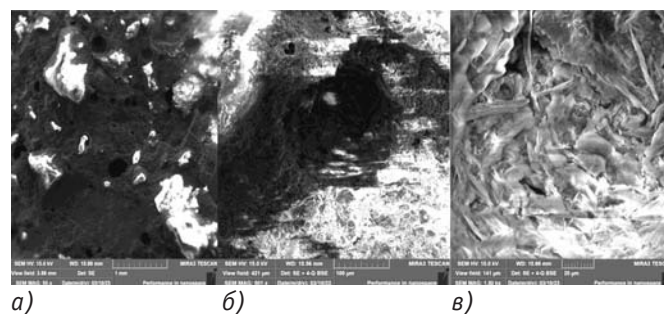


Рис. 1. Фото пор в срезе модифицированного бетона (образцы из партии I-50-3) при увеличении: а) 55х; б) 501х; в) 1500х

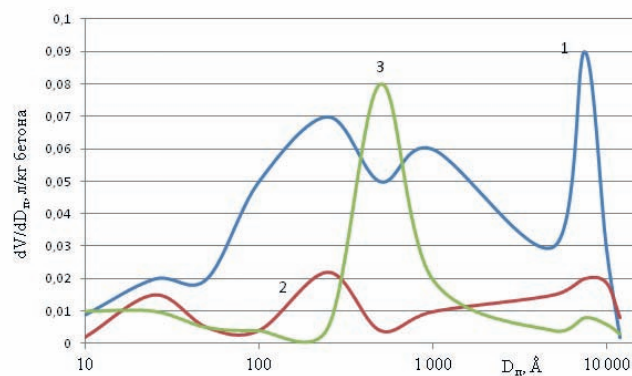
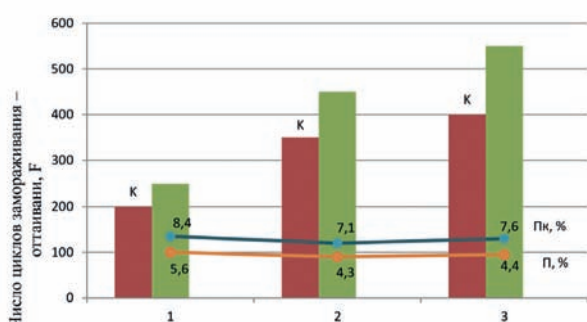


Рис. 2. Распределение пор по размерам в образцах бетона, модифицированных биодобавками, в возрасте 28 суток

Образование кальцитов в порах образцов не позволяет воде проникать в цементную матрицу, тормозя изменение фазового состава кристаллических гидратов затвердевшего цемента при изменении температуры.

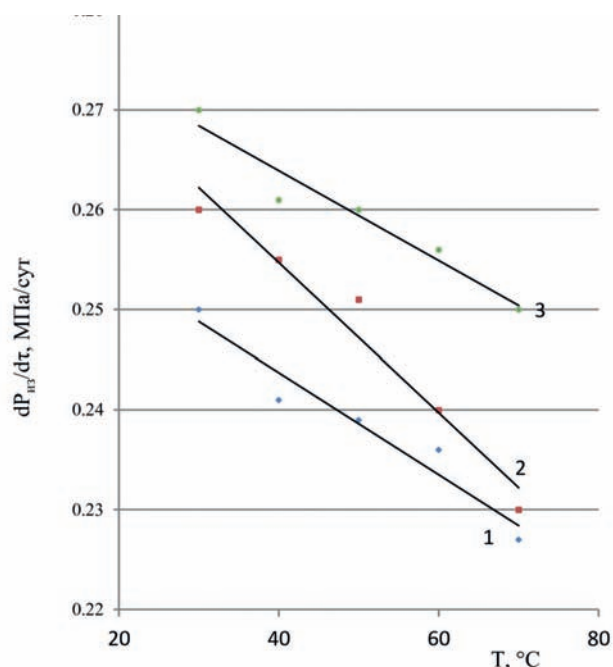
Влияние условий окружающей среды на предел прочности бетона в течение времени

Многими исследователями подчёркивается, что условия окружающей среды (влажность, температура, солнечная радиация) влияют на прочность бетона [20-25]. Влажность и осадки могут вызывать ряд разрушительных процессов, которые со временем ослабляют структуру бетона и снижают его прочность



Партии образцов: 1 – I-50-3; 2 – II-40-2; 3 – III-45-3

Рис. 3. Результаты определения морозостойкости и общей пористости модифицированных бетонов и соответствующих контрольных образцов без биодобавки



Бетонные системы на основе:

- 1 – портландцемент ЦЕМ 0 32,5Н;
- 2 – портландцемент с известняком ЦЕМ II/A-И 32,5Н;
- 3 – портландцемент со шлаком ЦЕМ II/B-Ш 32,5Н

Рис. 4. Зависимость скорости изменения предела прочности на изгиб от температуры в интервале 30–70 °С для образцов бетонных систем I–III, модифицированных биодобавкой

[26]. Резкое изменение температуры является одним из самых значительных факторов, влияющих на бетон. Температурные колебания могут вызывать тепловое расширение и сжатие, приводящие к образованию трещин, ускорение или замедление процессов гидратации цемента, изменение скорости набора прочности бетона, а солнечная радиация – ускоренное испарение влаги с поверхности свежесушеного бетона, неравномерный нагрев конструкций, приводящий к термическим напряжениям, а также деградацию некоторых компонентов бетона под воздействием ультрафиолетовых лучей [24]. Была исследована кинетика разрушения модифицированных бетонов после выдерживания в климатической камере [температура (Т) 30–70 °С, интегральная плотность теплового потока (D) 550±10 Вт/м², влажность (W) – 80%], и были получены зависимости предела прочности на изгиб от времени экспозиции в климатической камере при различных температурах, представленные на рисунке 4:

Были получены зависимости предела прочности на изгиб от комплексного фактора (температуры, влажности и солнечной радиации). Установлено, что бетонные системы II и III устойчивы к температуре в диапазоне 30–60 °С, затем при повышении температуры идет скачкообразное снижение предела прочности на изгиб из-за охрупчивания цементной матрицы у III партии и разбухания известняка у партии II. Установлено, что модифицированный бетон справляется с негативными условиями лучше, чем образцы, изготовленные без добавок, что демонстрирует снижение прочности на изгиб у контрольных образцов. Бетоны, полученные с применением биодобавок при эксперименте прочность не снижают, что является следствием снижения пористости бетона за счёт заполнения пор бетона кальцитом.

Определение остаточной долговечности бетона после эксплуатации в условиях силовых и температурно-влажностных воздействий

Определение остаточной долговечности бетона (остаточного ресурса) после эксплуатации – задача, которая включает оценку изменения прочностных свойств материала во времени с учётом внешних факторов и дефектов конструкций. Это позволит в дальнейшем рассчитать вероятность безотказной работы конструкции или всего объекта в течение времени; определить, с какой вероятностью следует ожидать отказа конструкций; планировать сроки и стоимость капитального ремонта или реконструкции.

Для получения значений остаточной долговечности модифицированного бетона использовались значения прочности, модуля упругости, водопоглощения, морозостойкости, водоцементного отношения и прочих факторов. Расчёт производился согласно теории старения и методике предложенной С.Н. Леоновичем [22; 26]. Были рассчитаны величины коэффициента интенсивности напряжений при нормальном отрыве модифицированного бетона, а также остаточной долговечности после эксплуатации бетона в условиях силовых и температурно-влажностных испытаний [26]. Результаты расчёта для характеристик модифицированных бетонов приведены в таблице 3.

Из данных, представленных в таблице, следует, что значения критического коэффициента интенсивности напряжений при нормальном отрыве для всех модифицированных образцов находятся в диапазоне 1,13–1,96 МПа·√м, что превышает на 35–55% значения, полученные для образцов бетона, изготовленных без биодобавок. Применение биодобавок также способствовало росту остаточной долговечности более чем на 10–15% после эксплуатации в заданных условиях.

Заключение

На основании результатов исследований, представленных в статье, сформулированы следующие выводы.

Разработаны составы бетона, модифицированного уреазными биодобавками на основе портландцементов согласно ГОСТ 31108-2020 «Цементы общестроительные»: бездобавочный портландцемент ЦЕМ 0 32,5Н, портландцемент с известняком ЦЕМ II/A-И 32,5Н, портландцемент со шлаком ЦЕМ II/B-Ш 32,5Н.

В качестве биодобавки использовали микробиологический консорциум, содержащий уреазные бактерии *Urobacillus Pasteuri*, *Sporosarcina pasteurii*, *Sporosarcina ureae* и др., выделенные из почвы. Иммунизацию биомассы проводили с применением каппа-каррагина методом «включения в гель».

Оценены бетонные системы по удобоукладываемости, средней плотности, сохраняемости и показателю водоотделения (расслаиваемости) после однократного вибрирования, пределу прочности на сжатие после 28 дней твердения. По результатам исследования были скорректированы рецептуры исследуемых составов с учётом значений водоцементного отношения и содержания биодобавки на уровнях 0,40–0,50 и 2–3 (% масс.).

Рассмотрены влияние режима и условий твердения, определены пористость и морозостойкость модифицированных бетонов. Установлено, что решающим фактором при выборе способа твердения модифицированного бетона является температура, так как уреазные микроорганизмы при высоких температурах могут погибнуть или вернуться в споривидное состояние. Результаты оценки пористости и морозостойкости бетонных образцов также показали улучшение свойств при использовании биодобавок.

Таблица 3. Результаты расчета

№п/п	Характеристика бетонных смесей	Бетонные составы на основе различных типов портландцемента		
		I	II	III
1	Содержание биодобавки, %	3	2	3
2	Водоцементное отношение	0,42	0,40	0,45
3	Прочность при изгибе, МПа	4,65	6,90	6,82
4	Критический коэффициент интенсивности напряжений, МПа·√м	1,13	1,96	1,91
5	Остаточная долговечность, год	32	45	47

Получены кинетические зависимости предела прочности на изгиб от времени экспозиции в климатической камере при различных условиях (температура (Т) 30–70 °С, интегральная плотность теплового потока (D) 550±10 Вт/м², влажность (W) – 80 %).

Рассчитаны величины критического коэффициента интенсивности напряжений при нормальном отрыве модифицированного бетона, а также остаточной долговечности после эксплуатации бетона в условиях силовых и температурно-влажностных испытаний. Применение биодобавок способствует увеличению остаточной долговечности более чем на 10–15% после эксплуатации в заданных условиях.

Список источников/References

1. *Строкова, В.В.* Микробная карбонатная биоминерализация как инструмент природоподобных технологий в строительном материаловедении / В.В. Строкова, Д.Ю. Власов, О.В. Франк-Каменецкая // *Строительные материалы*. 2019. № 7. С. 66. URL: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2019-772-7-66-72> (дата обращения 02.02.2026).

Strokov V.V., Vlasov D.Yu., Frank-Kamenetskaya O.V. Microbial Carbonate Biomineralisation as a Tool of Natural-Like Technologies in Construction Material Science. In: *Construction Materials*, 2019, no. 7, pp. 66. URL: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2019-772-7-66-72>. (Accessed 02/02/2026). (In Engl.)

2. *Mondal, S.* Biomineralization, Bacterial Selection and Properties of Microbial Concrete : A review / S. Mondal, A. (Dey) Ghosh // *Journal of Building Engineering*. 2023. V. 73. 106695. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2023.106695> (дата обращения 02.02.2026).

Mondal S.A., Ghosh A. (Dey). Biomineralization, Bacterial Selection and Properties of Microbial Concrete: A Review. In: *Journal of Building Engineering*, 2023, Vol. 73, pp 106695. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2023.106695> (Accessed 02/02/2026). (In Engl.)

3. Mechanical Behavior of Bio-Based Concrete under Various Loadings and Factors Affecting Its Mechanical Properties at the composite scale: A state-of-the-art review/ R. Bardouh, E. Toussaint, S. Amziane, S. Marceau // *Cleaner Engineering and Technology*. 2024. V. 23. P. 100819. URL: <https://doi.org/10.1016/j.clet.2024.100819> (дата обращения 02.02.2026).

Bardouh R., Toussaint E., Amziane S., Marceau S. Mechanical Behavior of Bio-Based Concrete under Various Loadings and Factors Affecting Its Mechanical Properties at the Composite Scale: A state-of-the-art review. In: *Cleaner Engineering and Technology*, 2024, Vol. 23, P 100819. <https://doi.org/10.1016/j.clet.2024.100819>. (Accessed 02/02/2026). (In Engl.)

4. Development and Performance Evaluation of Self-Leveling Sand Concrete: Enhanced Fluidity, Mechanical Strength, Durability, And Non-Destructive Analysis /A. Bouabdallah, A. Benaissa, M. A. Bouabdallah [и др.] // *Construction and Building Materials*. 2025. V. 468. 140463. URL: <https://clck.ru/3Rfzi2> (дата обращения 02.02.2026).

Bouabdallah A., Benaïssa A., M. Bouabdallah A. [et al.]. Development and Performance Evaluation of Self-Leveling Sand Concrete: Enhanced Fluidity, Mechanical Strength, Durability, and Non-Destructive Analysis. In: *Construction and Building Materials*, 2025, Vol. 468, P. 140463. <https://clck.ru/3Rfzi2> (Accessed 02/02/2026). (In Engl.)

5. Влияние состава и дисперсности заполнителя на его цементацию при карбонатной биоминерализации / В. В. Строкова, У. Н. Духанина, Д. А. Балицкий [и др.] // *Строительные материалы*. 2022. № 7. С. 63–70.

Strokov V.V., Dukhanina U.N., Balitsky D.A. [et al.]. Influence of Aggregate Composition and Dispersion on Its Cementation during Carbonate Biomineralization. In: *Construction Materials*, 2022, no. 7, pp. 63–70. (In Russ., abstr. in Engl.)

6. Влияние альбумина яичного белка на биоминерализацию карбоната кальция в водных растворах / Н.А. Захаров, Е.М. Коваль, Л.В. Гоева [и др.] // *Актуальные вопросы биологической физики и химии*. 2022. Т. 7, № 1. С. 87–91.

Zakharov N.A., Koval E.M., Goeva L.V. The Effect of Egg Albumin on Calcium Carbonate Biomineralization in Water Solution. In: *Russian Journal of Biological Physics and Chemistry*, 2022, Vol. 7, no.1, pp. 87–91. (In Russ., abstr. in Engl.)

7. Structure Evolution of CaCO₃ Precipitates Formed during the Bacillus cereus Induced Biomineralization / L.A. Ivanova, D.A. Golovkina, E.V. Zhurishkina [et al.]. DOI 10.3390/min13060740 // *Minerals*. 2023. V. 13, No. 6. P. 740. URL: <https://clck.ru/3Re5c5> (дата обращения 02.02.2026).

Ivanova L.A., Golovkina D.A., Zhurishkina E.V. [et al.]. Structure Evolution of CaCO₃ Precipitates Formed during the Bacillus Cereus Induced Biomineralization. In: *Minerals*, 2023, Vol. 13, no. 6, p. 740. DOI 10.3390/min13060740. (In Engl.)

8. Препарат на основе бактерий, выделенных из гиперсоленых сред, для улучшения функциональных и защитных характеристик бетона / С.В. Каленов, Н.Б. Градова, С.П. Сивков [и др.]. DOI: 10.21519/0234-2758-2020-36-4-21-28 // *Биотехнология*. 2020. Т. 36, № 4. С. 21–28.

Kalenov S.V., Gradova N.B., Sivkov S.P. [et al.]. A Preparation Based on Bacteria Isolated from Hypersaline Media to Improve the Functional and Protective Characteristics of Concrete. In: *Biotekhnologiya*, 2020, Vol. 36, no. 4, pp. 21–28. DOI: 10.21519/0234-2758-2020-36-4-21-28. (In Russ., abstr. in Engl.)

9. Гончарова, М.А. Особенности применения процесса биоминерализации для улучшения структурно-прочностных свойств бетона / М.А. Гончарова, Е.С. Дергунова // *Строительные материалы*. 2023. № 1-2. С. 25–31.

Goncharova M.A., Dergunova E.S. Features of the Application of the Bio-Mineralization Process to Improve the Structural and Strength Properties of Concrete. In: *Construction Materials*, 2023, no/ 1-2, pp. 25–31. (In Russ., abstr. in Engl.)

10. Biomineralisation to Improve Properties of Polymer Modified Concrete for Chloride Environments / H. Mohammed, F. Giuntini, A. Simm, M. [и др.] // *Construction and Building*

Materials. 2023. V. 379. 131237. URL: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.131237> (дата обращения 02.02.2026).

Mohammed H., Giuntini F., Simm A. Biomineralisation to Improve Properties of Polymer Modified Concrete for Chloride Environments. In: *Construction and Building Materials*, 2023, Vol. 379. p. 131237. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.131237> (Accessed 02/02/2026). (In Engl.)

11. Полиморфизм и морфология карбонатов кальция в технологиях строительных материалов, использующих бактериальную биоминерализацию (обзор) / В.В. Строкова, У.Н. Духанина, Д.А. Балицкий [и др.] // *Строительные материалы*. 2022. № 1-2. С. 82–122.

Strokov V.V., U.N. Dukhanina, D.A. Balitskiy. Polymorphism and Morphology of Calcium Carbonates in Construction Materials Technologies Using Microbial Biomineralization, Review. In: *Construction Materials*, 2022, no. 1-2, pp. 82–122. (In Russ., abstr. in Engl.)

12. Influence of Bacterial Biomineralization Conditions on the Microstructural Characteristics of Cement Mortar / Seo-Eun Oh, Ji-Su Kim, Sung Kyu Maeng [и др.] // *Journal of Building Engineering*. 2024. V. 91. 109455. <https://doi.org/10.1016/j.job.2024.109455> (дата обращения 02.02.2026).

Oh, Seo-Eun, Kim Ji-Su, Kyu Maeng Sung. Influence of Bacterial Biomineralization Conditions on the Microstructural Characteristics of Cement Mortar. In: *Journal of Building Engineering*, 2024, Vol. 91, p. 109455. <https://doi.org/10.1016/j.job.2024.109455>. (Accessed 02/02/2026). (In Engl.)

13. Ерофеев, В.Т. Исследование изменений прочностных характеристик цементных композитов в зависимости от концентрации в них бактерий и возраста образцов / В.Т. Ерофеев, С.Д.С. Аль Дулайми // *Приволжский научный журнал*. 2018. № 3 (47). С. 70–77.

Erofeev V.T., S.D.S. Al' Dulaimi. Study of Changes in Strength Characteristics of Cement Composites, Depending on the Bacteria Concentration in Them and Age of Samples. In: *Privolzhsky Scientific Journal*, 2018, no. 3 (47), pp. 70–77. (In Russ., abstr. in Engl.)

14. Долговечность бетона при комбинированном воздействии окружающей среды и механической нагрузки: анализ экспериментальных исследований / С.Н. Леонович, Е.Е. Шалый, Д.А. Литвиновский, А. В. Степанова. DOI 10.21122/2227-1031-2022-21-4-269-280 // *Наука и техника*. 2022. Т. 21, № 4. С. 269–280.

Leonovich S.N., Shalyi E.E., Litvinovskii D.A., Stepanova A.V. Durability of Concrete under Combined Impact Environment and Mechanical Load: Analysis of Experimental Studies. *Science and Technique*. 2022, Vol. 21, № 4, pp. 269–280. DOI 10.21122/2227-1031-2022-21-4-269-280. (In Russ., abstr. in Engl.)

15. Добшиц, Л.М. Пути повышения долговечности бетонов / Л.М. Добшиц // *Строительные материалы*. 2017. № 10. С. 4–9.

Dobshits L.M. Ways to Improve the Durability of Concretes. In: *Construction Materials*, 2017, no. 10, pp. 4–9. (In Russ., abstr. in Engl.)

16. Ерофеев, В.Т. Повышение коррозионной стойкости цементных композитов активными добавками / В.Т. Ерофеев, А.П. Федорцов, В.А. Федорцов // *Строительство и реконструкция*. 2020. № 2 (88). С. 51–60.
- Erofeev V.T., Fedortsov A.P., Fedortsov V.A. The Increasing Of Corrosive Resistance Of Cement Composites By Active Additives. In: *Building and Reconstruction*, 2020, no. 2 (88), pp. 51–60. (In Russ., abstr. in Engl.)
17. Казанская, Л.Ф. Взаимосвязь факторов, определяющих долговечность бетонов / Л.Ф. Казанская, В.А. Майер, Э.С. Сибгатуллин. DOI 10.20295/1815-588X-2024-04-931-943 // *Известия Петербургского университета путей сообщения*. 2024. Т. 21, № 4. С. 931–943.
- Kazanskaya L.F., Maier V.A., Sibgatullin E.S. The Relationship of Factors Determining the Durability of Concrete. In: *Proceedings of Petersburg Transport University*, 2024, Vol. 21, no. 4, pp. 931–943. DOI 10.20295/1815-588X-2024-04-931-943. (In Russ.)
18. Performance Changes, Mechanisms and Life Prediction of Ultra-High Performance Concrete under Long-Term Sulfate Attack and Wet-Dry Cycles / J. Wu, Y. Wang, S. Zhang [и др.] // *Construction and Building Materials*. 2025. V. 494. 142935. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2025.142935> (дата обращения 02.02.2026).
- Wu J., Wang S., Zhang Y. Performance Changes, Mechanisms and Life Prediction of Ultra-High Performance Concrete under Long-Term Sulfate Attack and Wet-Dry Cycles. In: *Construction and Building Materials*, 2025, Vol. 494, p. 142935. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2025.142935>. (Accessed 02/02/2026). (In Engl.)
19. Биологическая коррозия бетонов / В.Т. Ерофеев, Аль С.Д.С., А.П. Федорцов, В.А. Федорцов // *Строительные материалы*. 2020. № 11. С. 13–23.
- Erofeev V.T., Al' S.D.S., Fedortsov A.P., Bogatov A.D., Fedortsov V.A. Biological Corrosion of Concrete. In: *Construction Materials*, 2020, no. 11, pp. 13–23. (In Russ., abstr. in Engl.)
20. Оценка и прогнозирование физико-химического сопротивления стеклощелочных композитов и методы его повышения / В.Т. Ерофеев, А.П. Федорцов, А.Д. Богатов, В.А. Федорцов // *Известия вузов. Строительство*. 2017. № 6 (702). С. 5–14.
- Erofeev V.T., Fedortsov A.P., Bogatov A.D., Fedortsov V.A. Assessment and Forecasting of Physical and Chemical Resistance of Glass Alkali Composites and Methods of His Increase. In: *News of Higher Educational Institutions. Construction and Architecture*, 2017, no. 6 (702), pp. 5–14. (In Russ., abstr. in Engl.)
21. Jeon, J. Life Cycle Greenhouse Gas Assessment of Permeable Concrete Block Pavements with Industrial By-Products / J. Jeon, Y. Son, T. Kim, S. Jo // *Waste Management*. 2025. V. 204. 114968. URL: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2025.114968> (дата обращения 02.02.2026).
- Jeon J., Son Y., Kim T., Jo S. Life Cycle Greenhouse Gas Assessment of Permeable Concrete Block Pavements with Industrial By-Products. In: *Waste Management*, 2025, Vol. 204, p. 114968. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2025.114968>. (Accessed 02/02/2026). (In Engl.)
22. Леонович, С.Н. Механика долговечности конструкционного бетона: новый подход к явлению деградации. Часть 3. Интегрированное моделирование повреждения солями и карбонизацией / С.Н. Леонович. DOI 10.31659/0585-430X-2025-832-1-2-39-44 // *Строительные материалы*. 2025. № 1-2. С. 39–44.
- Leonovich S.N. Mechanics of Durability of Structural Concrete: New Approach to the Phenomenon of Degradation. Part 3. Integrated Modeling of Salt and carbonation damage. In: *Construction Materials*, 2025, no. 1-2, pp. 39–44. DOI 10.31659/0585-430X-2025-832-1-2-39-44. (In Russ., abstr. in Engl.)
23. Климатические испытания строительных материалов : Монография / Под общ. ред. О.В. Старцева, В.Т. Ерофеева, В.П. Селяева. Москва : АСВ, 2017. 558 с. ISBN 978-5-4323-0240-3.
- Startsev O.V., Erofeev V.T., Selyaev V. P. (eds.). Climatic Tests of Building Materials, Monograph. Moscow, ASV Publ., 2017, 558 p. ISBN 978-5-4323-0240-3. (In Russ.)
24. A Comprehensive Review on the Use of Recycled Concrete Aggregate for Pavement Construction: Properties, Performance, and Sustainability / E.O. Fanijo, J.T. Kolawole, A.J. Babafemi, J. Liu // *Cleaner Materials*. 2023. V.9. P.100199. URL: <https://doi.org/10.1016/j.clema.2023.100199> (дата обращения 02.02.2026).
- Fanijo E.O., Kolawole J.T., Babafemi A.J., Liu J. A Comprehensive Review on the Use of Recycled Concrete Aggregate for Pavement Construction: Properties, Performance, and Sustainability. In: *Cleaner Materials*, 2023, Vol. 9, p. 100199. <https://doi.org/10.1016/j.clema.2023.100199>. Accessed 02/02/2026). (In Engl.)
25. Recent Advances in Accelerated Carbonation for Improving Cement-Based Materials and CO2 Mitigation from a Life Cycle Perspective / Y. Pu, L. Li, X. Shi, Q. Wang [и др.] // *Construction and Building Materials*. 2023. V. 388. P. 131695. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.131695>.
- Pu Y., Li L., Shi X., Wang Q. [et al.]. A. Recent Advances in Accelerated Carbonation for Improving Cement-Based Materials and CO2 Mitigation from a Life Cycle Perspective. In: *Construction and Building Materials*, 2023, Vol. 388, p. 131695. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.131695>. Accessed 02/02/2026). (In Engl.)
26. Садовская, Е.А. Расчёт коэффициента интенсивности напряжения при нормальном отрыве по прочности на растяжение при изгибе / Е.А. Садовская, С.Н. Леонович. DOI 10.52928/2070-1683-2022-31-8-27-31 // *Вестник Полоцкого государственного университета. Серия Ф. Строительство. Прикладные науки*. 2022. № 8. С. 27–31.
- Sadovskaya E.A., Leonovich S.N. Relationship of the Stress-Intensity Coefficient at Normal Separation and the Strength in Tension. In: *Vestnik of Polotsk State University. Part F. Constructions. Applied Sciences*, 2022, no. 8, pp. 27–31. DOI 10.52928/2070-1683-2022-31-8-27-31. (In Russ.)