

УДК 691.535, 620.22

Т. К. Акчурина^а, М. А. Гончарова^б, Е. С. Дергунова^б

^а Волгоградский государственный технический университет

^б Липецкий государственный технический университет

СРАВНИТЕЛЬНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СОСТАВОВ БИОДОБАВОК ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ЦЕМЕНТНЫХ КОМПОЗИТОВ С ПОВЫШЕННОЙ ПРОЧНОСТЬЮ

Приведены сравнительные характеристики биодобавок, предназначенных для получения цементных композитов повышенной прочности. Получение микробной массы из штаммов бактерий (1) — *Bacillus subtilis*, (2) — *Enterobacter cloacae*, (3) — микробиологический консорциум из почвенных вытяжек проводили в ферментере. Рассмотрены способы сохранения активности полученных микроорганизмов, такие как физическая сорбция и микрокапсуляция, определены титр и активность иммобилизованных бактерий, установлено, что наилучшим методом сохранения активности является микрокапсулирование бактерий. Срок хранения биодобавок, полученных микрокапсулированием, достигает 6...7 месяцев. Исследованы цементные композитные составы с учетом вида и содержания биодобавки. Водоцементное отношение варьировали от 0,40 до 0,70 с интервалом 0,10, содержание биодобавки от 1 до 5 % по отношению к цементу с интервалом 1 %. Оценены полученные цементные системы по критериям прочности на сжатие.

К л ю ч е в ы е с л о в а: портландцемент, цементные композиты, микрокапсуляция, биодобавки, уреазная активность, прочность, биоминерализация.

Введение

Бетон обладает прочностью, чтобы выдерживать нагрузки, возникающие в процессе эксплуатации конструкций из этого материала. Прочность бетона определяет, насколько хорошо он сможет сопротивляться разрушению под воздействием различных факторов, таких как вес здания, давление грунта, вибрация и пр. [1—2]. Прочность бетона позволяет строить надежные и долговечные сооружения, выдерживающие воздействие окружающей среды, включая изменения температуры, влажность, воздействие химических веществ и механические нагрузки. Это особенно важно для строительства зданий, мостов, дорог и других инфраструктурных объектов, где требуется высокая прочность материала. Без достаточной прочности бетон не смог бы обеспечить необходимую стабильность и безопасность конструкций, что чревато авариями и разрушениями. Поэтому прочность является одним из ключевых свойств бетона, которое определяет его применение в строительстве.

Существуют специальные добавки, которые могут дополнительно усилить бетон, такие как [1—8]:

- пластификаторы улучшают текучесть смеси, позволяя ей заполнить все пустоты и воздушные карманы, что способствует повышению прочности бетона;
- ускорители твердения сокращают время, необходимое для достижения бетоном проектной прочности, что также положительно влияет на его прочность;
- добавки, улучшающие адгезию, повышают сцепление бетона с арматурой и другими материалами и общую прочность конструкции;

- микроармирующие добавки содержат микроволокна, которые равномерно распределяются в бетонной смеси и создают дополнительный армирующий эффект, повышая прочность бетона;

- добавки, регулирующие усадку, предотвращают неравномерную усадку бетона, приводящую к образованию трещин и снижению прочности.

В настоящее время природоподобные процессы демонстрирует многообещающие результаты в строительной и геотехнической областях, в т. ч. в разработке укрепляющих и ремонтных составов, устранении трещин, упрочнении вяжущих материалов и других технологиях [9—11].

Так процесс биоминерализации включает образование карбонат-ионов с помощью основного метаболизма определенных микроорганизмов, обладающих уреазной активностью. Эти карбонат-ионы преобразуются в карбонат кальция в присутствии активного источника ионов кальция [12]. Биодобавки способны формировать осадок внутри пор бетона, этот подход считается экологически чистым и недорогим и может быть использован в различных инженерных решениях, таких как производство строительных материалов, дорожных покрытий и т. д.

Биоминерализацию можно назвать одной из наиболее устойчивых современных строительных технологий [9—12], т. к. микроорганизмы, встроенные в матрицу строительных материалов, обеспечивают их длительную защиту благодаря своей жизнеспособности [13—18].

Цель данной работы — сравнение составов и природы биодобавок и их влияние на прочностные свойства бетона. Для поставленной цели необходимо решить следующие *задачи*:

- рассмотреть способы получения микробной массы и определения ее активности;
- исследовать условия сохранения уреазной активности биодобавок в течение длительного времени;
- изучить влияние различных видов иммобилизующих агентов на сохранность биомассы;
- оценить влияние биодобавок на физико-механические свойства бетона.

Методы и материалы

В качестве биодобавок использовали изолированные штаммы бактерий: 1 — *Bacillus subtilis*, 2 — *Enterobacter cloacae* (China), а также консорциум уреазных бактерий (3), выделенные из почвы Липецкой области (водные вытяжки). Биомассу бактерий выращивали при температуре 42 ± 2 °C в аэрированном ферментере со скоростью мешалки 450...470 об./мин с применением питательной среды Кристенсена. Через 48 ч бактериальная культура достигла оптической плотности (OD 546 Нм) около 4,8...5,6. Уреазную активность биомассы определяли электрохимическим методом. КОЕ определяли с применением тест-слайдеров.

В работе использовали следующие материалы: портландцемент марки ЦЕМ I 42,5Н (ЦЕМРОС, Липецк); полифракционный песок в качестве мелкого заполнителя. Водоцементное отношение систем варьировали от 0,4 до 0,6. Прочностные характеристики бетона определяли согласно ГОСТ 10180—2012¹.

¹ ГОСТ 10180—2012. Бетоны. Методы определения прочности по контрольным образцам. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200100908?ysclid=mg5x9rqpmw374020864>.

Результаты и обсуждение

Для получения микробной массы на первом этапе готовили раствор субстрата с заданными свойствами (рН, температура, концентрация) и партию микробного препарата. Далее готовили питательную среду Кристенсена. Затем культуру микроорганизма получали путем последовательного пересева из пробирки в колбу, а затем в аппараты увеличивающегося объема до количества, необходимого для промышленного производства. Рост микроорганизмов осуществлялся в ферментере Minifors Spesco с рабочим объемом 3 л, оснащенный датчиком измерения концентрации растворенного кислорода, сигнализатором уровня пены и приспособлением для химического пеногашения, а также устройством подачи чистого кислорода и углекислого газа, резервуарами для хранения компонентов питательной среды и насосами для их непрерывной подачи в ферментер. Получены три вида микробной массы, прошедшей уреазные тесты.

Многие бактерии способствуют в процессе своей жизнедеятельности образованию различных минералов, в частности карбоната кальция, при наличии источника кальция и мочевины в процессе биоминерализации. Проведено много исследований с использованием различных грамположительных бактерий, в т. ч. в песчаных, цементных системах [9—14].

Для изучения закономерностей процесса роста новой фазы в цементной матрице использовали растровый электронный микроскоп TESCAN MIRA 3 SBH с приставкой для микрорентгеноспектрального анализа Oxford Instruments. Установлено с применением РФА, что в порах образцов находится карбонат кальция в форме кальцита (рис. 1).

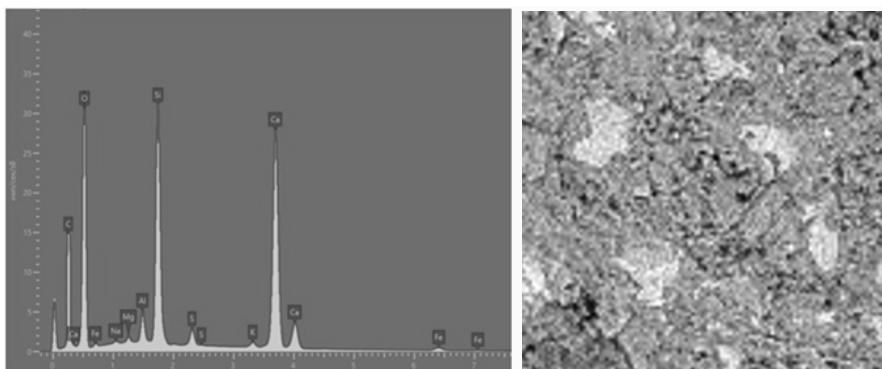


Рис. 1. Микрофотография разлома поверхности цементного композита с вкраплениями кальцита

Перенос процесса биоминерализации в цементные системы представляет особенный интерес. Биомасса при попадании на цементные или бетонные поверхности теряет свою активность и погибает или инактивируется. То есть, вопрос иммобилизации бактерий является актуальным. Иммобилизация бактерий — это процесс фиксации микроорганизмов на твердых поверхностях или матрицах, позволяющий контролировать их рост и активность. Это важная технология, используемая для различных целей, включая производство ферментов, очистку воды, создание биосенсоров и др. В нашей работе использовали два вида иммобилизации биомассы бактерий — физическая

адсорбция и микрокапсулирование. Физическую сорбцию осуществляли с применением микрокремнезема а микрокапсулирование с применением геля альгината натрия. Были определены значения титра (КОЕ/мл) и уреазная активность биомассы в мг $\text{NH}_3/\text{г}/\text{сут}$ (табл. 1).

Таблица 1

Влияние вида штамма микроорганизмов и метода иммобилизации
на показатель роста и уреазную активность

Образец микроорганизмов	Метод сохранения активности микроорганизмов		
	Микрокапсулирование	Физическая сорбция	Без иммобилизации
	Титр, КОЕ/мл / Уреазная активность, мг $\text{NH}_3/\text{г}/\text{сут}$		
1	$(5,07 \pm 0,05) \cdot 10^9$	$(2,70 \pm 0,06) \cdot 10^6$	$(3,07 \pm 0,06) \cdot 10^3$
	56	35	32
2	$(7,95 \pm 0,06) \cdot 10^8$	$(6,58 \pm 0,06) \cdot 10^5$	$(4,50 \pm 0,06) \cdot 10^3$
	53	37	28
3	$(9,95 \pm 0,06) \cdot 10^8$	$(8,54 \pm 0,06) \cdot 10^5$	$(5,30 \pm 0,06) \cdot 10^3$
	56	40	34

Установлено, что при физической сорбции бактерии прикрепляются к поверхности матрицы благодаря силам Ван-дер-Ваальса, электростатическим взаимодействиям и гидрофобным связям [15]. Этот метод прост и экономичен, однако связь между бактериями и поверхностью слабая, что ограничивает стабильность системы. Это подтверждается низкими значениями уреазной активности, однако микрокапсуляция гелем позволяет сохранять высокую активность изучаемых бактерий.

Также изучены сроки хранения иммобилизованных биодобавок (рис. 2).

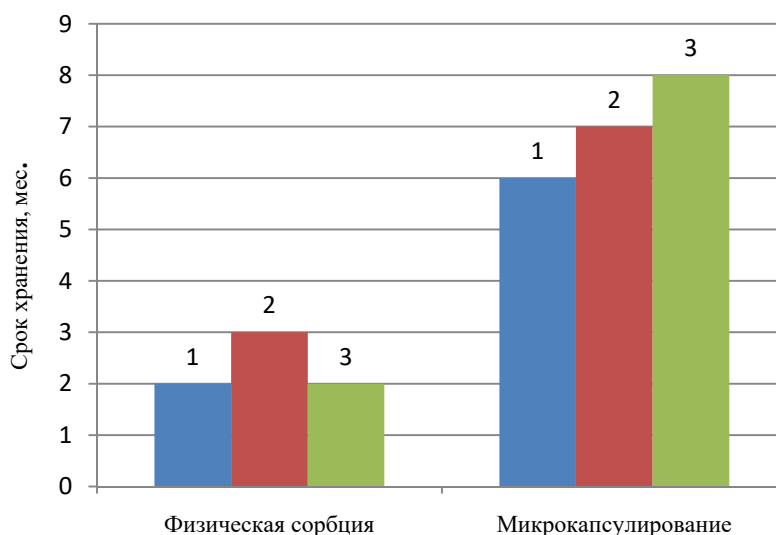


Рис. 2. Сроки хранения биодобавок на основе уреазных бактерий:
1 — *Bacillus subtilis*; 2 — *Enterobacter cloacae*; 3 — микробиологический консорциум,
выделенный из почвенной вытяжки

Установлено, что бактерии, иммобилизованные с применением альгината натрия, хранятся дольше в 2...3 раза, чем иммобилизованные на микрокремнеземе методом физической сорбции. Сроки хранения достигают 6...8 месяцев, активность биодобавок снижается менее чем на 5 %.

Для исследования сформированы цементные составы с учетом вида и содержания биодобавки вида «Ц + П + Д» (табл. 2). Водоцементное отношение варьировали от 0,40 до 0,70 с интервалом 0,10, содержание биодобавки от 1 до 5 % по отношению к цементу с интервалом 1 %.

Таблица 2

Матрица планирования эксперимента для систем «Ц+П+ДФ»
 (добавка полученная физической сорбцией с микрокремнеземом),
 «Ц+П+ДМ» (добавка получена с применением микрокапсулирования)

В : Ц	Тип системы Ц + П + ДФ					Тип системы Ц + П + ДМ				
	Содержание биодобавки, %									
	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
0,40	A1Ф	A2Ф	A3Ф	A4Ф	A5Ф	A1М	A2М	A3М	A4М	A5М
0,50	B1Ф	B2Ф	B3Ф	B4Ф	B5Ф	B1М	B2М	B3М	B4М	B5М
0,60	B1Ф	B2Ф	B3Ф	B4Ф	B5Ф	B1М	B2М	B3М	B4М	B5М
0,70	Г1Ф	Г1Ф	Г3Ф	Г4Ф	Г5Ф	Г1М	Г1М	Г3М	Г4М	Г5М

Установлены зависимости прочности на сжатие от вида биодобавки, их содержания и водоцементного отношения (рис. 3).

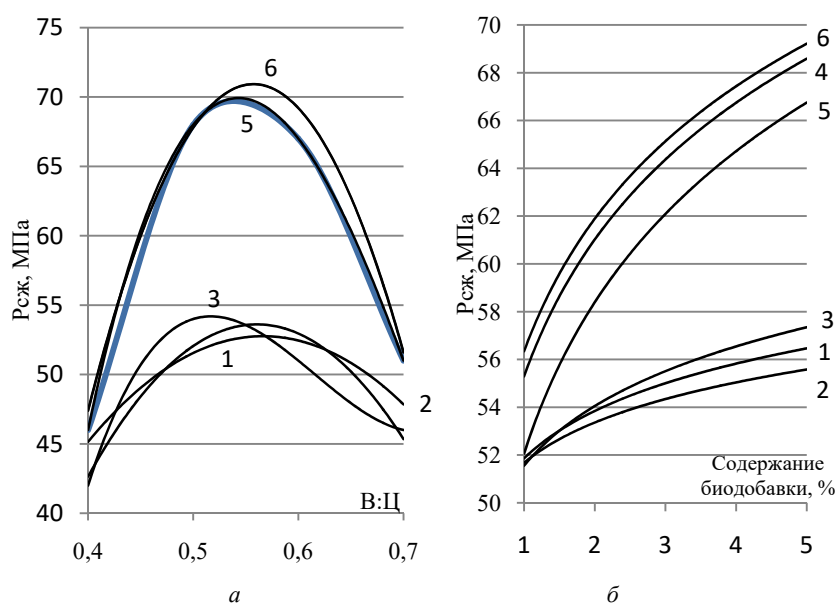


Рис. 3. Зависимости прочности при сжатии от водоцементного отношения (а) и от содержания биодобавки (б) в образцах цементных композитов:
 1 — *Bacillus subtilis*; 2 — *Enterobacter cloacae*; 3 — микробиологический консорциум, иммобилизованный с применением физической сорбции; 4 — *Bacillus subtilis*; 5 — *Enterobacter cloacae* и 6 — микробиологический консорциум, иммобилизованный методом микрокапсулирования

Установлено, что использование не только различных типов бактерий, но и различных методов сохранения их активности ведет к различной способности осаждать кристаллы карбоната кальция. Так, в ряду бетонных образцов, изготовленных с одним и тем же видом бактерий, но с различным способом их иммобилизации, прочность на сжатие достигает высоких значений при использовании альгината натрия, позволяющего сохранить высокую уреазау активность биомассы и укрепить цементные образцы. Влияние водоцементного отношения показывает, что максимальная прочность образцов проявляется при его значении в диапазоне 0,50...0,55. С увеличением значения В : Ц происходит снижение прочности на сжатие (см. рис. 3), данная тенденция сохраняется при всех видах биодобавок для всех образцов. Оптимальное значение концентрации биодобавки для всех образцов 5 %, дальнейшее насыщение цементных композитов биодобавками ведет к снижению прочностных характеристик. Применение микрокремнезема не способствует выживаемости бактерий, а по результатам исследований его малое количество не способно увеличивать прочность более чем на 5 %.

Заключение

Таким образом, в работе проведено получение микробной массы из штаммов бактерий (1) — *Bacillus subtilis*, (2) — *Enterobacter cloacae*, (3) — микробиологический консорциум из почвенных вытяжек. Рассмотрены способы сохранения активности полученных микроорганизмов — физическая сорбция и микрокапсуляция, определены титр и активность иммобилизованных бактерий. Установлено, что наилучшим методом сохранения активности является микрокапсулирование бактерий с альгинатом натрия, максимальную активность проявляют все микроорганизмы на уровне 53...56 мг NH₃/г/сут с титром 10⁸...10⁹ КОЕ/мл со сроком хранения 6...7 месяцев. Сформированы цементные составы с учетом вида и содержания биодобавки. Водоцементное отношение варьировали от 0,40 до 0,70 с интервалом 0,10, содержание биодобавки от 1 до 5 % по отношению к цементу с интервалом 1 %. Оценены полученные цементные системы по критериям прочности на сжатие, установлено, что высокие результаты (до 68...71 МПа) показали системы с биодобавками на основе микробного консорциума бактерий с альгинатом натрия.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Additives in concrete to enhance neutron attenuation characteristics / P. Gokul, J. Ashok Kumar, R. Preetha, S. Chattopadhyaya, K. M. Mini // A Critical Review, Results in Engineering. 2023. Vol. 19. Art. 101281. DOI: 10.1016/j.rineng.2023.101281.
2. Herath Ch., Gunasekara Ch., Law D. W., Setunge S. Performance of high volume fly ash concrete incorporating additives: A systematic literature review // Construction and Building Materials. 2020. Vol. 258. Art. 120606. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2020.120606.
3. Umasabor R. I., Daniel S. C. The effect of using polyethylene terephthalate as an additive on the flexural and compressive strength of concrete // Heliyon. 2020. Vol. 6. Iss. 8. Art. e04700. DOI: 10.1016/j.heliyon.2020.e04700.
4. Reches Y. Nanoparticles as concrete additives: Review and perspectives // Construction and Building Materials. 2018. Vol. 175. Pp. 483—495. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2018.04.214.
5. Mechanically strength with water repellency: Recently advances in superhydrophobic concrete / Z. Dai, H. Guo, Y. Wang, M. Wang, Y. Zhang, K. Qian // Journal of Cleaner Production. 2025. Vol. 491. Art. 144839. DOI: 10.1016/j.jclepro.2025.144839.
6. Preparation and acceleration mechanism of a ternary hardening accelerator for high-performance concrete with full aeolian sand / G. Qu, M. Zheng, W. Zhang, H. Jing, Zh. Ou // Con-

struction and Building Materials. 2023. Vol. 369. Art. 130629. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2023.130629.

7. Das S., Ray S., Sarkar S. Novel agricultural waste based hardening accelerator for early strength development of fly ash-based concrete // Materials Today: Proceedings. 2023. DOI: 10.1016/j.matpr.2023.04.099.

8. Experimental study on the development of compressive strength of early concrete age using calcium-based hardening accelerator and high early strength cement / T.-B. Min, I.-S. Cho, W.-J. Park, H.-K. Choi, H.-S. Lee // Construction and Building Materials. 2014. Vol. 64. Pp. 208—214. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2014.04.053.

9. Mondal S., Ghosh A. (D.) Biomineralization, bacterial selection and properties of microbial concrete: A review // Journal of Building Engineering. 2023. Vol. 73. Art. 106695. DOI: 10.1016/j.jobbe.2023.106695.

10. Application of microbial carbonate biomineralization in biotechnologies of building materials creation and restoration: analysis of the state and prospects of development / V. V. Strokova, D. Yu. Vlasov, O. V. Frank-Kamenetskaya, U. N. Dukhanina, D. A. Balitsky // Construction Materials. 2019. No. 9. Pp. 83—103. DOI: 10.31659/0585-430X-2019-774-9-83-103.

11. Гончарова М. А., Акчурун Т. К., Дергунова Е. С. Особенности использования уреазных биодобавок в цементных системах // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. 2022. Вып. 3(88). Стр. 64—69.

12. A review of biomineralization in healing concrete: Mechanism, biodiversity, and application / J. Zhang, J. Deng, Y. He, J. Wu, M. F. Simões, B. Liu, Y. Li, Sh. Zhang, A. Antunes // Science of The Total Environment. 2024. Vol. 917. Art. 170445. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2024.170445.

13. Гончарова М. А., Дергунова Е. С. Особенности применения процесса биоминерализации для улучшения структурно-прочностных свойств бетона // Строительные материалы. 2023. № 1–2. С. 25—31. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2023-810-1-2-25-31>.

14. Полиморфизм и морфология карбонатов кальция в технологиях строительных материалов, использующих бактериальную биоминерализацию (обзор) / В. В. Строкова, У. Н. Духанина, Д. А. Балицкий, О. И. Дроздов, В. В. Нелюбова, О. В. Франк-Каменецкая, Д. Ю. Власов // Строительные материалы. 2022. № 1-2. С. 82—122. DOI: 10.31659/0585-430X-2022-799-1-2-82-122.

15. Духанина У. Н., Строкова В. В., Балицкий Д. А. Влияние микробной карбонатной минерализации на гидрофобность поверхности цементного камня // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В. Г. Шухова. 2020. № 7. С. 19—25. DOI: 10.34031/2071-7318-2020-5-7-19-25.

16. Rishabh Junwale, Aishwarya Nikode, Snigdha Bhutange, Latkar M. V. Crack healing in cement mortar using enzyme induced calcium carbonate precipitation // Construction and Building Materials. 2023. Vol. 394. Art. 132223. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2023.132223.

17. Gollapudi U., Knutson C., Bang S., Islam M. A new method for controlling leaching through permeable channels // Chemosphere. 1995. No. 30. Pp. 695—705. DOI: 10.1016/0045-6535(94)00435-w.

18. Fouladi S., Arulrajah A., Chu J., Horpibulsuk S. Application of Microbially Induced Calcite Precipitation (MICP) technology in construction materials: A comprehensive review of waste stream contributions // Construction and Building Materials. 2023. Vol. 388. Art. 131546. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2023.131546.

© Акчурун Т. К., Гончарова М. А., Дергунова Е. С., 2025

Поступила в редакцию
15.05.2025

Ссылка для цитирования:

Акчурун Т. К., Гончарова М. А., Дергунова Е. С. Сравнительные характеристики составов биодобавок для получения цементных композитов с повышенной прочностью // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. 2025. Вып. 3(100). С. 5—12. DOI: 10.35211/18154360_2025_3_5.

Об авторах:

Акчурин Талгат Кадимович — советник РААСН, канд. техн. наук, проф., проф. каф. строительных материалов и специальных технологий, Волгоградский государственный технический университет (ВолГГТУ). Российская Федерация, 400074, г. Волгоград, ул. Академическая, 1; info@vgasu.ru

Гончарова Маргарита Александровна — д-р техн. наук, проф., Липецкий государственный технический университет. Российская Федерация, 398055, г. Липецк, ул. Московская, 30; magoncharova777@yandex.ru

Дергунова Елена Сергеевна — канд. хим. наук, доц., Липецкий государственный технический университет. Российская Федерация, 398055, г. Липецк, ул. Московская, 30; dergunova14@yandex.ru

Talgat K. Akchurin^a, Margarita A. Goncharova^b, Elena S. Dergunova^b

^a *Volgograd State Technical University*

^b *Lipetsk State Technical University*

COMPARATIVE CHARACTERISTICS OF BIOADDITIVE FORMULATIONS FOR THE PRODUCTION OF CEMENT COMPOSITES WITH INCREASED STRENGTH

The article presents comparative characteristics of bioadditives intended for the production of high-strength cement composites. Microbial mass was obtained from bacterial strains (1) *Bacillus subtilis*, (2) *Enterobacter cloacae*, and (3) a microbiological consortium from soil extracts in a fermenter. Methods of preserving the activity of the obtained microorganisms, such as physical sorption and microcapsulation, are considered, the titer and activity of immobilized bacteria are determined, and it is established that the best method of preserving activity is bacterial microcapsulation. The shelf life of dietary supplements obtained by microcapsulation reaches 6...7 months. Cement composite compositions have been studied, taking into account the type and content of the bioadditive. The water-cement ratio varied from 0.40 to 0.70 with an interval of 0.10, the content of bioadditive from 1 to 5 % relative to cement with an interval of 1 %. The obtained cement systems were evaluated according to the criteria of compressive strength.

Key words: portland cement, cement composites, microencapsulation, bioadditives, urease activity, strength, biomineralization.

For citation:

Akchurin T. K., Goncharova M. A., Dergunova E. S. [Comparative characteristics of bioadditive formulations for the production of cement composites with increased strength]. *Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo arhitekturno-stroitel'nogo universiteta. Seriya: Stroitel'stvo i arhitektura* [Bulletin of Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering. Series: Civil Engineering and Architecture], 2025, iss. 3, pp. 5—12. DOI: 10.35211/18154360_2025_3_5.

About authors:

Talgat K. Akchurin — Candidate of Engineering Sciences, Professor, Volgograd State Technical University (VSTU). 1, Akademicheskaya st., Volgograd, 400074, Russian Federation; info@vgasu.ru; Scopus ID: 57190967539

Margarita A. Goncharova — Doctor of Engineering Sciences, Professor, Lipetsk State Technical University. 30, Moskovskaya st., Lipetsk, 398055, Russian Federation; magoncharova777@yandex.ru

Elena S. Dergunova — Candidate of Chemistry, Docent, Lipetsk State Technical University. 30, Moskovskaya st., Lipetsk, 398055, Russian Federation; dergunova14@yandex.ru