DOI: 10.34031/2071-7318-2020-5-7-19-25

Духанина У.Н., *Строкова В.В., Балицкий Д.А.
Белгородский государственный технический университет им. В.Г. Шухова
**E-mail: vvstrokova@gmail.com*

ВЛИЯНИЕ МИКРОБНОЙ КАРБОНАТНОЙ МИНЕРАЛИЗАЦИИ НА ГИДРОФОБНОСТЬ ПОВЕРХНОСТИ ЦЕМЕНТНОГО КАМНЯ

Аннотация. *Теоретически обосновано и экспериментально подтверждено влияние микробной карбонатной минерализации на повышение гидрофобности поверхности цементного камня. На основании проведенных экспериментальных исследований и анализа литературных данных сформулированы основные этапы микробно-индуцированного осаждения карбоната кальция на поверхности цементного камня. Описаны изменения морфологии поверхности цементного камня за счет сформированных в процессе биоминерализации в постгенетический период кристаллических новообразований. Показано, что биокольматация межпорового пространства цементного камня кристаллическими новообразованиями приводит к повышению гидрофобности, о чем свидетельствует увеличение значения контактного угла смачивания. Установлена взаимосвязь между изменением концентрации кальция в новообразованиях и среднего значения контактного угла смачивания на поверхности цементного камня от вида бактериальной культуры. По данным химического и морфологического анализа биоиндуцированных новообразований на поверхности образцов, а также результатам оценки изменения контактного угла смачивания по сравнению с исходным показателем для цементного камня, бактериальные культуры проранжированы в порядке повышения эффективности использования для осаждения карбоната кальция при их участии, а также повышения гидрофобности цементных материалов в следующей последовательности: Sporosarcina pasteurii → Bacillus megaterium → Lysinibacillus sphaericus → Bacillus pumilus.*

Ключевые слова: *карбонатная биоминерализация, бактериальная культура, цементная матрица, контактный угол смачивания, гидрофобность, кольматация.*

Введение. Одной из активно развивающихся технологий сохранения и восстановления строительных материалов является микробно-индуцированное осаждение карбоната кальция [1–4]. Вовлечение бактериальных агентов в карбонатогенез представляет особый интерес, поскольку может быть использован как метод селективной биологической кольматации и/или инкрустации (обрастание) как порового пространства цементной матрицы, так и поверхности цементного композита. Биокольматация порового пространства происходит в несколько этапов, начиная от прикрепления отдельных клеток бактериального штамма к твердому субстрату, до полного обрастания поры кристаллами карбоната кальция [2, 5]. Результатом такого обрастания и закупорки пор цементного камня является как снижение пористости и, как следствие водопроницаемости [6, 7, 8], так и изменение характера микрорельефа поверхности, что влечет за собой изменение степени гидрофобности поверхности, оцениваемую контактным углом смачивания.

Исследованиями, выполненными рядом научных групп, была показана эффективность залечивания микротрещин цементных материалов, проявляющаяся в виде формирования крупнокристаллических по сравнению с продуктами гидратации новообразований карбонатов кальция в постгенетический период [9], проанализировано влияние биоминерализации в трещинах на изменение прочности материалов [10, 11], изучены технологические особенности работы с бактериальным инокулятом при его использовании [12]. Однако вопрос влияния карбонатной биоминерализации на изменение микроструктуры и гидрофобности поверхности цементных материалов в зависимости от вида бактерий и применяемых видов и концентраций прекурсоров остается открытым.

Ранее нами был проведен обобщающий анализ видов микроорганизмов, применяемых для карбонатной биоминерализации при восстановлении строительных материалов [12], который определил выбор применяемых бактерий *Lysinibacillus sphaericus*, *Bacillus megaterium*, *Bacillus pumilus*, *Sporosarcina pasteurii* в исследованиях по следующим критериям: отсутствие патогенности, высокая уреазная активность, карбонатогенная продуцирующая способность, высокая выживаемость в щелочных условиях, способность образовывать эндоспоры, устойчивые к высоким температурам, химическим веществам и ультрафиолетовому излучению. Проанализирована динамика роста вышеуказанных бактериальных штаммов при одномоментном добавлении питательных веществ и доступности кислорода [13], произведена оценка метаболической уреазной

активности по изменению уровня pH в жидкой модельной среде в зависимости от вида и концентрации применяемых прекурсоров, установлено влияние компонентов среды и вида бактериального штамма на морфологию кристаллических новообразований.

В последующем для исключения влияния продуктов гидратации на процессы карбонатной бактериальной минерализации исследование проводилось на модельной системе «бактерии – кварцевый песок». Результатами эксперимента подтверждается интенсивность литификации кварцевого песка в зависимости от его дисперсности.

Методология. Для комплексного изучения процессов бактериального карбонатогенезиса в строительном материале, понимания механизмов биокарбонизации, а также выявления перспективных бактериальных культур и прекурсоров, взаимодействующих с цементной матрицей, следующим этапом работы стало инкубирование исследуемых бактериальных культур на поверхности цементного камня. Для этого готовили образцы-кубы с размером ребра 10 мм с В/Ц 0,4 с использованием портландцемента марки ЦЕМ I 42,5 Н и водопроводной воды. Для чистоты эксперимента и исключения влияния других микроорганизмов на ход исследования используемые материалы проходили предварительную деконтаминационную обработку до введения бактериальных культур: водопроводная вода с растворенным $CaCl_2$ – методом автоклавирования; CH_4N_2O – воздушным методом в сухожаровом шкафу; образцы-кубы – методом УФ-стерилизации. Для ускоренного достижения заданных нормативных значений прочности цементных образцов применяли тепловлажностную обработку по режиму 1,5+6+1,5 ч при 60 °С.

В качестве исследуемых бактериальных культур применяли инокуляты бактериальных штаммов Всероссийской коллекции микроорганизмов Института биохимии и физиологии микроорганизмов им Г.К. Скрябина Российской академии наук рода: *Lysinibacillus sphaericus* (VKM B-509), *Bacillus megaterium* (VKM B-40), *Bacillus pumilus* (VKM B-23), *Sporosarcina pasteurii* (VKM B-513).

Для инициации бактериального карбонатогенезиса на поверхности бетонной матрицы в качестве прекурсоров использовали $CaCl_2$ (20 г/л) и CH_4N_2O (20 г/л), растворенные в дистиллированной воде, генерирующие щелочные условия для метаболической активности бактерий.

Процессы биоминерализации стимулировали путем полного погружения образцов в модельную среду с бактериальным инокулятом и прекурсорами в чаши Петри, в которых они находились в течение 28 суток с обновлением бактерий и растворов прекурсоров через каждые 3 дня, с целью поддержания заданного начального уровня концентрации.

Для оценки возможного влияния прекурсоров без бактериального воздействия на изменение контактного угла смачивания, образцы цементного камня выдерживали при тех же параметрах, но в растворах хлорида кальция и мочевины без бактериального инокулята (контроль 2). Для сравнительного анализа использовали образцы цементного камня, не подверженные воздействию бактерий и прекурсоров (контроль 1).

Микроструктурные изменения цементного камня и морфологию новообразованных кристаллов изучали с помощью сканирующего электронного микроскопа TESCAN MIRA 3 LMU, включающего энергодисперсионный спектрометр (ЭДС) X-MAX 50 Oxford Instruments NanoAnalysis для электронно-зондового микроанализа, где источник электронов – Катод Шоттки высокой яркости.

Измерение контактного угла смачивания на поверхности образцов проводили при помощи прибора Kruss DSA 30. В качестве рабочей жидкости для измерений использовали дистиллированную воду. Для получения среднего значения контактного угла смачивания производили измерения на шести гранях образцов-кубов.

Основная часть. Анализ полученных данных в совокупности с ранее проведенными исследованиями [8] и литературными данными [12] показал, что микробно-индуцированное осаждение карбоната кальция на поверхности цементной матрицы происходит в несколько этапов:

– после помещения образцов цементного камня в чаши Петри за счет капиллярного подсоса происходит их объемная пропитка раствором прекурсоров с инокулятом. Глубина пропитки определяется плотностью, пористостью и особенностями микроструктуры порового пространства;

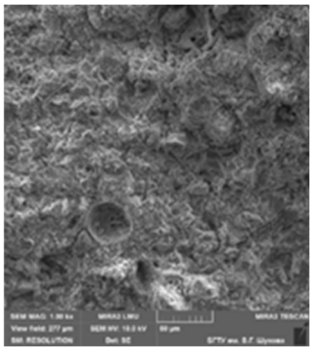
– в результате процесса адсорбции на поверхности цементной матрицы происходит колонизация микробиоты, а в поровом пространстве фиксация бактериальных клеток;

– растворенные прекурсоры инициируют биохимический процесс метаболической деятельности бактериальных штаммов, стимулируя уреазную активность бактерий. В результате разложения мочевины происходит локальное повышение pH, прекурсоры увеличивают выживаемость клеток в щелочных условиях;

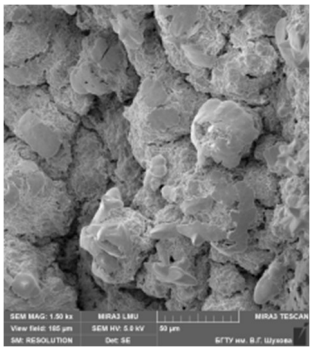
– происходит гетерогенная нуклеация зародышей кристаллов в межпоровом пространстве и рост новообразований.

Согласно вышеприведенным этапам в результате воздействия на цементную матрицу бактериальных агентов, инициирующих процессы карбонатной минерализации, происходит, во-первых, биокольматация порового пространства, степень которой зависит от уровня пропитки цементной матрицы, и во-вторых, инкрустация поверхности образца новообразованиями различной морфологии и минерального состава в зависимости от вида бактериального агента.

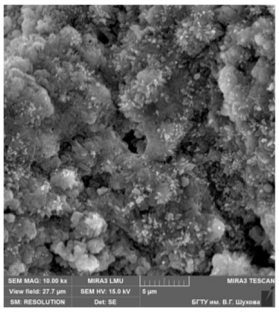
Изучение микроструктурных особенностей поверхности образцов показало, что в отличие от исходного (контроль 1) цементного камня (рис. 1, а), образец, выдержанный в растворе прекурсоров (контроль 2), характеризуется глобулярной структурой новообразований, покрывающих цементный камень (рис. 1, б). Вероятно, происходит осаждение растворенных прекурсоров без карбонизации. Задействование в эксперименте бактерий привело к формированию кристаллических новообразований, имеющих преимущественно ромбоэдрическую форму с четкими гранями, чаще субмикронного размера (рис. 1, в–е). Хорошо прослеживаются структуры роста и двойники, что свидетельствует о постгенетическом по отношению к цементному камню формировании данных кристаллов. Среди четырех видов использованных бактерий, наименее продуктивными, с точки зрения роста идентифицируемых с помощью микрофотоснимков кристаллов, показали себя бактерии рода *B. megaterium* (рис. 1, г).



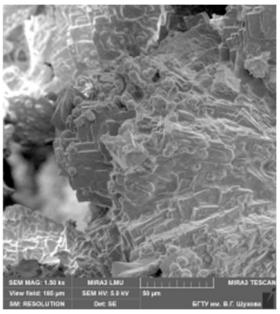
а) контроль 1



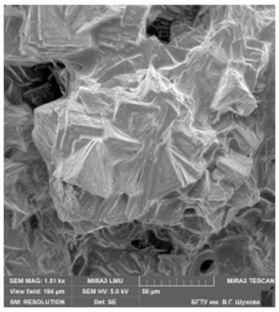
б) контроль 2



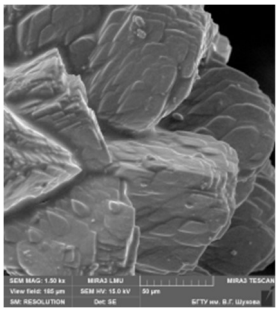
г) *B. megaterium*



в) *S. pasteurii*



д) *L. sphaericus*



е) *B. pumilus*

Рис. 1. Морфология поверхности цементного камня (а), новообразований после выдержки в растворе прекурсоров (б), новообразований индуцированных бактериями (в–е)

По данным энергодисперсионного микроанализа, проведенного на растровом электронном микроскопе, новообразований, сформированных на поверхности образцов цементного камня в присутствии бактериальных штаммов, максимальным содержанием кальция характеризуются новообразования, полученные в процессе индукции при воздействии бактериального штамма *B. pumilus* – 40 % (табл. 1). При введении инокулятов бактерий *L. sphaericus* и *B. megaterium* в образцах получены практически одинаковые результаты по содержанию кальция – 36 %. Менее эффективной бактериальной культурой в процессах биоиндуцирования карбоната кальция показала себя *S. Pasteurii*, о чем свидетельствуют полученные данные о суммарном содержании кальция, приближенные к значениям контрольного образца 2, выдержанного в растворе прекурсоров без инокулята – 33 %.

Обрастание цементного камня кристаллическими новообразованиями, произошедшее в процессе карбонатной биоминерализации, привело к структурно-морфологическим изменениям и, как следствие, к изменению микрорельефа – формированию микро- и макрошероховатостей. Следствием этих процессов явилось изменение гидрофобности поверхности цементного камня, о чем свидетельствует увеличение контактного угла

смачивания (КУ) [14–15]. Так, на исходном не обработанном бактериальным инокулятом и раствором с прекурсорами образце цементного камня (контроль 1) среднее значение контактного угла смачивания составляет 45° (табл. 2). Выдержка образца цементного камня в растворе прекурсоров и последующая сушка в естественных условиях привела к изменению морфологии его поверхности, обусловленному осаждением хлорида кальция и мочевины, вследствие чего увеличился контактный угол (КУ=51°). Выдержка цементного камня в растворах прекурсоров с бактериальными инокулятами *B. megaterium, L. sphaericus, B. pumilus* спровоцировала процессы карбонатной минерализации, в результате чего в межпоровом пространстве и на поверхности образцов произошла кристаллизация карбоната кальция. Следствием этих процессов явилось наблюдаемое увеличение контактного угла смачивания (табл. 2), средние значения которого составили 55°, 71° и 81° соответственно. Среднее значение контактного угла смачивания на образце с бактериальным штаммом *S. pasteurii* составило 48°, что несколько выше контрольного образца, однако ниже значения, установленного для цементного камня, выдержанного в растворе прекурсоров без бактериального воздействия. Этот факт можно объяснить самой низкой среди изученных бактериальных культур интенсивностью карбонатной минерализации и, следовательно, постгенетической инкрустацией, проявляющейся незначительным изменением рельефа поверхности образцов.

Таблица 1

Количественное содержание кальция в образцах

Наименование образцов			Концентрация Ca, %
Цементный камень	выдержанный в растворе прекурсоров (контроль 2)		34
	выдержанный в бактериальном инокуляте с растворами прекурсоров	*S. pasteurii*	33
		B. megaterium	35
		L. sphaericus	36
		B. pumilus	40

Таблица 2

Характер изменения контактного угла смачивания в зависимости от состава образцов цементного камня

Наименование образцов			Среднее значение контактного угла смачивания, градус
Цементный камень	Контроль 1		45
	выдержанный в растворе прекурсоров (контроль 2)		51
	выдержанный в бактериальном инокуляте с растворами прекурсоров	*S. pasteurii*	48
		B. megaterium	55
		L. sphaericus	71
		B. pumilus	81

Сравнительный анализ позволил установить связь между интенсивностью карбонатной биоминерализации, характеризующейся содержанием кальция по данным микроанализа, и средним значением контактного угла смачивания (рис. 2).

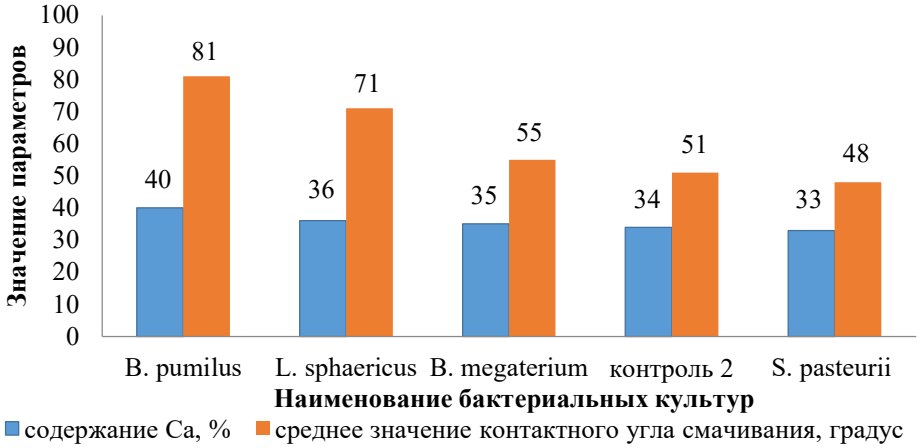


Рис. 2. Изменение концентрации кальция (по данным химического анализа) в новообразованиях и среднего значения контактного угла смачивания на поверхности цементного камня от вида бактериальной культуры

Выводы. Таким образом, в ходе исследования было показано, что в результате микробной карбонатной минерализации, которой подвергались образцы цементного камня, происходит биокольматация пор на глубину пропитки матрицы, инкрустация биоиндуцированными кристаллами карбоната кальция поверхности образцов и создание более развитого микрорельефа по сравнению с контрольным цементным камнем. Следствием карбонатной биоминерализации является повышение гидрофобности, о чем свидетельствует увеличение контактного угла смачивания на всех обработанных бактериальными культурами образцах цементного камня. По данным химического и морфологического анализа биоиндуцированных новообразований на поверхности образцов, а также результатам оценки изменения контактного угла смачивания по сравнению с исходным показателем для цементного камня, бактериальные культуры проранжированы в порядке повышения эффективности использования для осаждения карбоната кальция при их участии, а также повышения гидрофобности цементных материалов в следующей последовательности: *S. pasteurii* → *B. megaterium* → *L. sphaericus* → *B. pumilus.*

Источник финансирования. *Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18-29-12011 с использованием оборудования Центра Высоких Технологий БГТУ им. В.Г. Шухова.*

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Строкова В.В., Власов Д.Ю., Франк-Каменецкая О.В. Микробная карбонатная биоминерализация как инструмент природоподобных технологий в строительном материаловедении // Строительные материалы. 2019. № 7. С. 66–72. DOI: 10.31659/0585-430X-2019-772-7-66-72.

2. Dhami N.K, Reddy M.S., Mukherjee A. Biomineralization of calcium carbonates and their engineered applications: a review // Frontiers in Microbiology. 2013. No. 4. P. 314. DOI.org/10.3389/fmicb.2013.00314

3. Seifan M., Berenjian A. Microbially induced calcium carbonate precipitation: a widespread phenomenon in the biological world // Applied Microbiology and Biotechnology. 2019. Vol. 103. No. 12. Pp. 4693–4708. DOI:10.1007/s00253-019-09861-5

4. Ivanov V., Chu J., Stabnikov V. Basics of construction microbial biotechnology // Biotechnologies and Biomimetics for Civil Engineering. 2015. Pp. 21–56. DOI.org/10.1007/978-3-319-09287-4_2

5. De Muynck W., De Belie N., Verstraete W. Microbial carbonate precipitation in construction materials: a review // Ecological Engineering. 2010. Vol. 36. Pp. 118–136. DOI:10.1016/j.ecoleng.2009.02.006

6. Сивков С.П., Логинова Т.В., Мымрина А.К. Биодобавки для сухих строительных смесей // Сухие строительные смеси. 2017. № 5. С. 15–18.

7. Le Métayer-Levrel G., Castanier S., Orial G., Loubière J.-F., Perthuisot J.-P. Applications of bacterial carbonatogenesis to the protection and regeneration of limestones in buildings and historic patrimony // Sedimentary Geology. 1999. Vol. 26. Pp. 25–34. DOI:10.1016/S0037-0738(99)00029-9.

8. Rodriguez-Navarro C., Fadwa J., Schiro M., Ruiz-Agudo E., Gonzalez-Muñoz M.T. Influence of substrate mineralogy on bacterial mineralization of calcium carbonate: implications for stone conservation // Applied and Environmental Microbiology. 2012. Vol. 78. Pp. 4017–4029. DOI: 10.1128/AEM.07044-11.

9. Achal V., Mukerjee A., Reddy M.S. Biogenic treatment improves the durability and remediates the cracks of concrete structures // Construction and Building Materials. 2013. Vol. 48. Pp. 1–5. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2013.06.061.

10. Wang J.Y., Soens H., Verstraete W., De Belie N. Selfhealing concrete by use of microencapsulated bacterial spores // Cement and Concrete Research. 2014. Vol. 56. Pp. 139–152. DOI:10.1016/J.CEMCONRES.2013.11.009.

11. Wang J., Mignon A., Snoeck D., Wiktor V., Boon N., De Belie N. Application of modified-alginate encapsulated carbonate producing bacteria in concrete: a promising strategy for crack self-healing // Frontiers in Microbiology. 2015. Vol. 6. P. 1088. DOI: 10.3389/fmicb.2015.01088.

12. 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.

13. Духанина У.Н., Балицкий Д.А., Строкова В.В. Воздействие кислорода и ионов кальция на морфогенез бактерий рода Bacillus // Наука и инновации в XXI веке: актуальные вопросы, открытия и достижения Сборник статей XIII Международной научно-практической конференции в 2-х частях. 2019. С. 48–50.

14. Кожухова М.И., Фомина Е.В., Фомин А.Е. Фракталы как иерархический принцип организации в строительном материаловедении // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2018. №. 7. С. 18–23. DOI: 10.12737/article_5b4f02b20be876.03657115.

15.Кожухова М.И., Строкова В.В., Соболев К.Г. Особенности гидрофобизации мелкозернистых поверхностей // Вестник БГТУим. В.Г. Шухова. 2014. № 4. С. 33–35.

Информация об авторах
Духанина Ульяна Николаевна, аспирант кафедры материаловедения и технологий материалов. E-mail: Duhanina777@yandex.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Строкова Валерия Валерьевна, доктор технических наук, профессор. E-mail: vvstrokova@gmail.com. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Балицкий Дмитрий Андреевич, магистрант кафедры материаловедения и технологий материалов. E-mail: bob.stalker2012@yandex.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Поступила 11.05.2020
© Духанина У.Н., Строкова В.В., Балицкий Д.А., 2020

Dukhanina U.N., *Strokova V.V., Balitsky D.A.
Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhova
**E-mail: vvstrokova@gmail.com*

INFLUENCE OF MICROBIAL CARBONATE MINERALIZATION ON HYDROPHOBICITY OF A CEMENT STONE SURFACE

Abstract. *The effect of microbial carbonate mineralization on increasing the hydrophobicity of the cement stone surface is theoretically justified and experimentally confirmed. Based on experimental studies and analysis of literature data, the main stages of microbial-induced sedimentation of calcium carbonate on the surface of a cement stone are formulated. Changes in the morphology of the cement stone surface due to crystalline new formations formed during biomineralization in the postgenetic period are described. It is shown that biocolmatation of the interstitial space of a cement stone by crystalline new formations leads to an increase in hydrophobicity, as evidenced by an increase in the contact wetting angle. The relationship between the change in the concentration of calcium in neoplasms and the average value of the contact wetting angle on the surface of the cement stone from the type of bacterial culture is established. According to chemical and morphological analysis of bioinduction tumors on the surface of samples and also evaluation of changes of the contact angle compared to the original index for cement, bacterial cultures are ranked in order to increase the efficiency of use for sedimentation of calcium carbonate with their participation, as well as increase of cement materials hydrophobicity in the following sequence: Sporosarcina pasteurii → Bacillus megaterium → Lysinibacillus sphaericus → Bacillus pumilus.*

Keywords: *carbonate biomineralization, bacterial culture, cement matrix, contact wetting angle, hydrophobicity, colmatization.*

REFERENCES

1. Strokova V.V., Vlasov D.Yu., Frank-Kamenetskaya O.V. Microbial carbonate biomineralisation as a tool of natural-like technologies in construction material science. Construction Materials. 2019. No. 7. Pp. 66–72. DOI: 10.31659/0585-430X-2019-772-7-66-722. (rus)

2. Dhami N.K, Reddy M.S., Mukherjee A. Biomineralization of calcium carbonates and their engineered applications: a review. Frontiers in Microbiology. 2013. No. 4. Pp. 314. DOI: 10.3389/fmicb.2013.00314.

3. Seifan M., Berenjian A. Microbially induced calcium carbonate precipitation: a widespread phenomenon in the biological world. Applied Microbiology and Biotechnology. 2019. Vol. 103. No. 12. Pp. 4693–4708. DOI:10.1007/s00253-019-09861-5.

4. Ivanov V., Chu J., Stabnikov V. Basics of construction microbial biotechnology. Biotechnologies and Biomimetics for Civil Engineering. 2015. Pp. 21–56. DOI: 10.1007/978-3-319-09287-4_2.

5. De Muynck W., De Belie N., Verstraete W. Microbial carbonate precipitation in construction materials: a review. Ecological Engineering. 2010. Vol. 36. Pp. 118–136. DOI:10.1016/j.ecoleng.2009.02.006.

6. Sivkov S.P., Loginova T.V., Mymrina A.K. Supplements for dry building mixes [Biodobavki dlya sukhikh stroitel'nykh smesey]. Sukhie stroitel'nye smesi. 2017. No. 5. Pp. 15–18. (rus)

7. Le Métayer-Levrel G., Castanier S., Orial G., Loubière J.-F., Perthuisot J.-P. Applications of bacterial carbonatogenesis to the protection and regeneration of limestones in buildings and historic patrimony. Sedimentary Geology. 1999. Vol. 26. Pp. 25–34. DOI:10.1016/S0037-0738(99)00029-9.

8. Rodriguez-Navarro C., Fadwa J., Schiro M., Ruiz-Agudo E., Gonzalez-Muñoz M.T. Influence of substrate mineralogy on bacterial mineralization of calcium carbonate: implications for stone conservation. Applied and Environmental Microbiology. 2012. Vol. 78. Pp. 4017–4029. DOI: 10.1128/AEM.07044-11.

9. Achal V., Mukerjee A., Reddy M.S. Biogenic treatment improves the durability and remediates the cracks of concrete structures. Construction and Building Materials. 2013. Vol. 48. Pp. 1–5. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2013.06.061.

10. Wang J.Y., Soens H., Verstraete W., De Belie N. Selfhealing concrete by use of microencapsulated bacterial spores. Cement and Concrete Research. 2014. Vol. 56. Pp. 139–152. DOI:10.1016/J.CEMCONRES.2013.11.009.

11. Wang J., Mignon A., Snoeck D., Wiktor V., Boon N., De Belie N. Application of modified-alginate encapsulated carbonate producing bacteria in concrete: a promising strategy for crack self-healing. Frontiers in Microbiology. 2015. Vol. 6. Pp. 1088. DOI: 10.3389/fmicb.2015.01088.

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

13. Dukhanina U.N., Balitsky D.A, Strokova V.V. The effect of oxygen and calcium ions on the morphogenesis of bacteria of the genus Bacillus [Vozdeystviye kisloroda i ionov kal'tsiya na morfogenez bakteriy roda Bacillus]. Science and Innovation in the 21st Century: Real Issues, Discoveries, and Achievements The collection of states of the XIII International Scientific and Practical Conference in 2 parts. 2019. Pp. 48–50. (rus)

14. Kozhuhova M.I., Fomina E.V., Fomin A.E. Fractals as a principle of hierarchical structure formation in construction material science [Fraktaly kak iyerarkhicheskiy printsip organizatsii v stroitel'nom materialovedenii]. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2018. No. 7. Pp. 18–23. DOI: 10.12737/article_5b4f02b20be876.03657115. (rus).

15. Kozhuhova M.I., Strokova V.V., Sobolev K.G. Features of hydrophobization of fine-grained surfaces [Osobennosti gidrofobizatsii melkozernistykh poverkhnostey]. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2014. No. 4. Pp. 33–35. (rus)

Information about the authors

Strokova, Valeria V. DSc, Professor. E-mail: vvstrokova@gmail.com. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Dukhanina, Ulyana N. Postgraduate student. E-mail: duhanina777@yandex.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Balitsky, Dmitry A. Master student. E-mail: bob.stalker2012@yandex.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Received 11.05.2020

Для цитирования:

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

For citation:

Dukhanina U.N., Strokova V.V., Balitsky D.A. Influence of microbial carbonate mineralization on hydrophobicity of a cement stone surface. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2020. No. 7. Pp. 19–25. DOI: 10.34031/2071-7318-2020-5-7-19-25