

Интернет-журнал «Транспортные сооружения» <https://t-s.today>

Russian journal of transport engineering

2018, №4, Том 5 / 2018, No 4, Vol 5 <https://t-s.today/issue-4-2018.html>

URL статьи: <https://t-s.today/PDF/07SATS418.pdf>

DOI: 10.15862/07SATS418 (<http://dx.doi.org/10.15862/07SATS418>)

Статья поступила в редакцию 10.08.2018; опубликована 28.09.2018

Ссылка для цитирования этой статьи:

Ерофеев В.Т., Аль Дулайми Салман Давуд Салман, Смирнов В.Ф. Бактерии для получения самовосстанавливающихся бетонов // Интернет-журнал «Транспортные сооружения», 2018 №4, <https://t-s.today/PDF/07SATS418.pdf> (доступ свободный). Загл. с экрана. Яз. рус., англ. DOI: 10.15862/07SATS418

For citation:

Erofeev V.T., Al-Dulaimi Salman Dawood Salman, Smirnov V.F. (2018). Bacteria for self-healing concretes. *Russian journal of transport engineering*, [online] 4(5). Available at: <https://t-s.today/PDF/07SATS418.pdf> (in Russian). DOI: 10.15862/07SATS418

УДК 691

ГРНТИ 67.09.33

Ерофеев Владимир Трофимович

ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарёва»
Саранск, Россия

Декан архитектурно-строительного факультета
Заведующий кафедрой «Строительных материалов и технологий»
ЗАО «НИИ Материаловедение», Москва, Россия

Директор
Доктор технических наук, профессор

Академик РААСН

E-mail: fac-build@adm.mrsu.ru

РИНЦ: http://elibrary.ru/author_profile.asp?id=161483

Researcher ID: <http://www.researcherid.com/rid/A-7827-2017>

SCOPUS: <http://www.scopus.com/authid/detail.url?authorId=56662851300>

Аль Дулайми Салман Давуд Салман

ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарёва»
Саранск, Россия

Аспирант

E-mail: salmoon-1985@mail.ru

Смирнов Василий Филиппович

ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет имени Н.И. Лобачевского», Нижний Новгород, Россия

Профессор кафедры «Биохимии и биотехнологии»

Доктор биологических наук

E-mail: biodeg@mail.ru

**Бактерии для получения
самовосстанавливающихся бетонов**

Аннотация. Самовосстанавливающийся бетон является продуктом, в котором с помощью микроорганизмов будет производиться известняк для заполнения трещин, появляющихся на поверхности бетонных конструкций. Автором представлен, что специально подобранные типы бактерий рода *Bacillus*, питательное вещество на основе кальция, известное

как лактат кальция, а также азот и фосфор, добавляют к ингредиентам бетона при его замесе. Эти средства самовосстановления могут находиться в состоянии покоя внутри бетона до 200 лет. Самовосстанавливающиеся материалы – это особый тип материалов, регенерирующих свои прочностные свойства после незначительного разрушения, нанесенного материалу в течение срока его службы. Технология самовосстановления особенно полезна в случае композитных материалов, поскольку композиты обладают низкой способностью к обнаружению повреждений и восприимчивы к внезапному и хрупкому разрушению. Современные искусственные материалы обладают отличными механическими качествами. Однако им недостает способности к самовосстановлению. Поэтому в случае повреждения возникает возможность потери механической прочности, а со временем и постепенной потери функциональной прочности при отсутствии вмешательства человека.

Различные виды бактерий наряду с абиотическими факторами, такими как минерализация, величина pH окружающей среды, температура, наличие питательных веществ и состав среды обитания, играют значительную роль в процессе осаждения карбоната кальция в широком диапазоне различных сред. Существуют четыре ключевых фактора, которые определяют процесс MICP: (i) концентрация кальция, (ii) концентрация растворенного неорганического углерода, (iii) значение pH и (iv) наличие центров зародышеобразования.

Ключевые слова: биобетоны; биоцементирование; бактерии; *S. pasteurii*; *Bacillus pasteurii*; концентрация; добавки

Введение

Одной из важнейших характеристик прочности бетонов и других цементных композитов является трещиностойкость или вязкость разрушения, под которой понимают группу параметров надежности, характеризующих способность материала тормозить развитие трещины, а в качестве меры этого свойства современная механика материалов предполагает величину, называемую энергией разрушения [2, 22, 23, 24, 25, 26, 27]. Изучение данного параметра прочности своей фундаментальностью привлекает внимание исследователей, которые указывают оптимальные пути создания конструкционных бетонов нового поколения, основанных на использовании закономерностей физики и химии, механики деформирования материалов [2, 5, 7, 9, 10, 11, 13, 15, 16, 17, 28, 29, 30].

Опыт показывает, что во время эксплуатации железобетонные конструкции очень часто подвергаются растрескиванию, что приводит к ухудшению их качества и сокращению ожидаемого срока эксплуатации. Как правило, обслуживание и ремонт железобетонных конструкций влекут за собой огромные расходы. Для продления срока их службы и, следовательно, снижения расходов на обслуживание крайне важно свести к минимуму распространение в бетоне трещин. В этой связи существует серьезный экономический стимул для разработки бетона, способного самостоятельно восстанавливаться и устранять повреждения. Ранее полученные данные различных исследователей свидетельствуют о том, что самовосстановление бетона может быть достигнуто путем введения в бетонную матрицу бактерий [13, 16, 17, 20].

В настоящей работе приводится классификация бактерий, дается обзор по технологии получения материалов с биодобавками и устранения трещин в бетоне. В недавних публикациях вынесена на рассмотрение более усовершенствованная технология производства биологического бетона с использованием специально подобранных бактерий рода *Bacillus* и сочетанием питательных веществ для создания в бетоне восстанавливающего средства [37, 38, 40, 41]. С помощью такого самовосстанавливающегося посредством бактерий бетона можно уплотнить трещины шириной более 100 мкм [39].

Поэтому эта область исследований представляется многообещающей альтернативой экологически опасным способам ремонта с применением цемента.

Классификацию бактерий обычно проводят по трем признакам: по форме, по окраске по Граму и по потребности в кислороде, которые показаны на рис. 1. Подвиды каждой категории представлены на рис. 2, рис. 3 и рис. 4.

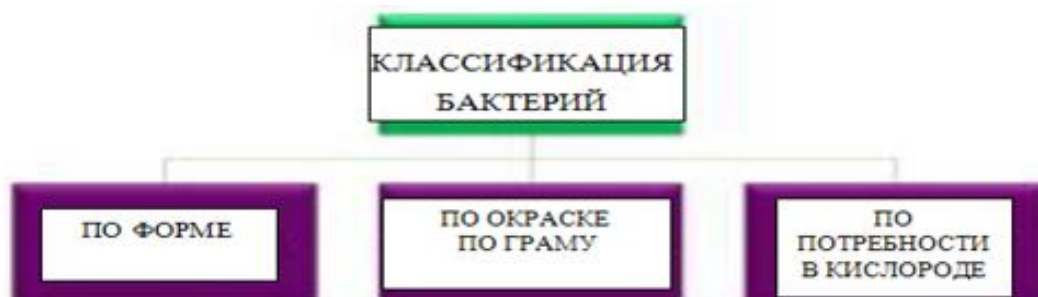


Рисунок 1. Классификация бактерий (разработано автором)



Рисунок 2. Классификация бактерий по форме (разработано автором)

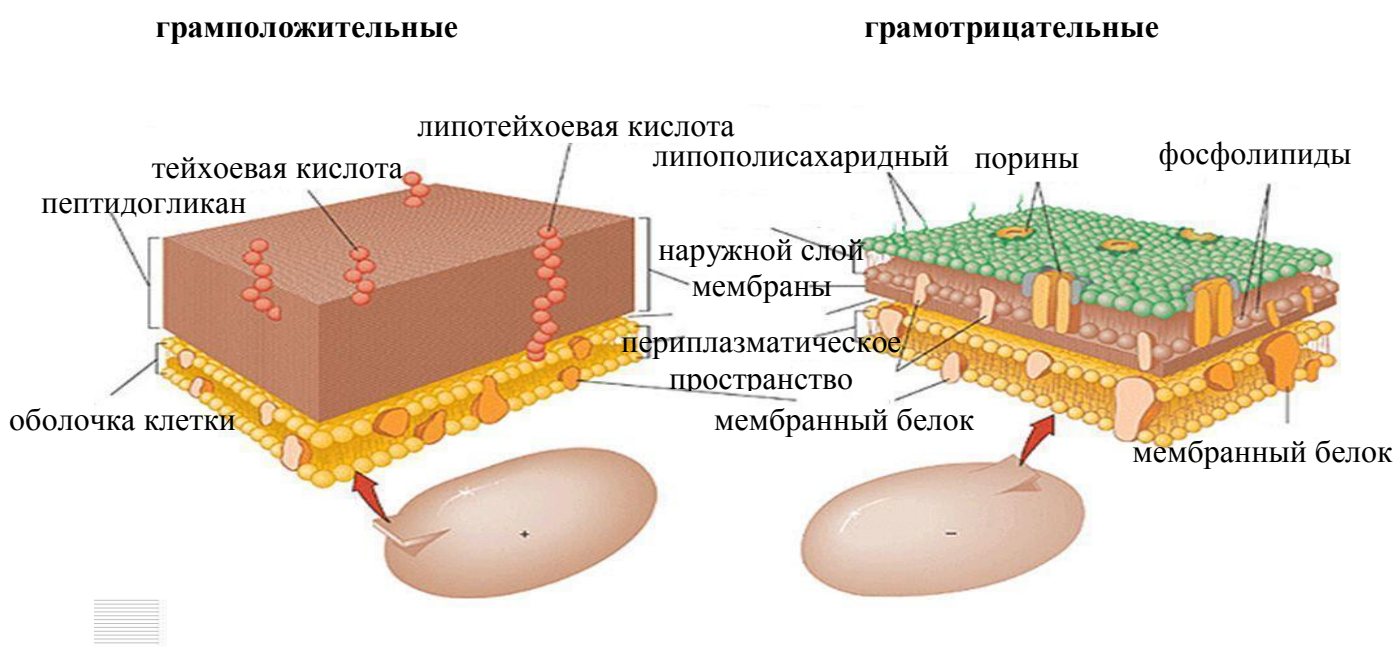


Рисунок 3. Классификация бактерий по окраске по Граму [31]



Рисунок 4. Классификация по потребности в кислороде

Существуют различные виды бактерий, используемые в области строительства. На рис. 5 приведены данные из обзора литературы. В таблицах 1 и 2 представлены другие области практического применения бактерий.

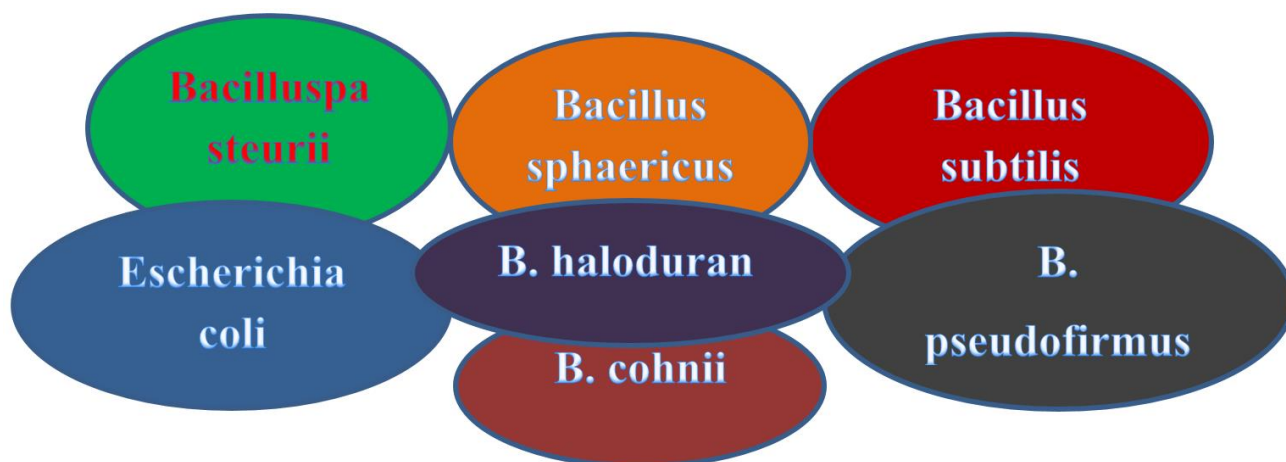


Рисунок 5. Различные типы бактерий, которые используются в производстве бетона (разработано автором)

Таблица 1

Обзор различных строительных материалов с использованием МІСР

Приложение	Микро-организм	Метаболизм	Питательное вещество	Ссылки
1	2	3	4	5
Биологический строительный раствор	Bacillus cereus	Окислительное деаминирование аминокислот	Среда для роста (пептон, экстракт дрожжей, KNO_3 , $NaCl+CaCl_2 \cdot 2H_2O$, Актикал, Натамицин)	W. De Muynck et al. [1]
Ликвидация трещин в бетоне	Bacillus subtilis	Гидролиз мочевины	Питательный бульон, мочевины, $CaCl_2 \cdot 2H_2O$, NH_4Cl , $NaHCO_3$	S.K. Ramachandran, et al. [2]
Ликвидация трещин в бетоне	Bacillus sphaericus	Гидролиз мочевины	Экстракт дрожжей, мочевины, $CaCl_2 \cdot 2H_2O$	W. De Muynck et al. [3]
Биобетон	Bacillus subtilis	Гидролиз мочевины	Питательный бульон, мочевины, $CaCl_2 \cdot 2H_2O$, NH_4Cl , $NaHCO_3$	W. De Muynck et al. [1]

Приложение	Микро-организм	Метаболизм	Питательное вещество	Ссылки
1	2	3	4	5
Биобетон	<i>Bacillus subtilis</i>	Окислительное деаминирование аминокислот	пептон 5 г/л, NaCl 5 г/л, экстракт дрожжей 3г/л	M. Seshagiri Rao M., 2012 [18]

Разработано автором

Таблица 2

Микроорганизмы, которые используют для осаждения карбоната кальция в бетоне

Тип микроорганизма	Система	Тип кристаллов	Ссылки
Фотосинтезирующий организм: <i>Synechococcus</i> GL24	меромиктическое озеро	Кальцит (CaCO_3)	C.Y. Tai и F.B. Chen [19]
Фотосинтезирующий организм: <i>Chlorella</i>	люцерновое озеро	Кальцит (CaCO_3)	S. Sanchez-Moral, J. Canaveras [20]
Сульфатредуцирующие бактерии: Изолят SRB, LVform6	аноксигенный гиперсолёный лиман	Доломит ($\text{Ca}(\text{Mg})\text{CO}_3$)	M.T. Gonzalez- Murioz [21]
Азотный цикл <i>Bacillus subtilis</i>	разложение мочевины в синтет. среде	Кальцит (CaCO_3)	S. Castanier et al. [7]
Азотный цикл <i>Bacillus cereus</i>	аммонификация и восстановление нитратов	Кальцит (CaCO_3)	S. Castanier et al. [6]
Азотный цикл <i>Bacillus subtilis</i> JC3	аммонификация (разложение аминокислот)	Кальцит (CaCO_3)	M. Seshagiri Rao [18]

Разработано автором

При повреждении бетонной конструкции и просачивании воды через трещины, которые появляются в бетоне, споры бактерий при контакте с водой и питательными веществами активируются. После «пробуждения» они начинают питаться лактатом кальция. В результате этого расходуется кислород, а растворимый лактат кальция преобразуется в нерастворимый известняк, который затвердевает на поверхности трещин, тем самым заполняя их [17, 19, 20]. Это похоже на процесс, когда переломы костей в человеческом теле естественным образом заполняются остеобластическими (костеобразующими) клетками, которые насыщают минеральными солями и заново формируют кость.

Потребление кислорода в ходе превращения бактериями лактата кальция в известняк имеет дополнительное преимущество. Кислород является одним из элементов в процессе коррозии стали. При активировании бактерий он весь ими усваивается, что увеличивает долговечность железобетонных конструкций [13, 14, 15, 18].

Два компонента средства самовосстановления (споры бактерий и питательные вещества на основе лактата кальция) вводятся в бетон в виде отдельных гранул размером 2-4 мм. Это препятствует активации компонентов в процессе смешивания с цементом. Только при появлении трещин гранулы и поступающая в них вода обеспечивают контакт бактерий с лактатом кальция, и бактерии активируются.

Тестирование показало, что при просачивании в бетон воды бактерии пробуждаются и начинают быстро размножаться. В лабораторных условиях они в течение семи дней преобразуют питательные вещества в известняк [10, 14, 16, 18].

В природе при более низких температурах этот процесс занимает несколько недель [11, 13, 14, 17].

Различные микробы населяют экстремальные среды. Понятие «экстремальные» относительное, его рассматривают в сравнении с тем, что является нормальным для человека. Экстремальные условия включают высокие значения температуры, pH, давления,

концентрации соли и низкие значения температуры, рН, концентрации питательных веществ и наличия воды, а также условия с высокими уровнями радиации, вредными тяжелыми металлами и токсичными соединениями (органическими растворителями). Для получения информации о разнообразии микробов в этих средах использовали методы, зависящие и не зависящие (молекулярные) от влияния культуры. В ходе выполнения программы научно-исследовательских работ выявлена новая разновидность экстремофильных микробов. В процессе эволюционирования эти организмы претерпели несколько структурных и химических адаптаций, которые позволяют им выживать и размножаться в экстремальных условиях. Ферменты вырабатываемые микробами, которые функционируют в экстремальных условиях (экстремозимы), используются в нескольких биотехнологических прикладных задачах [8]. Исследования микробов в искусственных щелочных средах, таких как известковый шлам, массивы известняка или цемент, очень немногочисленны. Разновидности бактерий в таких щелочных местах обитания дадут ценную информацию о преобладающих там микробах, которые, возможно, могут быть использованы для восстановления строительных материалов, поскольку они могут выдерживать экстремальное значение рН цемента.

Хотя микроорганизмы являются, пожалуй, наиболее разнообразным [9, 10] и распространённым [11] типом организмов на Земле, распределение разновидностей микробов в масштабах континента мало изучено.

Описывающие биогеографию микроорганизмов экологи обычно ссылаются на высказывание М. Вејеринк [12]: «Все есть везде, окружающая среда производит отбор». В ряде исследований были предприняты попытки проверить это утверждение или указать, какие экологические факторы оказывают наиболее сильное воздействие на микробные сообщества в природе [13].

Находясь в щелочной среде, клетки сталкиваются со многими проблемами. Наибольшее значение имеет способность поддерживать внутренний уровень рН. Чтобы выжить в щелочной среде, клетки должны сделать свою цитоплазму более кислой для буферизации щелочности. Для поддержания жизни нужны умеренные среды. Они имеют уровень рН, близкий к нейтральному, температуру от 20 до 40°C, атмосферное давление 1 атм и соответствующие уровни доступности воды, питательных веществ и солей. Многие экстремальные среды, такие как кислотные или горячие источники, соляные и/или щелочные озера, пустыни и дно океана, также встречаются в природе и являются слишком жесткими для существования нормальной жизни. Любое состояние окружающей среды, которое может быть воспринято как выходящее за пределы нормального допустимого диапазона является экстремальным состоянием [8]. Однако в таких средах выживают и размножаются самые разные микробы. Эти организмы, известные как экстремофилы, не только переносят специфически экстремальные условия, и как правило, нуждаются в них для выживания и роста. В мире микробов существует большее число экстремофилов. Микробы переносят гораздо более широкий диапазон экстремальных условий окружающей среды, чем другие формы жизни. Пределы роста и размножения микробов от -12°C до более чем +100°C, рН от 0 до 13, гидростатическое давление до 1 400 атм, концентрации соли – на уровне насыщенных солевых растворов. Наряду с природными экстремальными условиями, существуют искусственные, такие как холодные дома, здания с паровым отоплением, кислые шахтные воды и др.

В таких щелочных средах, как почвы, увеличение рН связано с процессами аммонификации и сульфатредукции в результате деятельности микробов, и наличием воды, полученной из выщелоченных силикатных минералов. Значение рН в этих средах может варьироваться в силу их ограниченной буферной способности, и, следовательно, в этих местах обитания больше устойчивых к щелочи микробов, чем алкалофильных. Промышленные процессы, в том числе производство цемента, горнодобыча, утилизация доменного шлака,

гальваническое производство, производство продуктов питания, бумаги и целлюлозы, являются источником техногенных нестабильных щелочных сред [8]. Алкалифильные грамположительные и образующие эндоспores бактерии вида *Bacillus*, не образующие спор бактерии видов *Pseudomonas*, *Paracoccus*, *Micrococcus*, *Aeromonas*, *Corynebacterium* и *Actinopolyspora*, грамположительные образующие эндоспores бактерии вида *Bacillus* и устойчивые к щелочи грибы были выделены из нейтральных почв.

Основным побудительным мотивом проведения экстенсивного и интенсивного изучения экстремофилов в течение последних десятилетий являются перспективное биотехнологическое практическое применение этих микробов и продуктов их жизнедеятельности. Перспектива вырастет в геометрической прогрессии при выделении новых штаммов микроорганизмов, идентификации новых соединений и метаболических путей получения молекулярных и биохимических характеристик клеточных компонентов. Примером экстремозимов, которые в настоящее время используются в коммерческих целях, являются щелочные протеазы в моющих средствах. Экстенсивные и интенсивные усилия, предпринимаемые во всем мире для изучения разновидностей экстремофильных микробов, показали, что современные знания в этой области – только верхушка айсберга. Ожидается, что еще много новых и полезных экстремофильных микробов, будет открыто в ближайшее время, которые могут быть использованы для получения био бетонов.

Процесс устранения трещин в бетоне с помощью бактерий представлен на рис. 6.

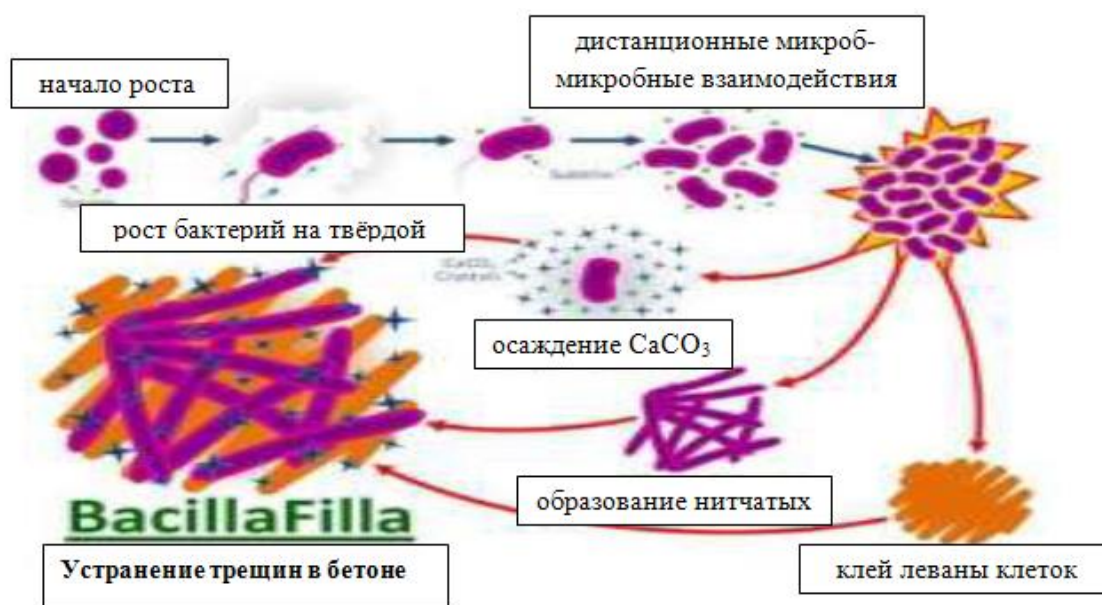


Рисунок 6. Процесс устранения трещин в бетоне под действием бактерий [32]

Проведенное исследование показало, что для устранения трещин можно использовать бактерии анаэробного типа, которые могут постепенно ликвидировать этот дефект. Сначала прорастают споры, и на твердой среде растут бактерии. Затем происходит дистанционное микроб-микробное взаимодействие и разрастание микроорганизмов на подходящей среде в большом количестве в определенное время. В процессе их метаболизма образуется клей леваны, формируются нитчатые клетки и осаждаются CaCO₃. Они соединяются друг с другом и образуют вязущий материал.

ЛИТЕРАТУРА

1. Bacterial carbonate precipitation improves the durability of cementitious materials // W. De Muynck, D. Debrouwer, N. De Belie, Verstraete W. Cem. 38 Concr. Res. – 2008. – Vol. 38 (7). P. 1005-1014.
2. Remediation of concrete using microorganisms / Ramachandran S.K., V. Ramakrishnan, S.S. Bang. // American Con. Inst. Mat. J. – 2001. – Vol. 98 – P. 3-9.
3. Microbial carbonate precipitation in construction materials: A review W. De Muynck, N. De Belie, W. Verstraete (2010) // Ecol. Eng. 36 (2): – p. 118-136.
4. Microbial mediated deterioration of reinforced concrete structures. S.M. Wei, S.M. Sanchez, D. Trejo, and C. Gillis // International Biodeterioration and Biodegradation. – 2010. – Vol. (8) – p. 748-754.
5. The biotechnological utilization of cheese whey / M.I. Gonzalez Siso // Biores. Tech. – 1996. – Vol. 57: 1-11.
6. Ca-carbonates precipitation and limestone genesis – the microbiolgeologist point of view / S. Castanier, G.Le. Metayer-Levrel, J.P. Perthuisot // Sediment Geol – 1999. – Vol. 126 – p. 9-23.
7. Bacterial roles in the precipitation of carbonate minerals / S. Castanier, G. Le M'etayer-Levrel, J.P. Perthuisot // In R.E. Riding, S.M. Awramik (eds), Microbial sediments. Heidelberg: Springer-Verlag, – 2000. – p. 32-39.
8. Extremophilic microbes: Diversity and perspectives / Satyanarayana, C. Raghukumar, S. Shivaji // Current Sci – 2005. – Vol. 89 (1). – p. 78-90.
9. Prokaryotic diversity-Magnitude, dynamics and controlling factors / V. Torsvik, L. Ovreas, T.F. Thingstad // Science. – 2002. – Vol. 296: – p. 1064-1067.
10. Environmental genome shotgun sequencing of the Sargasso Sea / J.C. Venter, K. Remington, J.F. Heidelberg, [et. al.] // Science – 2004. – Vol. 304: – p. 66-74.
11. Prokaryotes: The unseen majority / W.B. Whitman, D.C. Coleman, W.J. Wiebe // Proc Natl Acad Sci – 1998 – Vol. 95: – p. 6578-6583.
12. De Infusies en de Ontdekking der Backterien, Jaarboek van de Koninklijke Akademie v. Wetenschappen / M. Beijerinck. Muller, Amsterdam: 1913.
13. The importance of physical isolation to microbial diversification / R.T. Papke, D.M. Ward // FEMS Microbiol Ecol – Vol. 48 (3): – p. 293-303.
14. Теоретические и методологические вопросы определения характеристик трещиностойкости бетона при статическом нагружении. – Волгоград, Т.К. Акчурин, А.В. Ушаков – 2005. – 407 с.
15. Особенности процесса деформирования высокотрещиностойких бетонов с многоуровневым дисперсным армированием Д.Н. Коротких, А.Г. Кесарийский, Е.М. Чернышов // Вісник Одеської Державної Академії. Будівництва та архітектури. – Вып. № 47. – Ч. 1., Одесса, – 2012. – С. 193-200.
16. Повышение трещиностойкости бетонных и железобетонных конструкций за счет армодемпфирования / П.Г. Комохов, Ю.В. Пухаренко, Ю.А. Беленцов, А.М. Харитонов // Промышленное и гражданское стр-во – 2008. – № 4. С. 24-26.
17. Чернышов Е.М. О требованиях к наномодифицирующим добавкам для высокопрочных цементных бетонов. Д.Н. Коротких, О.В. Артамонова, Е.М.

- Чернышов // Нанотехнологии в стр-ве: науч. Интернет-журнал. М., – 2009. – №2. С. 42-49. – Режим доступа: <http://www.nanobuid.ru>.
18. Polymorphism of CaCO₃ precipitated in a constant-composition environment C.Y. Tai and F.B. Chen // *AIChE Journal*, – 1998. – Vol. 44(8), – p. 1790-1798.
 19. Biomediated precipitation of calcium carbonate metastable phases in hypogean environments: A short review, S. Sanchez-Moral, J.C. Canaveras, L. Laiz, [et. al.] // *Geomicrobiology Journal*, – 2003. – Vol. 20(5), – p. 491-500.
 20. Bacterially induced Mg-Calcite formation: Role of Mg²⁺ in development of crystal morphology, M.T. González-Muñoz, K. Ben-Chekroun, A. Ben-Aboud, and J.M. Arias and M. Rodriguez-Gallego // *Journal of Sedimentary Research*, – 2000. – Vol. 70, – p. 559-564.
 21. A Biological Approach To Enhance Strength And Durability In Concrete” Structures, M.V. Seshagiri Rao, V.Ch. Sasikala and Srinivasa Reddy // *International Journal of Advances in Engineering and Technology (IJAET)*, – 2012. – Vol. 4(2), – p. 392-399.
 22. Н.И. Карпенко, С.Н. Карпенко, В.Н. Ярмаковский, В.Т. Ерофеев / О современных методах обеспечения долговечности железобетонных конструкций // *Academia. Архитектура и строительство* – 2015. № 1. С. 93-102.
 23. И.Н. Максимова, Н.И. Макридин, Н.А. Егина, В.Т. Ерофеев / О параметрах механического поведения горных пород с позиций структурной механики разрушения материалов // *Региональная архитектура и строительство*. – 2017. № 2 (31). С. 25-31.
 24. В.Т. Ерофеев, И.И. Меркулов, Е.А. Митина, А.И. Меркулов, П.С. Ерофеев / Метод численного моделирования для исследования механики разрушения бетонов и изделий на их основе // *Строительные материалы*. – 2006. № 4. С. 72-75.
 25. Ерофеев В.Т., В.И. Римшин, И.И. Меркулов / Исследование механики разрушения каркасных композитов и изделий методом численного моделирования // *БСТ: Бюллетень строительной техники*. – 2003. № 6. С. 30.
 26. И.Н. Максимова, Н.И. Макридин, В.Т. Ерофеев / Методологические аспекты комплексной оценки механического поведения цементных композитов // *Региональная архитектура и строительство*. – 2015. № 1. С. 28-33.
 27. И.Н. Максимова, Н.И. Макридин, В.Т. Ерофеев, Ю.П. Скачков / Структура и прочность конструкционных цементных композитов // *Саранск* – 2015. № 1. С. 16-21.
 28. В.И. Калашников, В.Т. Ерофеев, О.В. Тараканов / Суспензионно-наполненные бетонные смеси для порошково-активированных бетонов нового поколения // *Известия высших учебных заведений. Строительство* – 2016. – № 4 (688). С. 30-37.
 29. В.Т. Ерофеев, И.И. Меркулов, А.И. Меркулов, П.С. Ерофеев / Оптимизация составов бетонов с применением численного моделирования *Саранск* – 2006. № 1. С. 27-29.
 30. В.Т. Ерофеев, Е.В. Волгина, И.В. Ерыкалина, С.В. Казначеев / Оптимизация содержания отверждающих компонентов в винилэфирных композитах // *Известия Юго-Западного государственного университета*. – 2011. – № 5-2 (38). С. 427-433.

31. Difference Between Gram Positive and Gram negative Bacteria / Lakna Panawala “Gram-positive cellwall-schematic” By Twooars at the English language Wikipedia (CC BY-SA 3.0) via Commons Wikimedia Sydney, Australia, Article. – 2017 – p. 1-13.
32. Self-Healing of Concrete Cracks by Ceramsite-Loaded Microorganisms / Jing Xu, Xianzhi Wang, Junqing Zuo, Xiaoyan Liu // *Advances in Materials Science and Engineering*. 2018. – P. 1-8. <https://doi.org/10.1155/2018/5153041>.
33. Ghosh, S.K. (ed.) *Self-healing materials: fundamentals, design strategies, and applications*, Wiley WCH, Weinheim – 2009. – P. 183-218.
34. L. Zhong, M.R. Islam. *A New Microbial Plugging Process and Its Impact on Fracture Remediation* – 1995. – P. 703-715.
35. Hammes, F. and Verstraete, W. “Key roles of pH and calcium metabolism in microbial carbonate precipitation”, *Reviews in Environmental Science and Biotechnology* – 2002. – Vol. 1 № 1 – P. 3-7.
36. Knorre, H.V. and W.E. Krumbein *Bacterial calcification*. In R.E. Riding (Ed.), *Microbial Sediments*, Springer – 2000. – P. 25-31.
37. Nishiwaki, T., et al., *Development of self-healing system for concrete with selective heating around crack*. *J Adv Concr Technol* – 2006. – Vol. 4 (2) – P. 267-275.
38. Van Tittelboom, K., *Self-healing concrete through incorporation of encapsulated bacteria- or polymer-based healing agents*. Ghent University: Ghent – 2012. – P. 344.
39. Pelletier, S.; Tremblay, G.F.; Belanger, G.; Bertrand, A.; Castonguay, Y.; Pageau, D.; Drapeau, R. *Agronomy J. Forage nonstructural carbohydrates and nutritive value as affected by time of cutting and species*. – 2010. – Vol. 102 (5) – P. 1388-1398.
40. Dry, C. and W. McMillan, *Three-part methylmethacrylate adhesive system as an internal delivery system for smart responsive concrete*. *Smart Mater Struct* – 1996. – Vol. 5(3) – P. 297-300.
41. Joseph, C., A. Jefferson, and M. Canoni, *Issues relating to the autonomic healing of cementitious materials*, in 1st international conference on self healing materials: Noordwijk aan Zee, the Netherlands – 2007. – P. 53.

Erofeev Vladimir Trofimovich

National research Ogarev Mordovia state university, Saransk, Russia
Research institute of materials science, Moscow, Russia
E-mail: fac-build@adm.mrsu.ru

Al-Dulaimi Salman Dawood Salman

National research Ogarev Mordovia state university, Saransk, Russia
E-mail: salmoon-1985@mail.ru

Smirnov Vacili Filippovich

National research Nizhny Novgorod state university named after N.I. Lobachevsky, Nizhny Novgorod, Russia
E-mail: biodeg@mail.ru

Bacteria for self-healing concretes

Abstract. Self-healing concrete is a product in which, with the help of microorganisms, limestone will be produced to fill cracks appearing on the surface of concrete structures. The author presents that specially selected types of bacteria of the genus *Bacillus*, a calcium-based nutrient known as calcium lactate, as well as nitrogen and phosphorus, are added to the ingredients of concrete when mixing it. These self-healing agents can be at rest inside the concrete for up to 200 years. Self-healing materials are a special type of materials that regenerate their strength properties after minor destruction caused to the material during its service life. Self-healing technology is particularly useful in the case of composite materials, as composites have low damage detection capacity and are susceptible to sudden and brittle fracture. Modern artificial materials have excellent mechanical properties. However, they lack the ability to self-repair. Therefore, in case of damage, there is a possibility of loss of mechanical strength, and over time, a gradual loss of functional strength in the absence of human intervention.

Different types of bacteria, along with abiotic factors such as mineralization, pH value of the surrounding area, temperature, availability of nutrients and habitat composition, play a significant role in the deposition of calcium carbonate in a wide range of different media. There are four key factors that determine the MICP process: (i) calcium concentration, (ii) dissolved inorganic carbon concentration, (iii) pH value and (iv) presence of nucleation centers.

Keywords: biomethane; biochemotherapy; bacteria; *S. pasteurii*; *Bacillus pasteurii*; concentration; supplements

REFERENCES

1. De Muynck W., Debrouwer D., De Belie N., Verstraete W. (2008). Bacterial carbonate precipitation improves the durability of cementitious materials. *Cement and concrete research*, 38(7), pp. 1005-1014.
2. Ramachandran S.K., Ramakrishnan V., Bang S.S. (2001). Remediation of concrete using microorganisms. *American Con. Inst. Mat. J.*, 98, pp. 3-9.
3. De Muynck W., De Belie N., Verstraete W. (2010). Microbial carbonate precipitation in construction materials: A review. *Ecological engineering*, 36(2), pp. 118-136.
4. Wei S.M., Sanchez S.M., Trejo D., Gillis C. (2010). Microbial mediated deterioration of reinforced concrete structures. *International Biodeterioration and Biodegradation*, 8, pp. 748-754.
5. Gonzalez Siso M.I. (1996). The biotechnological utilization of cheese whey. *Biores. Tech.*, 96. 57, pp. 1-11.

6. Castanier S., Metayer-Levrel G.Le., Perthuisot J.P. (1999). Ca-carbonates precipitation and limestone genesis – the microbiogeologist point of view. *Sediment Geol*, 126, pp. 9-23.
7. Castanier S., Le M'etayer-Levrel G., Perthuisot J.P. (2000). *Bacterial roles in the precipitation of carbonate minerals*. Ed. by R.E. Riding, S.M. Awramik. Heidelberg: Springer-Verlag, pp. 32-39.
8. Satyanarayana, Raghukumar C., Shivaji S. (2005). Extremophilic microbes: Diversity and perspectives. *Current Sci*, 89(1), pp. 78-90.
9. Torsvik V., Ovreas L., Thingstad T.F. (2002). Prokaryotic diversity-Magnitude, dynamics and controlling factors. *Science*, 296, pp. 1064-1067.
10. Venter J.C., Remington K., Heidelberg J.F. and etc. (2004). Environmental genome shotgun sequencing of the Sargasso Sea. *Science*, 304, pp. 66-74.
11. Whitman W.B., Coleman D.C., Wiebe W.J. (1998). Prokaryotes: The unseen majority. *Proc Natl Acad Sci*, 95, pp. 6578-6583.
12. Beijerinck M. (1913). *De Infusies en de Ontdekking der Bacterien, Jaarboek van de Koninklijke Akademie v. Wetenschappen*. Muller, Amsterdam.
13. Papke R.T., Ward D.M. (n.d.). The importance of physical isolation to microbial diversification. *FEMS Microbiol Ecol*, 48(3), pp. 293-303.
14. Akchurin T.K., Ushakov A.V. (2005). Teoreticheskie i metodologicheskie voprosy opredeleniya kharakteristik treshchinostoykosti betona pri staticheskom nagruzhении. [*Theoretical and methodological issues of determining the characteristics of crack resistance of concrete under static loading.*] Volgograd, p. 407.
15. Korotkikh D.N., Kesariyskiy A.G., Chernyshov E.M. (2012). Features of the process of deformation of high-crack-resistant concrete with multilevel dispersive reinforcement. *Vestnik Odesa State Academy. Buildings and architecture*, 47, pp. 193-200. (in Russian).
16. Komokhov P.G., Pukharenko Yu.V., Belentsov Yu.A., Kharitonov A.M. (2008). Increase of crack resistance of concrete and reinforced concrete structures due to armoredging. *Industrial and civil construction*, 4, pp. 24-26. (in Russian).
17. Korotkikh D.N., Artamonova O.V., Chernyshov E.M. (2009). On the requirements for nanomodifying additives for high-strength cement concretes. *Nanotechnologies in construction*, 2, pp. 42-49. (in Russian).
18. Tai C.Y., Chen F.B. (1998). Polymorphism of CaCO₃ precipitated in a constant-composition environment. *AIChE Journal*, 44(8), pp. 1790-1798.
19. Sanchez-Moral S., Canaveras J.C., Laiz L. and etc. (2003). Biomediated precipitation of calcium carbonate metastable phases in hypogean environments: A short review. *Geomicrobiology Journal*, 20(5), pp. 491-500.
20. González-Muñoz M.T., Ben-Chekroun K., Ben-Aboud A., Arias J.M., Rodriguez-Gallego M. (2000). Bacterially induced Mg-Calcite formation: Role of Mg²⁺ in development of crystal morphology. *Journal of Sedimentary Research*, 70, pp. 559-564.
21. Seshagiri Rao M.V., Sasikala V.Ch., Srinivasa Reddy (2012). A Biological Approach To Enhance Strength And Durability In Concrete” Structures. *International Journal of Advances in Engineering and Technology*, 4(2), pp. 392-399.
22. Karpenko N.I., Karpenko S.N., Yarmakovskiy V.N., Erofeev V.T. (2015). On modern methods of ensuring the durability of reinforced concrete structures. *Academia. Architecture and Construction*, 1, pp. 93-102. (in Russian).
23. Maksimova I.N., Makridin N.I., Egina N.A., Erofeev V.T. (2017). On the parameters of the mechanical behavior of rocks from the standpoint of the structural mechanics of material destruction. *Regional architecture and construction*, 2(31), pp. 25-31. (in Russian).

24. Erofeev V.T., Merkulov I.I., Mitina E.A., Merkulov A.I., Erofeev P.S. (2006). The method of numerical simulation for the study of fracture mechanics of concrete and products based on them. *Building Materials*, 4, pp. 72-75. (in Russian).
25. Erofeev V.T., Rimshin V.I., Merkulov I.I. (2003). Investigation of the mechanics of destruction of frame composites and articles by the method of numerical modeling. *Bulletin of construction equipment*, 6, pp. 30. (in Russian).
26. Maksimova I.N., Makridin N.I., Erofeev V.T. (2015). Methodological Aspects of Complex Assessment of Mechanical Behavior of Cement Composites. *Regional Architecture and Construction*, 1, pp. 28-33. (in Russian).
27. Maksimova I.N., Makridin N.I., Erofeev V.T., Skachkov Yu.P. (2015). Structure and Strength of Constructional Cement Composites. *Saransk*, 1, pp. 16-21. (in Russian).
28. Kalashnikov V.I., Erofeev V.T., Tarakanov O.V. (2016). Suspension-filled concrete mixtures for powder-activated concrete of a new generation. *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii. Building*, 4(688), pp. 30-37. (in Russian).
29. Erofeev V.T., Merkulov I.I., Merkulov A.I., Erofeev P.S. (2006). Optimization of concrete compositions using numerical simulation. *Saransk*, 1, pp. 27-29. (in Russian).
30. Erofeev V.T., Volgina E.V., Erykalina I.V., Kaznacheev S.V. (2011). Optimization of the content of curing agents in vinyl ester composites. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo Gosudarstvennogo Universiteta*, 5-2(38), pp. 427-433. (in Russian).
31. Lakna Panawala (2017). *Difference Between Gram Positive and Gram negative Bacteria*. Australia, Article. pp. 1-13. (in Russian).
32. Jing Xu, Xianzhi Wang, Junqing Zuo, Xiaoyan Liu (2018). Self-Healing of Concrete Cracks by Ceramsite-Loaded Microorganisms. *Advances in Materials Science and Engineering*, [online] pp. 1-8. Available at: <https://doi.org/10.1155/2018/5153041> (in Russian).
33. Ghosh S.K. (2009). *Self-healing materials: fundamentals, design strategies, and applications*. Weinheim: Wiley WCH, pp. 183-218.
34. Zhong L., Islam M.R. (1995). A New Microbial Plugging Process and Its Impact on Fracture Remediation. pp. 703-715.
35. Hammes F., Verstraete W. (2002). Key roles of pH and calcium metabolism in microbial carbonate precipitation. *Reviews in Environmental Science and Biotechnology*, 1(1), pp. 3-7.
36. Knorre H.V., Krumbein W.E. (2000). Bacterial calcification. Ed. by R.E. Riding (Ed.), *Microbial Sediments*, Springer. pp. 25-31.
37. Nishiwaki T. and etc. (2006). Development of self-healing system for concrete with selective heating around crack. *Journal of Advanced Concrete Technology*, 4(2), pp. 267-275.
38. Van Tittelboom K. (2012). *Self-healing concrete through incorporation of encapsulated bacteria-or polymer-based healing agents*. Ghent: Ghent University, pp. 344.
39. Pelletier S., Tremblay G.F., Belanger G., Bertrand A., Castonguay Y., Pageau D., Drapeau R., Agronomy J. (2010). Forage nonstructural carbohydrates and nutritive value as affected by time of cutting and species. 102(5), pp. 1388-1398.
40. Dry C., McMillan W. (1996). Three-part methylmethacrylate adhesive system as an internal delivery system for smart responsive concrete. *Smart Mater Struct*, 5(3), pp. 297-300.
41. Joseph C., Jefferson A., Canoni M. (2007). *Issues relating to the autonomic healing of cementitious materials*. Noordwijk aan Zee, the Netherlands, p. 53.