

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

Russian journal of transport engineering

2018, №3, Том 5 / 2018, No 3, Vol 5 <https://t-s.today/issue-3-2018.html>

URL статьи: <https://t-s.today/PDF/13SATS318.pdf>

DOI: 10.15862/13SATS318 (<http://dx.doi.org/10.15862/13SATS318>)

Статья поступила в редакцию 10.08.2018; опубликована 28.09.2018

**Ссылка для цитирования этой статьи:**

Ерофеев В.Т., Аль Дулайми Салман Давуд Салман, Фомичев В.Т. Химические аспекты процесса устранения трещин бетона с помощью бактерий // Интернет-журнал «Транспортные сооружения», 2018 №3, <https://t-s.today/PDF/13SATS318.pdf> (доступ свободный). Загл. с экрана. Яз. рус., англ. DOI: 10.15862/13SATS318

**For citation:**

Erofeev V.T., Al-Dulaimi Salman Dawood Salman, Fomichev V.T. (2018). Chemical aspects of the process of concrete cracks elimination with the help of bacteria. *Russian journal of transport engineering*, [online] 3(5). Available at: <https://t-s.today/PDF/13SATS318.pdf> (in Russian). DOI: 10.15862/13SATS318

**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](mailto:fac-build@adm.mrsu.ru)

РИНЦ: [http://elibrary.ru/author\\_profile.asp?id=161483](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](mailto:salmoon-1985@mail.ru)

**Фомичев Валерий Тарасович**

ФГБОУ ВО «Волгоградский государственный технический университет», Волгоград, Россия  
Профессор кафедры «Общая и неорганическая химия»

Доктор наук

E-mail: [valerifomiche@yandex.ru](mailto:valerifomiche@yandex.ru)

## **Химические аспекты процесса устранения трещин бетона с помощью бактерий**

**Аннотация.** В статье описываются химические процессы биобразования карбоната кальция для самовосстановления бетонов с учетом четырех основных факторов: концентрации кальция, концентрации растворимого неорганического углерода, величины pH, наличия центра кристаллизации.

Ряд бактерий, которые можно обнаружить в почве, песке и природных минералах, обладают способностью выделять карбонат кальция, как в естественных, так и в лабораторных условиях.

В лаборатории в качестве исходного вещества для образования карбоната кальция использовался лактат кальция ( $\text{CaC}_6\text{H}_{10}\text{O}_6$ ). Помимо этого, были добавлены необходимые для бактерий мочевины как источник фермента уреазы и дрожжевой экстракт как источник углерода и азота. Результирующее значение pH среды доводилось до 9, чтобы избежать возможного химического осаждения карбоната кальция.

Для усовершенствования технологии производства биологического бетона использовались специально подобранные бактерии рода *Bacillus* с сочетанием питательных веществ для создания в бетоне восстанавливающего средства. С помощью такого самовосстанавливающегося посредством бактерий бетона можно уплотнить трещины шириной более 100 мкм. При таком подходе бактерии в щелочной среде превращают  $\text{CO}_2$  в карбонатные ионы, которые затем взаимодействуют с ионами Ca из бетонной матрицы. Это приводит к образованию кристаллов карбоната кальция. Кроме того,  $\text{CO}_2$  непосредственно вступает в реакцию с гидроксидом кальция матрицы, что приводит к образованию осадка кальцита. Появление кристаллов карбоната кальция большого размера при участии бактерий, инкорпорированных в самовосстанавливающийся бетон, обеспечивает превосходную способность к самовосстановлению по сравнению с традиционными или разработанными экологически небезопасными самовосстанавливающимися цементными материалами. Именно поэтому эта область исследований представляется многообещающей альтернативой экологически опасным способам ремонта с применением цемента.

**Ключевые слова:** бетонные конструкции; бактерии; *S. Pasteurii*; *Bacillus pasteurii*; концентрация; трещина

## Введение

В настоящее время образование структуры бетона с требуемым уровнем сопротивления разрушению описывается с учетом использования известных закономерностей физикохимии, механики формирования материала [2, 5, 7, 9, 10, 11, 13, 15, 18, 19, 20, 21, 22]. Повышение трещиностойкости возможно за счет перехода к производству бетонов с псевдопластическим типом разрушения [1, 2, 14, 16, 17].

В настоящее время предложены биологические методы повышения надежности бетонных и железобетонных конструкций [4, 5, 6, 8, 10].

Осаждение карбоната кальция является химическим процессом, который регулируют главным образом четыре основных фактора:

1. концентрация ионов кальция;
2. концентрация растворенного неорганического углерода (DIC);
3. величина pH среды;
4. наличие центров кристаллизации [4, 12].

Для осаждения  $\text{CaCO}_3$  необходимо достаточное количество ионов кальция и карбонат-ионов, чтобы ионный коэффициент активности продукта реакции (IAP) превышал константу растворимости ( $K_{\text{SO}}$ ) (формулы (1) и (2)). Состояние степени насыщения ( $\Omega$ ) системы можно определить, сравнивая значения IAP и  $K_{\text{SO}}$ . Если  $\Omega > 1$ , то система перенасыщена и вполне вероятно образование осадка максимальна:

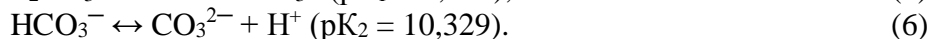
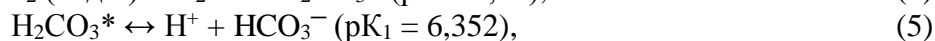
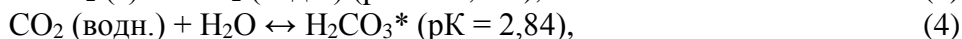
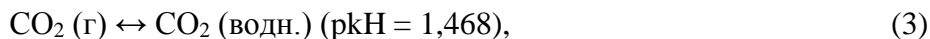


$$\Omega = a(\text{Ca}^{+2})(\text{CO}_3^{2-}) / K_{\text{SO}}, \quad (2)$$

$K_{\text{SO}}$  кальцита при 25°C =  $4,8 \times 10^{-9}$ .

Концентрация ионов карбоната связана с концентрацией DIC и величиной pH в данной водной системе. Кроме того, концентрация DIC зависит от нескольких параметров окружающей среды, а именно от температуры и парциального давления диоксида углерода (для систем, открытых для воздействия атмосферных влияний).

Равновесные реакции и константы, регулирующие процесс растворения CO<sub>2</sub> в водной среде (25 °C и 1 атм), приведены в уравнениях (3)-(6)



При  $\text{H}_2\text{CO}_3^* = \text{CO}_2(\text{водн.}) + \text{H}_2\text{CO}_3$  микроорганизмы могут влиять на процесс осаждения, изменяя практически любой из описанных выше параметров осаждения, либо по отдельности, либо в различных комбинациях друг с другом [4].

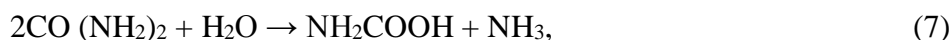
При осаждении карбоната кальция, по-видимому, протекают различные реакции.

**Первая схема** включает цикл серы, в частности, восстановление сульфатов, который осуществляется согласно описанию в «Современных проблемах биоминерализации под действием сульфатредуцирующих бактерий в анаэробных условиях».

**Вторая схема** включает азотный цикл, а именно:

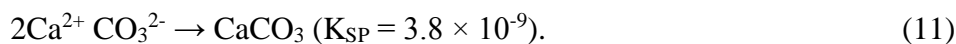
1. Окислительное дезаминирование аминокислот в аэробнозе;
2. Восстановление нитратов в условиях анаэробноза или микроаэрофилии;
3. Разложение мочевины или мочевой кислоты в условиях аэробноза (уреалитическими бактериями).

Другой микробный процесс, который ведет к увеличению как pH, так и концентрации растворенного неорганического углерода, представляет собой утилизацию органических кислот. Этот процесс широко используется в экспериментах по осаждению карбоната микроорганизмами. Описанные выше механизмы осаждения обычно встречаются в природе и объясняют осаждение карбоната под действием микроорганизмов (MCP), подтверждая правильность заявления E. Voquete et al. [6], что в подходящих условиях большинство бактерий способны индуцировать осадки карбоната. Благодаря своей простоте наиболее часто изучаемой системой MCP является гидролиз мочевины с помощью фермента уреазы в богатой кальцием среде. Уреаза катализирует гидролиз мочевины до CO<sub>2</sub> и аммиака, что приводит к увеличению pH и концентрации карбоната в бактериальной среде. В процессе микробной активности уреазы 1 моль мочевины гидролизуют внутриклеточно до 1 моль аммиака и 1 моль карбоната, который самопроизвольно гидролизует с образованием дополнительного 1 моль аммиака и углекислоты следующим образом (с бактериями):

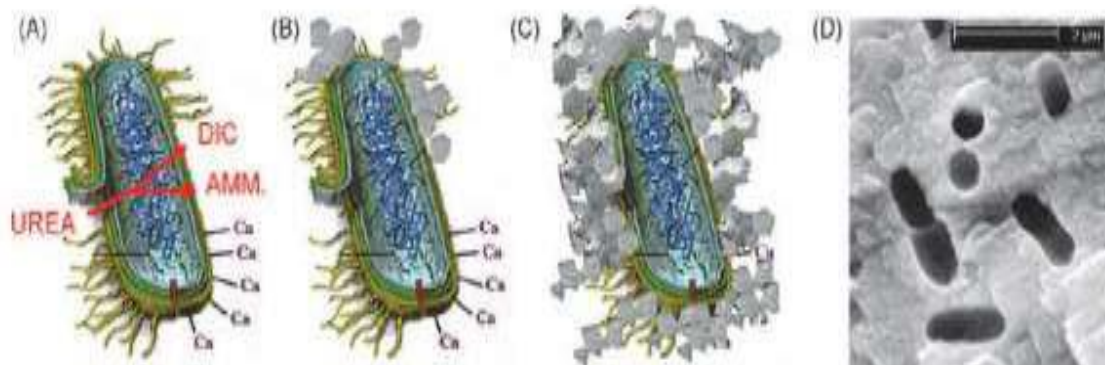


В воде эти продукты приходят в равновесие, образуя бикарбонат, 1 моль аммония и гидроксид-ионы, которые обуславливают повышение pH:





$K_{\text{SP}}$  – это растворимость продуктов реакции в уравнении (11). F. Hammes и W. Verstraete [4] исследовали серию явлений, происходящих во время уреалитического накопления солей кальция, подчеркивая важность в этом процессе величины pH и метаболизма кальция (рис. 1).



**Рисунок 1.** Осаждение кальция бактериальной клеткой [4]

Основную роль бактерий приписали способности бактерий создавать щелочную среду в результате их различной физиологической активности.

Бактериальные поверхности играют важную роль в осаждении кальция. Благодаря наличию нескольких отрицательно заряженных групп при нейтральном значении pH положительно заряженные ионы металлов могут прикрепляться к поверхности бактерий, способствуя гетерогенному процессу зародышеобразования [8]. Как правило, карбонатные осадки развиваются на внешней поверхности бактериальных клеток с последующим отслоением, поэтому бактерии могут быть встроены в растущие кристаллы карбоната [9, 10].



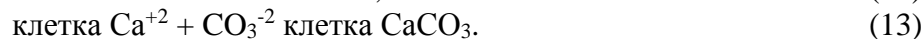
**Рисунок 2.** Применение бактерий в строительстве (разработано автором)

На рис. 2 показано упрощенное представление о процессах, происходящих при осаждении индуцированного микробами карбоната.

В растворе ионы кальция притягиваются к клеточным стенкам бактерий благодаря их отрицательному заряду. При добавлении к бактериям мочевины в микросреде бактерий (A) вырабатываются растворенные неорганические углерод (DIC) и аммоний (AMM). В присутствии ионов кальция это может привести к локальному пересыщению и, следовательно, гетерогенному осаждению карбоната кальция на клеточной стенке бактерий (B). Через некоторое время вся клетка инкапсулируется (C). Ограничение поступления питательных

веществ приводит к гибели клетки. На изображении (D) показаны отпечатки бактериальных клеток, участвовавших в образовании карбонатного осадка.

Возможные биохимические реакции в среде мочевины –  $\text{CaCl}_2$ , где происходит осаждение  $\text{CaCO}_3$  на поверхности клетки, можно обобщить следующим образом:



Проведенное исследование показало, что это упрощенное представление процессов, происходящих во время осаждения карбоната, индуцированного микробами. Однако фактическая роль бактериальных осадков остается предметом дискуссий. Некоторые авторы считают этот осадок нежелательным и случайным побочным продуктом обмена веществ [2], тогда как другие полагают, что это особый процесс, дающий экологические преимущества для осаждающих организмов.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Conservation of ornamental stone by *Myxococcus xanthus*-induced carbonate biomineralization C. Rodriguez-Navarro, M. Rodriguez-Gallego, K. Ben Chekroun, M.T. Gonzalez-Munoz // *Appl Environ Microbiol* – Vol. 69: – p. 2182-2193.
2. Bacterial calcification H. Knorre, W. Krumbein. *Microbial Sediments*. Springer-Verlag, R.E. Riding, S.M. Awramik (eds.). Berlin, Germany, – 2000 – p. 25-31.
3. Precipitation of calcium carbonate by *Vibrio* spp. from an inland saltern / M.A. Rivadeneyra, R. Delgado, A. Moral [et al.] // *FEMS Microbiol Ecol* – 1994 – Vol. 13 – p. 197-204.
4. Key roles of pH and calcium metabolism in microbial carbonate precipitation / F. Hammes, W. Verstraete // *Re/Views Environ Sci Biotechnol Ecol* – 2002 – Vol. 1 – p. 3-7.
5. Bacterially induced mineralization of calcium carbonate in terrestrial environments: the role of exopolysaccharides and amino acids / O. Braissant, G. Cailleau, C. Dupraz, E.P. Verrecchia // *J. Sediment Res* – 2003 – Vol. 73 – p. 485-490.
6. Production of calcite (calcium carbonate) crystals by soil bacteria is a general phenomenon. E. Boquet, A. Boronat, A. Ramos-Cormenzana // *Nature*. – 1973 – Vol. 246 – p. 527-529.
7. Production in seawater of thermostable alkaline protease by a halotolerant strain of *Bacillus licheniformis* / M.G. Fortina, P.L. Manachini // *Biotechnol Lett* – 1998 – Vol. 20 – p. 565-568.
8. Mineral formation by bacteria in natural microbial communities / S. Douglas, T.J. Beveridge // *FEMS Microbiol Ecol* – 1998 – Vol. 26 – p. 79-88.
9. Ca-carbonates precipitation and limestone genesis – the microbiogeologist point of view / S. Castanier, G. Le Metayer-Levrel, J.P. Perthuisot // *Sediment Geol.* – 1999 – Vol. 126 – p. 9-23.
10. Biomineralisation of carbonates by *Halomonas eurihalina* in solid and liquid media with different salinities: crystal formation sequence / M.A. Rivadeneyra, G. Delgado, A. Ramos-Cormenzana, R. Delgado // *Res Microbiol.* – 1998 – Vol. 149 – p. 277-287.

11. 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.
12. Hammes. F. Key roles of pH and calcium metabolism in microbial carbonate precipitation / F. Hammes, W. Verstraete // *Re/Views Environ Sci Biotechnol.* – 2002 – Vol. 1 – p. 3-7.
13. П.Г. Комохов Последовательный системно-дискретный анализ образования и развития трещин в тяжелом бетоне П.Г. Комохов, Р.Л. Сорокко // *Совершенствование технологии производства бетонов повышенной прочности и долговечности: Тез. докл. 4-й Респ. конф.* – Уф: НИИпромстрой, 1985. – С. 12-13.
14. Е.М. Чернышов, Высокотехнологичные высокопрочные бетоны: вопросы управления их структурой Е.М. Чернышов, Д.Н. Коротких Современные проблемы строительного материаловедения и технологии; *Мат. межд. конгресса «Наука и инновации в строительстве»*, – 2008 – Т.1, кн. 2 – С. 616-620.
15. Приложения нанохимии в технологии твердофазных строительных материалов: научно-инженерная проблема, направления и примеры реализации / Е.М. Чернышов, О.В. Артамонова, Д.Н. Коротких [и др.] // *Строительные материалы.* – 2008. № 2 – С. 32-36.
16. Структура, прочность и трещиностойкость цементного камня / А.Е. Шейкин – М.: Стройиздат, – 1974. – 192 с.
17. Коротких Д.Н. О требованиях к наномодифицирующим добавкам для высокопрочных цементных бетонов / Д.Н. Коротких, О.В. Артамонова, Е.М. Чернышов // *Нанотехнологии в строительстве: научный Интернет-журнал.* М., 2009. – № 2. – С. 42-49. – Режим доступа: <http://www.nanobuid.ru>.
18. 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.
19. 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.
20. И.Н. Максимова, В.Т. Ерофеев, Н.И. Макридин, Ю.В. Полубарова. Комплексная оценка параметров качества структуры и механики разрушения цементного камня // *известия высших учебных заведений. Строительство.* 2015. – № 3 (675), с. 14-22.
21. А.Н. Бобрышев, В.Т. Ерофеев, Основы формирования структуры композиционных материалов. Саранск., изд-во Мордовск. ун-та, 2012.
22. В.Т. Ерофеев, И.И. Меркулов, А.И. Меркулов, П.С. Ерофеев / Оптимизация составов бетонов с применением численного моделирования Саранск – 2006.
23. Thao, T.D.P., et al., Implementation of self-healing in concrete – Proof of concept. *The IES Journal Part A: Civil & Structural Engineering* – 2009. – Vol. 2(2) – P. 116-125.
24. 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.

25. Van Tittelboom, K., Self-healing concrete through incorporation of encapsulated bacteria-or polymer-based healing agents. Ghent University: Ghent – 2012. – P. 344.
26. 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.
27. 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.
28. 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.
29. Mihashi, H. and Y. Kaneko, Fundamental study on development of intelligent concrete with selfhealing capability for prevention of water leakage. Journal of Architecture and Building Science – 2000. – Vol. 115 (1456) – P. 1-4.

### 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

### Fomichev Valery Tarasovich

Volgograd state technical university, Volgograd, Russia  
E-mail: valerifomiche@yandex.ru

## Chemical aspects of the process of concrete cracks elimination with the help of bacteria

**Abstract.** The article describes the chemical processes of biogenesis of calcium carbonate for self-healing of concrete, taking into account four main factors: the concentration of calcium, the concentration of soluble inorganic carbon, the pH value, the presence of the crystallization center.

A number of bacteria that can be found in soil, sand and natural minerals have the ability to release calcium carbonate, both in natural and laboratory conditions.

In the laboratory, calcium lactate ( $\text{CaC}_6\text{H}_{10}\text{O}_6$ ) was used as a starting material for the formation of calcium carbonate. In addition, urea necessary for bacteria as a source of urease enzyme and yeast extract as a source of carbon and nitrogen were added. The resulting pH was brought to 9 to avoid possible chemical deposition of calcium carbonate.

To improve the production technology of biological concrete, specially selected bacteria of the genus *Bacillus* with a combination of nutrients were used to create a reducing agent in concrete. With the help of such self-healing concrete by means of bacteria, cracks more than 100  $\mu\text{m}$  wide can be compacted. With this approach, the bacteria in the alkaline medium convert  $\text{CO}_2$  into carbonate ions, which then interact with the Ca ions from the concrete matrix. This leads to the formation of calcium carbonate crystals. In addition,  $\text{CO}_2$  directly reacts with the calcium hydroxide matrix, which leads to the formation of calcite precipitate. The appearance of calcium carbonate crystals of large size with the participation of bacteria incorporated into the self-healing concrete provides an excellent ability to self-healing compared to traditional or developed environmentally unsafe self-healing cement materials. That is why this area of research is a promising alternative to environmentally hazardous methods of repair using cement.

**Keywords:** concrete; structures; bacteria; *S. Pasteurii*; *Bacillus pasteurii*; concentration; cracks

### REFERENCES

1. Rodriguez-Navarro C., Rodriguez-Gallego M., Ben Chekroun K., Gonzalez-Munoz M.T. (n.d.). Conservation of ornamental stone by *Myxococcus xanthus*-induced carbonate biomineralization. *Appl Environ Microbiol*, 69, pp. 2182-2193.
2. Knorre H., Krumbein W., Riding R.E., Awramik S.M. (2000). *Bacterial calcification. Microbial Sediments. Springer-Verlag*. Berlin, Germany, pp. 25-31.



3. Rivadeneyra M.A., Delgado R., Moral A. and etc. (1994). Precipitation of calcium carbonate by *Vibrio* spp. from an inland saltern. *FEMS Microbiol Ecol*, 13, pp. 197-204.
4. Hammes F., Verstraete W. (2002). Key roles of pH and calcium metabolism in microbial carbonate precipitation. *Re/Views Environ Sci Biotechnol Ecol*, 1, pp. 3-7.
5. Braissant O., Cailleau G., Dupraz C., Verrecchia E.P. (2003). Bacterially induced mineralization of calcium carbonate in terrestrial environments: the role of exopolysaccharides and amino acids. *J. Sediment Res*, 73, pp. 485-490.
6. Boquet E., Boronat A., Ramos-Cormenzana A. (1973). Production of calcite (calcium carbonate) crystals by soil bacteria is a general phenomenon. *Nature*, 246, pp. 527-529.
7. Fortina M.G., Manachini P.L. (1998). Production in seawater of thermostable alkaline protease by a halotolerant strain of *Bacillus licheniformis*. *Biotechnol Lett*, 20, pp. 565-568.
8. Douglas S., Beveridge T.J. (1998). Mineral formation by bacteria in natural microbial communities. *FEMS Microbiol Ecol*, 26, pp. 79-88.
9. Castanier S., Le Metayer-Levrel G., Perthuisot J.P. (1999). Ca-carbonates precipitation and limestone genesis – the microbiogeologist point of view. *Sediment Geol*, 126, pp. 9-23.
10. Rivadeneyra M.A., Delgado G., Ramos-Cormenzana A., Delgado R. (1998). Biomineralisation of carbonates by *Halomonas eurihalina* in solid and liquid media with different salinities: crystal formation sequence. *Res Microbiol*, 149, pp. 277-287.
11. Castanier S., Le Metayer-Levrel G., Perthuisot J.P. (1999). Ca-carbonates precipitation and limestone genesis – the microbiogeologist point of view. *Sediment Geol*, 126, pp. 9-23.
12. Hammes F., Verstraete W. (2002). Key roles of pH and calcium metabolism in microbial carbonate precipitation. *Re/Views Environ Sci Biotechnol*, 1, pp. 3-7.
13. Komokhov P.G., Sorokko R.L. (1985). Posledovatel'nyy sistemno-diskretnyy analiz obrazovaniya i razvitiya treshchin v tyazhelom betone. [*Sequential system-discrete analysis of the formation and development of cracks in heavy concrete.*] Ufa: NIIPromstroy, pp. 12-13.
14. Chernyshov E.M., Korotkikh D.N. (2008). Vysokotekhnologichnye vysokoprochnye betony: voprosy upravleniya ikh strukturouy. [*High-tech high-strength concrete: the management of their structure.*] pp. 616-620.
15. Chernyshov E.M., Artamonova O.V., Korotkikh D.N. and etc. (2008). Applications of nanochemistry in the technology of solid-phase building materials: the scientific and engineering problem, directions and examples of implementation. *Building materials*, 2, pp. 32-36. (in Russian).
16. Sheykin A.E. (1974). Struktura, prochnost' i treshchinostoykost' tsementnogo kamnya. [*Structure, strength and crack resistance of cement stone.*] Moscow: Stroyizdat, p. 192.
17. Korotkikh D.N., Artamonova O.V., Chernyshov E.M. (2009). On the requirements for nanomodifying additives for high-strength cement concretes. *Scientific Internet Journal*, 2, pp. 42-49. (in Russian).
18. 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).
19. 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).
  20. Maksimova I.N., Erofeev V.T., Makridin N.I., Polubarova Yu.V. (2015). Complex assessment of quality parameters of the structure and mechanics of destruction of cement stone. *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii. Building*, 3(675), pp. 14-22. (in Russian).
  21. Bobryshev A.N., Erofeev V.T. (2012). *Osnovy formirovaniya struktury kompozitsionnykh materialov. [Fundamentals of the formation of the structure of composite materials.]* Saransk: Mordovia University Press.
  22. Erofeev V.T., Merkulov I.I., Merkulov A.I., Erofeev P.S. (2006). *Optimizatsiya sostavov betonov s primeneniem chislennogo modelirovaniya. [Optimization of concrete compositions using numerical simulation.]* Saransk.
  23. Thao T.D.P. and etc. (2009). Implementation of self-healing in concrete – Proof of concept. *The IES Journal*, 2(2), pp. 116-125.
  24. Nishiwaki T. and etc. (2006). Development of self-healing system for concrete with selective heating around crack. *J. Adv Concr Technol*, 4(2), pp. 267-275.
  25. Van Tittelboom K. (2012). *Self-healing concrete through incorporation of encapsulated bacteria-or polymer-based healing agents.* Ghent: Ghent University, pp. 344.
  26. 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.
  27. 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.
  28. Joseph C., Jefferson A., Canoni M. (2007). *Issues relating to the autonomic healing of cementitious materials.* Noordwijk aan Zee, the Netherlands, p. 53.
  29. Mihashi H., Kaneko Y. (2000). Fundamental study on development of intelligent concrete with selfhealing capability for prevention of water leakage. *Journal of Architecture and Building Science*, 115(1456), pp. 1-4.