



CONSTRUCTION AND GEOTECHNICS

Т. 11, № 4, 2020

<http://vestnik.pstu.ru/arhit/about/inf/>



DOI: 10.15593/2224-9826/2020.4.05

УДК 691.32

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРИМЕНЕНИЯ САМОВОССТАНАВЛИВАЮЩЕГОСЯ БЕТОНА

Г.Г. Жукова, А.И. Сайфулина

Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Лысьва, Россия

О СТАТЬЕ

Получена: 26 сентября 2020

Принята: 09 ноября 2020

Опубликована: 30 декабря 2020

Ключевые слова:

биобетон, самовосстанавливающийся бетон, образование трещин, бактерии вида *Bacillus subtilis*, технология производства, стоимость самовосстанавливающегося бетона.

АННОТАЦИЯ

Бетон в настоящее время является основным искусственным конструкционным строительным материалом. Он воспринимает на себя экстремальные нагрузки, подвергается периодическим процессам замораживания и оттаивания, что сказывается на его целостности, как следствие – наблюдается процесс образования трещин. Перспективным решением для повышения эксплуатационных свойств бетонов является применение самовосстанавливающегося эластичного бетона, позволяющего улучшить прочностные характеристики бетонной конструкции и предотвратить процессы коррозии армирующих элементов. В статье рассмотрена технология производства самовосстанавливающегося бетона, указаны необходимые условия самовосстановления и определены особенности его применения. Также произведен расчет затрат на производство и рассчитан экономический эффект от базового варианта изготовления самовосстанавливающегося бетона, определена взаимосвязь между сроком службы и стоимостью с помощью корреляционного метода.

В результате работы подтверждено, что новая методика самовосстановления имеет перспективу внедрения и более эффективна в местах, где производство ремонтных работ и регулярный осмотр состояния сооружений в практическом отношении невозможны: подземное строительство, подводное строительство, высотные здания, транспортные сооружения мостового типа. Использование самовосстанавливающегося бетона обеспечивает сохранение несущей способности бетонных и железобетонных конструкций, что позволяет в значительной степени увеличить срок эксплуатации без повреждений и в равной же степени способствует снижению дополнительных материальных затрат на обслуживание объекта. Также выявлено, что биобетон с использованием бактерий *Bacillus subtilis* позволяет снизить уровень экологического загрязнения благодаря минимальным выбросам углекислого газа при изготовлении смеси.

© ПНИПУ

© Сайфулина Ангелина Ильсуровна – студентка, OrcidID: 0000-0003-1729-1230; e-mail: a.saifulina@inbox.ru.

Жукова Галина Георгиевна – старший преподаватель, e-mail: galinageorgievna2013@yandex.ru.

Angelina I. Saifulina – Student, OrcidID: 0000-0003-1729-1230; e-mail: a.saifulina@inbox.ru.

Galina G. Zhukova – Senior Lecturer, e-mail: galinageorgievna2013@yandex.ru.

RESEARCH ON THE USE OF SELF-HEALING CONCRETE

G.G. Zhukova, A.I. Saifulina

Perm National Research Polytechnic University, Lysva, Russian Russian Federation

ARTICLE INFO

Received: 26 September 2020

Accepted: 09 November 2020

Published: 30 December 2020

Keywords:

bio-concrete, self-healing concrete, crack formation, *Bacillus subtilis* bacteria, production technology, cost of self-healing concrete.

ABSTRACT

Concrete is currently the main man-made structural building material. It takes on extreme loads, undergoes periodic processes of freezing and thawing, which affects its integrity and, as a result, the process of cracking is observed. A promising direction of development in improving the performance properties of concrete is the use of self-healing elastic concrete, which allows increasing the strength characteristics of the concrete structure and preventing corrosion of the reinforcing elements. The article discusses the technology for the production of self-healing concrete, indicates the necessary conditions for self-healing and defines the features of its application. Also, the calculation of production costs was made and the economic effect from the basic version of the production of self-healing concrete was calculated, the relationship between the service life and cost was determined using the correlation method.

As a result of the work, it was confirmed that the new method of self-healing has the prospect of implementation and is more effective in places where the production of repair work, and regular inspection of the condition of structures, in practical terms, is impossible: underground construction, underwater construction, high-rise buildings, bridge-type transport structures. The use of self-healing concrete ensures the preservation of the bearing capacity of concrete and reinforced concrete structures, which significantly increases the service life without damage and equally helps to reduce additional material costs for maintaining the facility. The same research method revealed that bio-concrete with the use of *Bacillus subtilis* bacteria allows reducing the level of environmental pollution by minimizing hydrocarbon emissions during the preparation of the mixture.

© PNRPU

Введение

В современном строительстве актуален вопрос об увеличении срока эксплуатационной пригодности сооружений. Одним из направлений исследований, позволяющих решить данную проблему, является применение самовосстанавливающегося эластичного бетона. Технология самовосстановления позволяет добиться повышения прочностных характеристик бетонной конструкции, а также предотвращения коррозии армирующих элементов. Самовосстанавливающийся бетон обладает способностью к регенерации, что позволяет достигнуть повышенной устойчивости к трещинообразованию. Благодаря уникальным характеристикам передовой технологии исключается необходимость в использовании каких бы то ни было мер по ликвидации повреждений, что, в свою очередь, позволяет снизить дополнительные финансовые затраты на обслуживание объекта.

Основная часть

Самовосстанавливающийся бетон – это общее название разных современных разработок и инновационных решений, призванных изменить структуру материала и сделать его способным к восстановлению и стойким к различным воздействиям. Ввиду того что бетон сегодня является одним из наиболее востребованных материалов в ремонтно-строительной сфере, поиск новых методов производства актуален как никогда [1].

На сегодняшний день разработано множество различных способов для усовершенствования бетона, однако нерешенной остается такая проблема, как образование трещин

в теле бетонного камня. Проблема возникает из-за постоянного замораживания и оттаивания, экстремальных нагрузок и других воздействий окружающей среды. Поисками решений в данной области занималось множество исследователей, но наиболее высоких результатов добились голландские ученые (во главе с Хэнком Джонкерсом) из Дельфтского технологического университета и британские ученые из университета города Бат, которым удалось разработать новый класс бетона со способностью к самовосстановлению.

Существует ряд разработок в области самовосстанавливающегося бетона, эти исследования приведены в работах [2–8], ориентированы они на создание технологических приемов, позволяющих получить биобетон, который способен к самовосстановлению своей несущей способности в ходе использования. Из исследования ряда разработок можно выделить один более действенный способ создания самовосстанавливающегося бетона – это ввод в состав бетонной смеси микробактерий, которые в результате своей жизнедеятельности способствуют восстановлению целостности сооружения.

Приспособиться к сильнощелочной среде бетона смогли лишь редкие алкалофильные виды бактерий рода бацилл *Bacillus subtilis* (палочковидные бактерии, образующие внутриклеточные споры) [9, 10].

В ходе исследования выбранные бактерии показали лучшие результаты жизнеспособности: находясь в бетоне, они могут в течение долгих лет оставаться в своего рода «спящем» состоянии, начиная активизироваться только при попадании в них кислорода или воды [9, 10].

Выбор способа питания микроорганизмов устанавливался опытными исследованиями. В результате было определено, что оптимальным является использование лактата кальция. Данный материал служит одним из компонентов при производстве известняка [9]. Лактат кальция представляет собой кальциевую соль молочной кислоты, имеет белый цвет, легко растворяется в воде, его химическая формула $2(C_3H_5O_3)Ca$ [1, с. 288].

В случае неконтролируемого размножения микроорганизмов наблюдается обратный процесс – снижение прочностных свойств конструкции. В целях контроля численности бактерии вводят в спящее состояние, в котором они могут существовать до 200 лет. Хэнк Джонкерс сделал свой выбор в пользу палочковидных бактерий, в силу того что щелочная среда в бетоне имеет благоприятные условия для развития спор данных бактерий, также они могут жить в течение многих десятилетий без питания и кислорода [8].

Технология производства самовосстанавливающегося бетона заключается в следующем:

1. Лактат кальция вместе с бактериями помещается в биоразлагаемые капсулы диаметром 2–4 мм.

2. Капсулы вводятся в бетонный раствор с использованием химически активных веществ.

3. В нормальных условиях эксплуатации капсулы сохраняют свою целостность и бактерии находятся в анабиозе. При появлении микротрещин целостность капсул нарушается, к бактериям поступает вода, что выводит их из состояния сна и активизирует их жизнедеятельность.

4. На последнем этапе происходит стремительный рост численности популяции с поглощением лактата кальция. Продуктом жизнедеятельности бактерий является известняк. При росте количества бактерий происходит пропорциональный рост объемов выделяющегося известняка, заполняющего микротрещину [4, 9, 11].

Ученые внимательно изучили зависимость образования карбонатных соединений и пришли к выводу, что заполнение трещин продуктами жизнедеятельности бактерий происходит

по всему объему образца бетона. Для трещин шириной раскрытия 0,05–0,3 мм коэффициент заполнения составил 70–100 %. Однако, несмотря на достаточно равномерное образование метаболитов по всему объему образца, полное заполнение в основном осуществлялось для трещин не более 0,3 мм. Подобная биогенная обработка бетонной смеси также помогла снизить водопроницаемость за счет производства бактериями слоя кальцита, заполняющего поры [11, с. 103].

Бактерии вида *B. subtilis* не несут опасность и вред для человека, даже если они попадут организм, то будут во всех отношениях безвредны [8].

В результате анализа литературных источников установили, что для процесса самовосстановления необходимы следующие условия:

- Достаточные концентрации химических соединений, в основном соединений карбонат- и бикарбонат-ионов и растворенных свободных ионов кальция [4, 9].

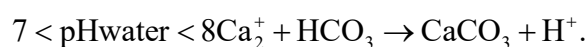
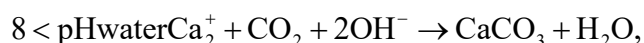
- Ширина трещины. Максимально допустимой является ширина трещины 150 мкм, однако наиболее эффективна технология при размерах до 50 мкм [12, 13].

- Кислород. Благодаря кислороду лактат кальция реконструируется в нерастворимый известняк, который затвердевает на поверхности трещин, как следствие, заполняя их [14, с. 42–49].

- Давление воды. Необходимо обеспечить определенный во времени контакт воды и капсул. При стремительном токе жидкости технология не будет эффективной [15, с. 1–8].

- Наличие воды [21].

Химические реакции, представляющие процесс самовосстановления:



Наблюдается реакция ионов кальция с гидрокарбонатом или диоксидом углерода. В результате образуется карбонат кальция, находящийся в растворенном состоянии. Ключевым параметром скорости кристаллизации является площадь контакта, выражающаяся в ее ширине, параметры воды не оказывают на процесс существенного влияния [16, с. 448–454].

На рис. 1 представлен процесс восстановления трещины.

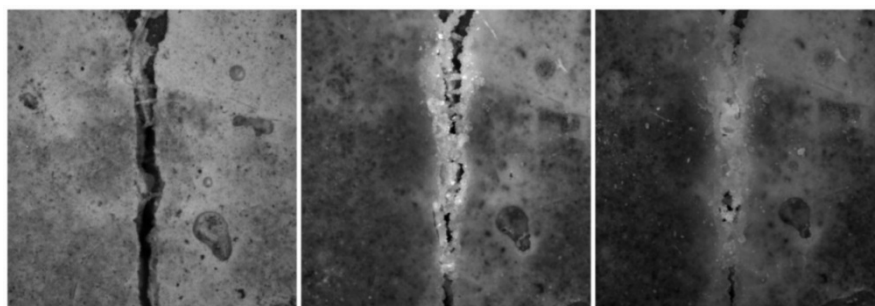


Рис. 1. Процесс восстановления трещины

Fig. 1. Crack repair process

Практические исследования. Ученые из Технологического университета Делфта (Delft University of Technology) во главе с Хэнком Джонкерсоном провели испытания биобетона (рис. 2), который самостоятельно восстанавливает трещины и повреждения с помощью бактерий. Для подтверждения теоретических данных был проведен ряд экспериментальных исследований [12, 16–18].

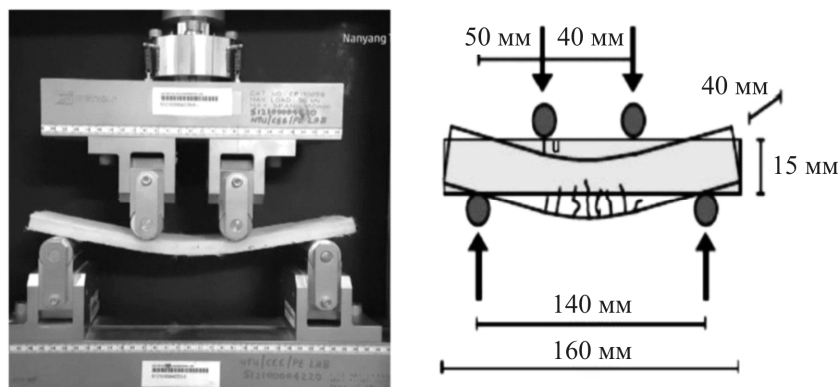


Рис. 2. Испытания образца
 Fig. 2. Sample Tests

Подвергаемый испытанию образец в ходе практических исследований не разрушился даже при достаточно больших изгибах, а после снятия нагрузки бетон начал процесс самовосстановления.

Вследствие экспериментальных исследований устанавливается перспектива использования данной технологии в промышленных масштабах, в связи с этим приводятся технико-экономические расчеты по определению стоимости биобетона (табл. 1).

Таблица 1

Стоимость материалов восстанавливающего средства для биобетона
 (разработано автором [5, с. 72–81])

Table 1

The cost of materials of a reducing agent for bio-concrete (developed by the author [5, p. 72–81])

Компоненты	Расход на 1 м ³ бетона, кг	Стоимость 1 кг компонента, руб.	Стоимость материала на 1 м ³ бетона, руб.
Пемза	56,93	0,35	20,45
Дрожжевой экстракт	116,67	0,098	863,21
<i>Vacillus subtilis</i>	0,93	7,39	278,43
Мочевина	9,33	32,45	301,82
Лактат кальция	9,33	166,76	1561,16
Итого			3025,75

Из представленных выше материалов определена стоимость добавок для бетона, придающих ему свойства самовосстановления. Итоговые затраты составляют 3025,75 на 1 м³ бетона [5, с. 72–81].

Экономический эффект. Исходя из себестоимости изготовления бетона рассчитан экономический эффект по формуле, представленной в СН509–78 «Инструкции по определению экономической эффективности использования в строительстве новой техники, изобретений и рационализаторских предложений»:

$$\mathcal{E} = [(Z_1 + Z_{c1})\varphi + \mathcal{E}_3 - (Z_2 + Z_{c2})]A, \quad (1)$$

где Z_1 и Z_2 – приведенные затраты на заводское изготовление конструкций; Z_{c1} и Z_{c2} – приведенные затраты на возведение конструкций на стройплощадке; φ – коэффициент измене-

ния срока службы новой строительной конструкции по сравнению с базовым вариантом; \mathcal{E}_3 – экономия в сфере эксплуатации конструкций за срок их службы; A – годовой объем строительно-монтажных работ с применением новых строительных конструкций в расчетном году, натуральные единицы.

Базовыми вариантами являются классические бетоны без использования предлагаемых добавок. Для сравниваемых вариантов затраты Z_{c1} и Z_{c2} равны нулю, так как производство происходит непосредственно на производстве и не требует дополнительных затрат на объекте строительства. Приведенные затраты Z_1 и Z_2 определялись на основании нормативных документов.

Коэффициент изменения срока представляется выражением

$$\varphi = \frac{P_1 + E_n}{P_2 + E_n}, \quad (2)$$

где P_1 и P_2 – доли сметной стоимости строительных изделий в расчете на 1 год их службы по сравниваемым вариантам; E_n – нормативный коэффициент перспективности капитальных вложений.

Для дальнейших расчетов необходимо определить коэффициент изменения срока службы:

$$\varphi = \frac{0,160}{0,156} = 1,03.$$

Таким образом, экономический эффект от внедрения 1 м³ биобетона

$$\mathcal{E} = 3852,73 \cdot 1,03 - 3794,63 = 173,68 \text{ руб.}$$

При этих обстоятельствах получен значительный экономический эффект от внедрения самовосстанавливающегося бетона.

Область применения самовосстанавливающегося бетона

Сравнение характеристик обычного и самовосстанавливающегося бетона приведено в табл. 2.

Таблица 2

Сравнение характеристик обычного и самовосстанавливающегося бетона

Table 2

Comparison of the characteristics of conventional and self-healing concrete

Характеристики	Обычный бетон	Самовосстанавливающийся бетон
Образование трещин	+	временно
Прочность при сжатии	B15	B25
Плотность бетона	≥2500 кг/м ³ и выше	≥1800 кг/м ³
Прочность при изгибе	B _{тб} 6.8	B _{тб} 8
Срок службы	≥100 лет	≥200 лет
Стоимость	3,325 руб.	6,350 руб.

Определим взаимосвязь между сроком службы и стоимостью с помощью корреляционного метода. Величина коэффициента корреляции определяется исходя из выражения

$$r_{xy} = \frac{\sum (x_i - x_{cp})(y_i - y_{cp})}{\sqrt{\sum (x_i - x_{cp})^2 \cdot \sum (y_i - y_{cp})^2}}, \quad (3)$$

где x – средняя прочность: для обычного бетона В15 – 196,5 кгс/см², для самовосстанавливающегося бетона В25 – 327,4 кгс/см²; y – стоимость обычного и самовосстанавливающегося бетона, руб.

$$r_{xy} = \frac{(196,5 - 261,95) \cdot (3325 - 4837,5) + (327,4 - 261,95) \cdot (6350 - 4837,5)}{\sqrt{(196,5 - 261,95)^2 + (327,4 - 261,95)^2 \cdot (3325 - 4837,5)^2 + (6350 - 4837,5)^2}} = 1.$$

Коэффициент корреляции равен 1, что говорит о строгой положительной взаимосвязи между двумя параметрами. Следует понимать, что при каждом изменении 1-й переменной происходит эквивалентное изменение 2-й переменной в том же направлении.

На рис. 3 изображена геометрическая интерпретация коэффициента корреляции.

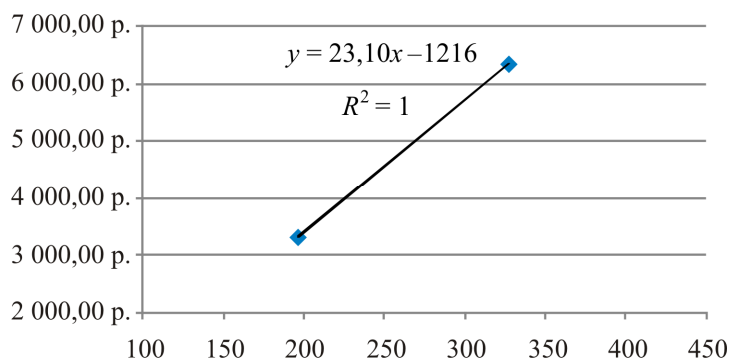


Рис. 3. Геометрическая интерпретация коэффициента корреляции
Fig. 3. Geometric interpretation of the correlation coefficient

Анализируя данные показатели самовосстанавливающегося и обычного бетона, можно сделать вывод, что новая методика имеет перспективу внедрения и более эффективна в эксплуатации. Ее применение необходимо в местах, где производство ремонтных работ и регулярный осмотр состояния сооружений практически невозможны: подземное строительство, подводное строительство, высотные здания, транспортные сооружения мостового типа.

Еще одно преимущество строительных материалов нового поколения – возможность экономии бюджетных средств, так как отсутствует необходимость в постоянном мелком ремонте сооружений. Регулярно выделяемые для этих целей деньги могут быть направлены на строительство новых объектов [10].

На данном этапе технология применения самовосстанавливающегося бетона имеет ряд недостатков:

- Современный технологический процесс самовосстановления бетона эффективен только на этапе возникновения в конструкции микротрещины, максимально допустимая ширина

150 мкм, предпочтительно 50 мкм [12, 13]. Только при данных условиях возможно устранить этот дефект [2, с. 25–28].

• Стоимость биобетона в значительной степени выше стоимости обычного, что уменьшает возможность массового использования при строительстве. Своевременное предотвращение трещин очень важно для любых зданий и сооружений. Необходимы разработки, позволяющие снизить себестоимость данного продукта.

Перед тем как повсеместно использовать рекомендуемый инновационный вид бетона, нужно провести подробное исследование долговременной износостойкости и стабильности применяемых бактерий в изменчивых условиях окружающей среды.

Заключение

В ходе работы были определены особенности применения самовосстанавливающихся бетонов, рассчитаны затраты на его использование и обоснованы его преимущества.

Применение самовосстанавливающегося бетона обеспечивает сохранение несущей способности бетонных и железобетонных конструкций через сохранение целостности конструкции при появлении микротрещин. В свою очередь это позволяет в значительной степени увеличить срок эксплуатации здания и снизить затраты на его обслуживание и ремонт.

Также определено, что биобетон с включением бактерий *Bacillus subtilis* способствует минимальному выбросу углекислого газа при производстве смеси и, как результат, снижению уровня экологического загрязнения.

Библиографический список

1. Кодзоев М.-Б.Х., Исаченко С.Л. Самовосстанавливающийся бетон [Электронный ресурс] // Научный журнал «Бюллетень науки и практики». 2018. – Т. 4, № 4. – С. 287–290. URL: <http://www.bulletennauki.com/kodzoev-isachenko-1> (дата обращения: 20.03.2020).
2. Абашкин Р.Е., Руднев М.О. Перспективы применения самовосстанавливающихся материалов // XI Международная науч.-практ. конф. «Современные инструментальные системы, информационные технологии и инновации»: сб. науч. тр. – 2014. – Т. 1. – С. 25–28.
3. Акарачкин С.А. Самовосстанавливающиеся материалы // Решетневские чтения 2014: материалы XVIII Междунар. науч. конф. – Красноярск, 2014. – С. 329–330.
4. Ерофеев В.Т., Аль Дулайми Салман Давуд Салман, Фомичев В.Т. Химические аспекты процесса устранения трещин бетона с помощью бактерий [Электронный ресурс] // Интернет-журнал «Транспортные сооружения». – 2018. – № 3. – URL: <https://t-s.today/PDF/13SATS318.pdf>. DOI: 10.15862/13SATS318 (дата обращения: 19.03.2020).
5. Аль Дулайми Салман Давуд Салман. Самовосстанавливающиеся бетоны, модифицированные микробиологической добавкой: дис. ... канд. техн. наук. – М., 2019. – 240 с.
6. Оценка перспектив применения самовосстанавливающихся материалов и технологий на их основе / Н.Н. Ситников, И.А. Хабибуллина, В.И. Мащенко, Р.Н. Ризаханов // Перспективные материалы. – 2018. – № 2. – С. 5–16. DOI: 10.30791/1028-978X-2018-2-5-16.
7. Ткач Е.В., Семенов В.С., Ткач С.А. Высокоэффективные модифицированные гидрофобизированные бетоны с улучшенными физико-техническими свойствами // Бетон и желе-

зобетон – взгляд в будущее: науч. тр. III Всерос. конф. по бетону и железобетону. – 2014. – Т. 5. – С. 113–123.

8. ФУНДАМЕНТАЛЬНО.РФ: сайт. – URL: <http://xn--80aakf5adeeck4bfm6j.xn-p1ai/news/jelastichnyj-beton.html> (дата обращения: 15.03.2020).

9. Голландский микробиолог разработал самовосстанавливающийся бетон: сайт. – URL: <https://geektimes.ru/post/250502/> (дата обращения: 15.03.2020).

10. Самовосстанавливающийся бетон: сайт. – URL: <https://building-tech.org/samovosstanavlivaushhij-sja-beton/> (дата обращения: 20.03.2020).

11. Колчина Т.О. Биобетон – новое поколение самовосстанавливающихся бетонов // Безопасный и комфортный город: Всерос. науч.-практ. конф. – Орел, 2018. – С. 102–105.

12. Йоханнессон М.Б., Гейкер М. Обзор: самовосстановление в вяжущих веществах и композитах // Строительные материалы. – 2012. – № 28. – С. 57–583.

13. Ян Е.Н. Придание дополнительных свойств цементным смесям: сайт. – URL: <https://docslide.net/documents/university-of-michigan-construction-engineering-management.htm> (дата обращения: 20.03.2020).

14. Чернышов Е.М. О требованиях к наномодифицирующим добавкам для высокопрочных цементных бетонов [Электронный ресурс] // Нанотехнологии в строительстве: науч. интернет-журнал. – М., 2009. – № 2. – С. 42–49. URL: <http://www.nanobuid.ru> (дата обращения: 18.04.2020).

15. Self-Healing of Concrete Cracks by Ceramsite-Loaded Microorganisms / Jing Xu, Xianzhi Wang, Junqing Zuo, Xiaoyan Liu // *Advances in Materials Science and Engineering*. – P. 1–8.

16. Эдвардсен С. Водопроницаемость и автогенное заживление трещин в бетоне // Журнал материалов. – 1996. – № 4. – С. 448–454.

17. Ли Ю.Ю., Бакстон Г.А., Балаш А.С. Использование наночастиц для создания композитов // Журнал химической физики. – 2004. – № 11. – С. 5531–5540.

18. Ян Ю., Урбан М. Химические и физические аспекты самовосстанавливающихся материалов // Прогресс в полимерной науке. – 2015. – С. 34–59.

19. Бекас Г.Д., Цирка К., Балтзис Д. Материалы для самолечения: обзор достижений в области материалов, оценка, характеристика и методы мониторинга // Композиты. – 2016. – Ч. В. – № 87. – С. 92–119.

20. Де Роой, Тайтлбум К., Бели Н.Д. Самовосстановление в цементных материалах. – 2013. – 279 с.

21. Mechtcherine V. Application of superabsorbent polymers in concrete construction // RILEM State of the Art Reports 2. Springer. – 2012.

22. Шок Д., Тайтбум К.В., Степирейт С. Самовосстанавливающиеся вяжущие материалы с добавлением микроволокна и сверхабсорбирующих полимеров // Журнал интеллектуальных материальных систем и структур. – 2014. – Т. 25. – С. 13–24.

References

Kodzoev M.-B.Kh., Isachenko S.L. Samovosstanavlivaushchiisia beton [Self-healing concrete]. *Nauchnyi zhurnal biulleten' nauki i praktiki*, 2018, vol. 4, no. 4, pp. 287–290, available at: <http://www.bulletennauki.com/kodzoev-isachenko-1/>. (accessed 15 March 2020).

Abashkin R.E., Rudnev M.O. Perspektivy primeneniia samovosstanavlivaushchikh materialov [Prospects for the use of self-healing materials]. *Sbornik nauchnykh trudov XI-oi Mezhduna-*

rodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii «Sovremennye instrumental'nye sistemy, informatsionnye tekhnologii i innovatsii», 2014, vol. 1, pp. 25–28.

Akarachkin S.A. Samovosstanavlivaiushchiesia materialy [Self-healing materials]. *Materialy XVIII Mezhdunarodnoi nauchnoi konferentsii «Reshetnevskie chteniia 2014»*, 2014, pp. 329–330.

Erofeev V.T., Al' Dulaimi Salman Davud Salman, Fomichev V.T. Khimicheskie aspekty protsessa ustraneniia treshchin betona s pomoshch'iu bakterii [Chemical aspects of the process of eliminating cracks in concrete using bacteria]. *Internet-zhurnal «Transportnye sooruzheniia»*, 2018, no. 3, available at: <https://t-s.today/PDF/13SATS318.pdf>. DOI: 10.15862/13SATS318 (accessed 19 March 2020).

Al' Dulaimi Salman Davud Salman. Samovosstanavlivaiushchiesia betony, modifitsirovannye mikrobiologicheskoi dobavkoi [Self-healing concrete modified with microbiological additive]. Ph.D. thesis. Moscow, 2019, 240 p.

Sitnikov N.N., Khabibullina I.A., Mashchenko V.I., Rizakhanov R.N. Otsenka perspektiv primeneniia samovosstanavlivaiushchikhsia materialov i tekhnologii na ikh osnove [Assessment of the prospects for the use of self-healing materials and technologies based on them]. *Perspektivnye materialy*, 2018, no. 2, pp. 5–16. DOI: 10.30791/1028-978X-2018-2-5-16.

Tkach E.V., Semenov V.S., Tkach S.A. Vysokoeffektivnye modifitsirovannye gidrofobizirovannye betony s uluchshennymi fiziko-tekhnicheskimi svoistvami [Highly effective modified hydrophobized concrete with improved physical and technical properties]. *Beton i zhelezobeton – vzgliad v budushchee: nauchnye trudy III Vserossiisk. konf. po betonu i zhelezobetonu*, 2014, vol. 5, pp. 113–123.

FUNDAMENTALNO.RF, available at: <http://xn--80aakf5adeeck4bfm6j.xn-p1ai/news/jelastichnyj-beton.html> (accessed 15 March 2020).

Gollandskii mikrobiolog razrabotal samovosstanavlivaiushchiisia beton [Dutch microbiologist develops self-healing concrete], available at: <https://geektimes.ru/post/250502/> (accessed 15 March 2020).

Samovosstanavlivaiushchiisia beton [Self-healing concrete], available at: <https://building-tech.org/samovosstanavlivajushhijsja-beton/> (accessed 20 March 2020).

Kolchina T.O. Biobeton – novoe pokolenie samovosstanavlivaiu-shchikhsia betonov [Bioconcrete – a new generation of self-healing concrete]. *Vserossiiskaia nauchno-prakticheskaiia konferentsiia «Bezopasnyi i komfortnyi gorod»*, 2018, pp. 102–105.

Iokhannesson M.B., Geiker M. Obzor: samovosstanovlenie v viazhushchikh veshchestvakh i kompozitakh [Review: self-healing in binders and composites]. *Stroitel'nye materialy*, 2012, no. 28, pp. 57–583.

Ian E.H. Pridanie dopolnitel'nykh svoistv tsementnym smesiam [Giving additional properties to cement mixtures], available at: <https://docslide.net/documents/university-of-michigan-construction-engineering-management.htm> (accessed 20 March 2020).

Chernyshov E.M. O trebovaniakh k nanomodifitsiruiushchim dobavkam dlia vysokoprochnykh tsementnykh betonov [On the requirements for nanomodifying additives for high-strength cement concretes]. *Nanotekhnologii v stroitel'stve: nauch. Internet-zhurnal*, 2009, no. 2, pp. 42–49, available at: <http://www.nanobuid.ru> (accessed 18 March 2020)

Jing Xu, Xianzhi Wang, Junqing Zuo, Xiaoyan Liu. Self-healing of concrete cracks by ceramsite-loaded microorganisms. *Advances in Materials Science and Engineering*, pp. 1–8.

Edvardsen S. Vodopronitsaemost' i avtogennoe zazhivlenie treshchin v betone [Water permeability and autogenous crack healing in concrete]. *Zhurnal materialov*, 1996, no. 4, pp. 448–454.

Li Iu.Iu, Bakston, G.A. Balash, A.S. Ispol'zovanie nanochastits dlia sozdaniia kompozitov [Using nanoparticles to create composites]. *Zhurnal khimicheskoi fiziki*, 2004, no. 11, pp. 5531–5540.

Ian Iu., Urban M. Khimicheskie i fizicheskie aspekty samovossta-navlivaiushchikhsia materialov [Chemical and physical aspects of self-healing materials]. *Progress v polimernoii nauke*, 2015, pp. 34–59.

Bekas G.D., Tsirka K., Baltzis D. Materialy dlia samolecheniia: obzor dostizhenii v oblasti materialov, otsenka, kharakteristika i metody monitoring [Self-healing materials: overview of advances in materials, assessment, characterization and monitoring methods]. *Kompozity*. Part B, 2016, no. 87, pp. 92–119.

De Rooi, Taitlbum K., Beli N.D. Samovosstanovlenie v tsement-nykh materialakh [Self-healing in cementitious materials]. 2013, 279 p.

Mechtcherine V. Application of superabsorbent polymers in concrete construction. RILEM State of the Art Reports 2. Springer. 2012.

Shok D., Taitlbum K.V., Stepirait S. Samovosstanavlivaiushchiesia viazhushchie materialy s dobavleniem mikrovolokna i sverkhabsorbiruiushchikh polimerov [Self-healing binders with added microfibers and superabsorbent polymers]. *Zhurnal intellektual'nykh material'nykh sistem i struktur*, 2014, vol. 25, pp. 13–24.