

УДК 624.011, 579.66

Биобетон как антропогенная биокосная система. Обзор

Чмыхало В.К.^{1,2}, Золотухин П.В.^{1,2}, Гунасекаран М.³, Чистяков В.А.¹

¹ *Академия биологии и биотехнологии им. Д.И. Ивановского, Южный федеральный университет, Ростов-на-Дону, Россия, vkchtykhalo@icloud.com*

² *ООО «Биомедицинские инновации», Ростов-на-Дону, Россия*

³ *Санкт-Петербургский политехнический университет имени Петра Великого (СПбПУ), Санкт-Петербург, Россия*

DOI:10.18522/2308-9709-2022-41-3

Аннотация:

Бетон как наиболее популярный материал, использующийся при строительстве, не лишен недостатков, напрямую связанных с его применением. Одним из таких недостатков является процесс растрескивания железобетонных конструкций, ведущий к снижению ожидаемого срока эксплуатации и дополнительным расходам на ремонт и восстановление. Однако существуют сорта бетона, способные к восстановлению и самообновлению. Данная способность реализуется за счет активности, обитающих в толще бетона бактерий. Стремление к имитации естественных самовосстанавливающихся структур ведет к созданию искусственных или антропогенных форм биокосного вещества. Примером этого процесса является разработка и внедрение самовосстанавливающихся бетонных смесей с использованием биологических компонентов, как например бактерий или их метаболитов.

Данный обзор рассматривает механизмы бактериально-опосредованных процессов восстановления кальцита, методики введения живых организмов в бетонную матрицу, а также основные проблемы и ограничения, препятствующие широкому использованию биобетонов.

Ключевые слова: биобетон; биокосное вещество; самообновляемые материалы; биовосстановление кальцита

Bioconcrete – anthropogenic bioinert substance

Chmykhalo V.K.^{1,2}, Zolotukhin P.V.^{1,2}, Gunasekaran M.³, Chistyakov V.A.¹

¹ *Academy of Biology and Biotechnology, Southern Federal University, Rostov-on-Don, Russia, vkchmykhalo@icloud.com*

² *Biomedical Innovation LLC, Rostov-on-Don, Russia*

² *Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University (SPbPU), St. Peterburg, Russia,*

DOI: 10.18522/2308-9709-2022-41-3

Annotation:

Concrete, as the most popular material used in construction, is not without drawbacks directly related to its use. One of these is the process of cracking of reinforced concrete structures, leading to a decrease in the expected service life and additional costs for repairs and restoration. However, there are varieties of concrete that are capable of restoration and self-renewal. This ability is realized due to the activity of bacteria living in the thickness of concrete. The desire to imitate natural self-healing structures leads to the creation of artificial or anthropogenic forms of bioinert matter. An example of this process is the development and implementation of

self-healing concrete mixes using biological components such as bacteria or their metabolites. This review considers the mechanisms of bacterial-mediated calcite reduction processes, methods for introducing living organisms into the concrete matrix, as well as the main problems and limitations that prevent the widespread use of bioconcretes.

Keywords: bioconcrete; bioinert substance; self-renewable material; calcite bioreduction

Введение

Биокосным веществом, согласно В.И. Вернадскому, называют один из типов веществ биосферы, образованный совместно живыми организмами и косными процессами и представляющий структуру из живого и косного вещества. Естественными биокосными веществами считают почву, ил, нефть, битумы, сапрпель и воду из различных водоемов. Однако в современном мире, где человеческая деятельность проникла во все природные оболочки планеты Земля и за ее пределы, образуются новые, антропогенные формы биокосного вещества. Примером таких композитных материалов может считаться самовосстанавливающийся бетон, или так называемый биобетон. В качестве неорганического или косного вещества здесь выступают цементные композиты, которые могут отличаться гравиметрическими, химическими и другими показателями, а живое вещество – бактериями и их спорами, однако могут использоваться и метаболиты живых организмов.

Бетон является главным строительным материалом, используемым в строительстве зданий повсеместно и для самых разных нужд. Согласно данным сайта глобальной ассоциации цемента и бетона (GCCA), в 2020 году мировой объем бетона составлял 14 млрд м³ (<https://gccassociation.org>). Ежегодное

мировое производство основного компонента – цемента – с 1995 года выросло с 1,39 млрд т до 4,4 млрд т, из которых 2,5 млрд т произведено в Китае (www.statista.com). Мировой оборот совместно бетона и цемента оценивается в 440 млрд долларов. Прогнозы предполагают, что к 2050 году численность населения Земли достигнет 9,8 млрд, из которых 68% будут жить в городах, поэтому потребность в бетоне также возрастет (<https://gccassociation.org>). В свою очередь, это подразумевает развитие и внедрение технологий, способствующих повышению качества и долговечности бетона и сооружений на его основе.

Также бетон популярен ввиду высокой прочности на сжатие (Ahmed et al., 2021), но одновременно обладает низкой прочностью на растяжение, что неизбежно ведет к образованию трещин. Причиной может быть внешняя нагрузка, наложенная деформация, объемное изменение, вызванное усадкой или изменением температуры, погрешность проектирования и детализации, химические реакции в ходе эксплуатации (Ruparová et al., 2021; Seifan et al., 2016). Арматурные стержни оказывают положительное влияние на сужение ширины трещин, контролируя пластическую усадку (Seifan et al., 2016), однако не предотвращают их появления (Ahmed et al., 2021; Seifan et al., 2016). Трещины угрожают долговечности бетонных конструкций, приводя к проникновению жидкостей и газов в матрицу, вызывая ее износ и/или коррозию встроенной стальной арматуры (Ahmed et al., 2021). Прямые затраты на ремонт и техническое обслуживание трещин оцениваются, например в США, в 147 долларов за м³ бетона, при себестоимости производства бетона от 65 до 80 долларов за м³. Поэтому превентивные подходы к сдерживанию и прекращению образования трещин на ранней стадии имеют решающее значение. Активные методы самовосстановления, один из которых основан на микробной генерации карбоната кальция, действуют независимо от внешних условий и обладают способностью немедленно активироваться при

образовании трещины с последующей герметизацией как внутренних, так и внешних повреждений. В противовес этим методам, пассивная обработка герметиками воздействует только на внешние повреждения. Минусами герметиков так же является их плохая атмосферостойкость, чувствительность к влаге, низкая термостойкость, неустойчивость, плохое сцепление с бетоном, склонность к деградации и расслаиванию со временем, а также другие последствия разницы в коэффициентах теплового расширения по сравнению с бетоном (Seifan et al., 2016). В обзорной статье Amran и соавторов рассматривается использование микроорганизмов как один из источников будущих технологий самовосстанавливающегося бетона (Ahmed et al., 2021).

Роль бактерий регенерации бетона

В биосфере бактерии функционируют как геохимические агенты, способствуя дисперсии, фракционированию и/или концентрации материалов (Ghosh et al., 2013), они способны производить широкий спектр минералов, таких как карбонаты, сульфиды, силикаты и фосфаты (Seifan et al., 2016). Бактериальная клеточная стенка имеет анионную природу, поэтому различные металлсодержащие отложения (например, кальцит) естественно возникают на клеточной поверхности (Sarkar et al., 2019) в результате метаболической активности микроорганизмов (Ghosh et al., 2013). Карбонат кальция является превосходным наполнителем для бетона благодаря высокой совместимости с вяжущими составами и может быть осажден посредством биологически индуцированного процесса минерализации в присутствии источника кальция (Seifan et al., 2016), которым в случае бетона является оксид кальция (Рис. 1).

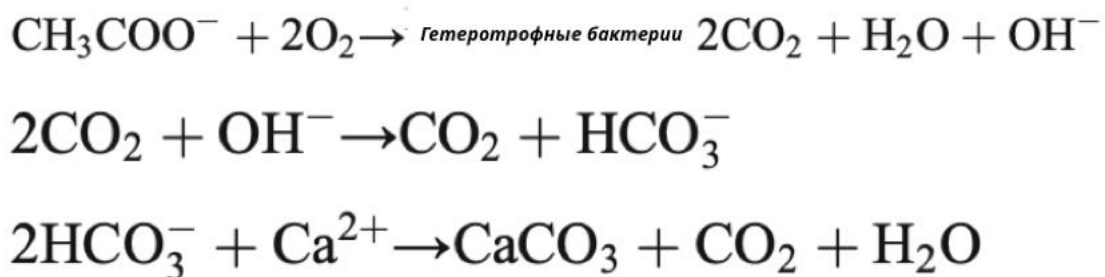


Рисунок 1 – Синтез кальцита с участием гидрокарбоната, полученного в результате бактериального метаболизма ацетата

Эти отложения на клеточной поверхности в итоге закупоривают поры и таким образом заполняют трещины (Sarkar et al., 2019). Автотрофный путь производства карбоната фотосинтезирующими бактериями может использоваться только в тех областях, где бетонная конструкция подвергается воздействию углекислого газа и света. Гетеротрофный метод лишен таких ограничений. Микробные сообщества образуют кристаллы в результате их роста в различных природных естественных средах. Гетеротрофный рост таких видов бактерий, как *Bacillus*, *Arthrobacter* и *Rhodococcus*, на солях органических кислот (ацетат, лактат, цитрат, сукцинат, оксалат, малат и глиоксилат) приводит к образованию карбонатных минералов. Эти бактерии используют органические соединения в качестве источника энергии и наличие органической кислоты как единственного источника углерода и энергии является наиболее значительным преимуществом этого пути (Seifan et al., 2016).

Bacillus sphaericus и *Bacillus pasteurii* способны продуцировать биоминералы посредством метаболической реакции в присутствии источника кальция (Рис. 2).

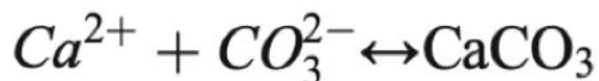


Рисунок 2 – Метаболические пути получения кальцита за счет карбонат- и гидрокарбонат анионов

Эти уреазоположительные микроорганизмы участвуют в азотном цикле и могут продуцировать карбонат, который взаимодействует с кальцием, не только в результате дыхания, но и путем гидролиза мочевины. За счет уреазной активности в присутствии бактерий в результате гидролиза мочевины образуется 1 моль карбаминовой кислоты (NH_2COOH) на 1 моль аммиака (NH_3) (Рис. 3) (Seifan et., 2016).



Рисунок 3 – Синтез карбаминовой кислоты с помощью микроорганизмов

Реакция гидроксид-иона (который уже образовался в результате реакции воды и аммиака) и угольной кислоты приводит к образованию карбоната (CO_3^{2-}) (Рис. 4).

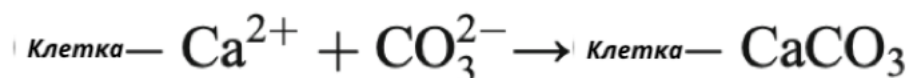
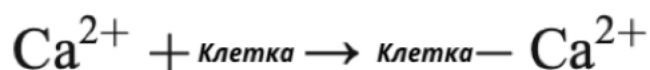
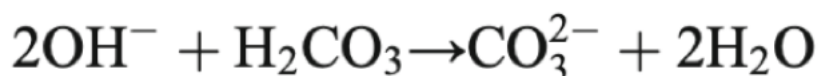
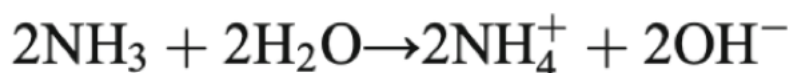


Рисунок 4 – Синтез кальцита на поверхности бактериальных клеток

Положительно заряженные ионы кальция, как уже упоминалось выше, могут связываться с отрицательно заряженной бактериальной клеткой, которая служит в этом случае центром кристаллизации.

Для завершения реакции ион кальция может быть получен либо из внутренних источников, доступных в структуре цемента, либо добавлением химических веществ, таких как хлорид кальция, нитрат кальция или лактат кальция извне (Seifan et al., 2016).

Использование хлорида кальция в качестве источника может вызвать разрушение арматурных стержней. Таким образом, рекомендуется применение нитрата кальция или лактата кальция. Осаждение кристаллов карбоната кальция *B. sphaericus* и *B. subtilis* имеет некоторые недостатки. Образование ионов аммония (NH_4^+) за счет уреолитической активности приводит к выбросу оксидов азота в атмосферу. Подсчитано, что для восстановления поверхности бетона в 1 м^2 требуется 1 л раствора с концентрацией мочевины 10 г/л, что дает 4,7 г азота (DeCuypere, Loutz, 1992). Это количество составляет около одной трети азота, производимого каждым человеком каждый день. Кроме того, присутствие избыточного количества аммония в бетонной матрице увеличивает

риск повреждения солями в результате превращения в азотную кислоту. Необходима оптимизация содержания мочевины для предотвращения чрезмерного выброса аммония.

Способы внедрения регенерирующих компонентов в структуру бетона

Заживляющий агент (бактерии и питательные вещества) может быть введен в бетонную матрицу через сосудистую сеть или может быть непосредственно замешан во время приготовления бетона. Сосудистая техника подает заживляющий агент извне конструкции с использованием распределенных сосудистых сетей, которые уже встроены в матрицу во время приготовления бетона. Метод сосудистой сети представляется непрактичным из-за ряда недостатков. Во-первых, заживляющий агент должен иметь постоянную вязкость на протяжении всего срока службы бетона, чтобы облегчить его текучесть, а также предотвратить утечку в условиях окружающей среды. Во-вторых, трудно равномерно распределить сосуды по всей структуре. В-третьих, введение сосудистой системы в бетон может уменьшить сцепление между элементами бетонной композиции и привести к расслаиванию. Бактерии и питательные вещества логичнее внедрять непосредственно в бетонную матрицу во время приготовления и заливки бетона. В этом процессе лечебные составы ресуспендируются в воде, а затем смесь добавляется к цементу и песку. Алкалофильные бактерии, такие как виды рода *Bacillus*, могут переносить экстремальные условия при формировании бетона; поэтому они являются наиболее привлекательными видами для биосамовосстанавливающегося бетона (Seifan et al., 2016). Так, например, обработка бетона с помощью почвенных изолятов, родственных согласно молекулярно-генетическому анализу *B. cohnii*, повышает сопротивление сжатию материала до 15 %. Регенерация

микротрещин в таком обработанном бетоне реализуется за счет формирования карбонатно-кальциевых отложений в результате деятельности бактерий (Sumathi et al., 2020). Схожие результаты были достигнуты и при добавлении культуры клеток *Pseudomonas* (Shukla et al., 2022). Исследования показывают, что бактерии рода *Bacillus* с толстыми мембранами могут выживать без питательных веществ в течение сотен лет. Спящие эндоспоры способны противостоять изменениям окружающей среды или химическим веществам, а также ультрафиолетовому излучению и механическим воздействиям (Seifan et al., 2016).

Однако прямое включение микроорганизмов в строительные материалы, такие как бетон, резко влияет на активность микробного метаболизма. Высокий pH (>11) и сухость бетона делают бактерий уязвимыми для гибели. Количество жизнеспособных клеток в образце бетона исследовали в возрасте твердения 9, 22, 42 и 153 дня. Через 22 и 42 суток оно резко снижалось на 80 и 90% соответственно. Эти результаты показывают, что клетки бактерий могут сохранять жизнеспособность до 4 месяцев (135 дней) в бетонной структуре. Следовательно, чтобы помочь бактериям оставаться жизнеспособными в экстремальных условиях в течение более длительного периода, необходимо включение иммобилизованных спорообразующих бактерий (Seifan et al., 2016).

Инкапсулирование восстанавливающего агента в трубчатые или шаровидные капсулы способствует увеличению жизнеспособности бактерий. Микрокапсулы противостоят механическим воздействиям в процессе приготовления бетона. Процесс заживления начнется, когда капсула разорвется при образовании трещины. Приготовление капсулы и смешивание с заполнителем, а также пустое пространство, остающееся после активации капсулы, являются серьезными проблемами техники инкапсуляции. Рекомендуется использование капсул, которые со временем становятся хрупкими. Эффективность капсулирования строго зависит от размера капсул,

их свойств и распределения по матрице бетона. Таким образом, иммобилизация бактерий в гидрогель, силикагель, цеолит, керамзит, гранулированный активированный уголь и метакаолин может устранить недостатки инкапсуляции. Набухший гидрогель может обеспечить дополнительную подачу воды для повышения эффективности осаждения карбоната кальция для заполнения трещины шириной до 0,5 мм. Защита бактерий и водорослей с помощью силикагелей так же сохраняет их ферментативную активность (Seifan et al., 2016).

Тем не менее, метод бактериального осаждения карбоната не лишен недостатков. По сравнению с химическими методами микробный процесс идет медленнее. Этот метод более сложен, микробная активность зависит от факторов окружающей среды, включая температуру, pH, концентрации и скорость распространения питательных веществ и метаболитов и т. д. (Dhami et al., 2013). Именно поэтому активность основных мировых конкурентов по разработке и производству биобетона сфокусирована на задачах, связанных с защитой бактериального компонента от изменений окружающей среды, поиском новых субстратов для поддержки бактериального метаболизма и повышением эффективности образования кристаллов в микротрещинах. Сотрудники Израильского технологического института в ходе работы доказали, что реакция уреолитиза при низком уровне или отсутствии кислорода идет плохо из-за аэробной природы уреолитических микробов. Следовательно, данный способ трудно применим для обеспечения сохранности глубинных бетонных конструкций (Jain et al., 2021). Осаждение карбоната кальция происходит в условиях повышенного pH, создаваемого выработкой аммиака в ходе гидролиза мочевины. Однако при повышении pH (>12,5) возникает потенциальная угроза для роста бактерий. Кроме того, образование аммиака в качестве конечного продукта является проблемой из-за его токсичности для почвы, растений и водоемов, что естественно вызывает дополнительные затраты на его удаление

или поиск способов повторного использования аммиака (Dhami et al., 2013). Для преодоления неблагоприятных условий, связанных с высоким рН-среды и повышения выживаемости, сотрудники факультета гражданского и экологического проектирования школы горного дела и технологий (США) использовали технику иммобилизации бактерий на преполимере гидрофильного полиуретана, состоящего на 97% из патентованного преполимера NYROL 2000 и 3% диизоционата толуола (Bang et al., 2010). Преследуя эту же цель, Факультет естественных наук и техники Университета Уаикато (Новая Зеландия) предложил иммобилизацию бактерий на магнитных наночастицах оксида железа (Seifan et al., 2019). В лабораторных условиях обеим лабораториям удалось добиться повышения выживаемости организмов и повышения прочности бетона, однако в промышленных масштабах данные способы являются довольно трудоемкими и дорогостоящими.

Использование очищенных химреактивов в качестве источников питательных веществ для бактерий также ограничивает реализацию технологии в промышленных масштабах. Для решения данной проблемы кафедра биотехнологии Университета Тапар (Индия) предложила в качестве метаболитов для бактерий кукурузный сироп и лактозу, восстановленную из молочной сыворотки (Achal et al., 2009). Департамент искусственной среды Национального университета Сингапура совместно с раствором микроорганизмов (*Bacillus subtilis* и молочнокислые бактерии) добавляли в бетон летучую золу как источник оксидов кремния и алюминия. Добавки увеличили прочность на сжатие и устойчивость к кислотной атаке на 35,1% по сравнению с контрольным образцом. При этом выброс углекислого газа по сравнению с традиционным цементом был ниже на 49,3% (Huseien et al., 2022). Технологический институт Р. Н. Г. Пателя (Индия) испытал в качестве наполнителя для бетона творог и куриный помет, которые выступили донорами молочной кислоты, карбоната кальция и фосфата кальция (Vishal et al., 2020).

Идея использования навоза, как донора минеральных веществ разрабатывалась и другими институтами. Университет материально-технического обеспечения Народной вооруженной полиции (Китай) использовал в работе золу навоза крупного рогатого скота различного размера, и частицы размером <3 мкм и >65 мкм способствовали в итоге повышению прочности бетона на сжатие (Zhou et al., 2019). Ученые Департамента гражданского строительства Сагарского института науки, Бхопал (Индия), использовали золу конского навоза (ЗКН). Максимальная прочность на сжатие и прочность на изгиб через 28 суток обнаружена при замене цемента до 5 % и песка до 10 % на ЗКН в бетонной смеси (Sahu, Tiwari, 2018). Специалисты департамента гражданского и структурного строительства Энатур (Индия) также доказали увеличение прочности бетона на сжатие путем замены доли цемента (10%) на золу коровьего навоза (Vasu, 2019). Однако в вышеназванных исследованиях была слабо использована бактериальная составляющая, что не позволило получить действительно прорывных результатов.

Специалисты Факультета технологии гражданского строительства (Малайзия) предложили использовать высушенный осадок сточных вод вместо доли цемента с целью утилизации данных отходов. Использование 5% ОСВ (источник оксидов железа, кремния, фосфора, алюминия, кальция) в качестве замены цемента в бетоне привело к хорошей прочности на сжатие по сравнению с контрольными образцами (Amminudin et al., 2020).

Но решенный, казалось бы, вопрос с метаболитами упирается в главную проблему биоминерализации бетона: использование чистых бактериальных культур в промышленных масштабах требует колоссальных объёмов культивирования (Zhu et al., 2016). Минимальный эффективный объем *Bacillus subtilis* в бетоне должен достигать минимум 1% (Vishal et al., 2020). Оптимальный объем эффективных микроорганизмов – 10% (Huseien et al., 2022). Ясно, что без существенного повышения экономической эффективности

получения улучшающих бетон биопрепаратов их внедрение будет под вопросом. Недостатком большинства исследований по биобетону, проводимых в мире, является использование стандартных технологий получения биопрепаратов, включающих такие энергозатратные элементы как лиофилизация. Сульфатредуцирующие бактерии и бактерии утилизирующие органические кислоты не так распространены в природе, как например, фотосинтезирующие организмы, такие как цианобактерии и водоросли. Кафедра биотехнологии Университета Тапар (Индия) осветила способность последних к осаждению карбонатов и заживлению бетонных трещин, но только в условиях постоянного доступа солнечного света, что делает эти клеточные культуры бесполезными для глубоких конструкций (Dhami et al., 2013).

В качестве альтернативы чистым культурам Центр управления водными ресурсами Университета Квинсленда (Австралия) предложил использовать гранулированный ил, содержащий в составе, сульфатредуцирующие бактерии. Снижение производства биогенной серной кислоты в ходе экспериментов привело к повышенной стойкости канализационных систем к коррозии (Song et al., 2021). Технологии самовосстанавливающихся строительных материалов также могут использовать и бесклеточные системы. Так, успешное применение микрокапсулированного подсолнечного масла как регенерирующего агента в составе асфальта продемонстрировали Abadeen et al (2022).

Описаны в литературе также попытки использовать для улучшения качества бетона навоз и силос, которые являются одними из ведущих источников неорганических кислот, таких как щавелевая, муравьиная, дубильная, молочная и уксусная кислоты. Эти кислоты растворяются в бетонных структурах и смягчают процесс схватывания. Однако образующая избыточная углекислота представляет опасность для бетонных и стальных конструкций из-за перехода к более высоким значениям кислотности. Основной недостаток исследований по введению в бетон сложных природных

смесей – это отсутствие в исследовательских программах современной биологической составляющей, которая позволила бы выявить компоненты микробного сообщества, ухудшающие качество конечного продукта (Maraveas, 2020).

Заключение

Одним из наиболее мощных современных трендов всего комплекса созданных человечеством технологий является усиление их биологической составляющей. Элементы биотехнологии комплексно внедряются в оргсинтез, энергетику, водоподготовку, переработку отходов (причем не только органических), а также во множество других направлений. Такое продвижение не было бы успешным без последовательного приближения к решению проблемы сопряжения живых и неживых элементов для повышения эффективности гибридных технологий. Эта сложная и многоплановая проблема разрешается по принципу постепенного продвижения (именно благодаря своей сложности и многоплановости). Активность научного сообщества концентрируется на отдельных ее элементах, обеспечивая последовательное приближение к решению. При этом частные успехи обеспечивают прогресс в отдельных отраслях наукоемких технологий. Эти принципы также применимы и в отношении создания новых строительных материалов, которые отличаются регенеративными свойствами и могут быть использованы в широчайшем диапазоне объектов строительства. Введение живого компонента в бетонную матрицу делает его биокосной системой с интереснейшими в практическом плане свойствами. Как было отмечено выше, существует значительное количество вариантов биобетонных конструкций, и их дальнейшее внедрение позволит решить проблему снижения срока эксплуатации бетонных конструкций. Кроме этого, перечисленные вопросы выбора, введения живого компонента и

поддержания для него комфортных условий не являются непреодолимыми, однако все-таки требуют к себе внимания. Суммируя вышесказанное, исследования в направлении самовосстанавливающихся бетонных смесей являются перспективными в фундаментальном плане и, в то же время, обладают высоким прикладным потенциалом для отечественной строительной отрасли.

Список источников

1. Abadeen A.Z.U., Hussain A., Kumar V.S. [et al.]. Comprehensive Self-Healing Evaluation of Asphalt Concrete Containing Encapsulated Rejuvenator // *Materials*, 2022. Vol.15(10). P. 3672. doi: 10.3390/ma15103672.
2. Achal V., Mukherjee A., Basu P.C., Reddy M.S. Lactose mother liquor as an alternative nutrient source for microbial concrete production by *Sporosarcina pasteurii* // *J Ind Microbiol Biotechnol.*, 2009. Vol. 36(3). P.433–438. doi: 10.1007/s10295-008-0514-7. PMID: 19107535.
3. Ahmed S.O., Nasser A.A., Abbas R.N., [et al.]. Production of bioconcrete with improved durability properties using Alkaliphilic Egyptian bacteria // *3 Biotech.*, 2021. Vol.11(5). P.231. doi: 10.1007/s13205-021-02781-0. PMID: 33968575.
4. Amminudin A.L., Ramadhansyah P.J., Doh S.I., [et al.]. Effect of Dried Sewage Sludge on Compressive Strength of Concrete // *IOP Conf. Ser.:Mater. Sci. Anna.*, 2020. Vol. 712. P. 012–042. doi: 10.1088/1757-899X/712/1/012042.
5. Amran M., Onaizi A.M., Fediuk R. [et al.]. Self-Healing Concrete as a Prospective Construction Material: A Review // *Materials*, 2022. Vol. 15 (9). P. 3214. doi: 10.3390/ma15093214.

6. Bang S.S., Lippert J.J., Yerra U., [et al.]. Microbial calcite, a bio-based smart nanomaterial in concrete remediation // *International Journal of Smart and Nano Materials*, 2010. Vol.1(1). P.28-39. doi: 10.1080/19475411003593451.
7. DeCuyper K., Loutz S. Les caractéristiques des eaux usées domestiques // *Tri-bune Cebedeau.*, 1992. Vol. 45(560). P.7–19.
8. Dhama N.K., Reddy M.S., Mukherjee A. Biomineralization of calcium carbonates and their engineered applications: a review // *Front Microbiol.*, 2013. Vol. 4. P.314. doi: 10.3389/fmicb.2013.00314. PMID: 24194735.
9. Ghosh P., Mandal S., Pal S., [et al.]. Development of bioconcrete material using an enrichment culture of novel thermophilic anaerobic bacteria // *Indian J Exp Biol.*, 2006. Vol. 44(4). P. 336-339. PMID: 16629379.
10. Huseien G.F., Saleh A.T., Ghoshal S.K. Effective Microorganism Solution and High Volume of Fly Ash Blended Sustainable Bio-Concrete // *Biomimetics (Basel)*, 2022. Vol. 7(2). P.65. doi: 10.3390/biomimetics7020065. PMID: 35645192.
11. Jain S., Fang C., Achal V. A critical review on microbial carbonate precipitation via denitrification process in building materials // *Bioengineered.*, 2021. Vol. 12(1). P.7529–7551. doi: 10.1080/21655979.2021.1979862. PMID: 34652267.
12. Maraveas C. Durability Issues and Corrosion of Structural Materials and Systems in Farm Environment // *Appl. Sci.*, 2020. Vol. 10(3). P. 990. doi: 10.3390/app10030990.
13. Ryparová P., Prošek Z., Hana Schreiberová H. [et al.]. The role of bacterially induced calcite precipitation in self-healing of cement paste // *Journal of Building Engineering.*, 2021. Vol.39. P.102299. doi: 10.1016/j.job.2021.102299.
14. Sahu R., Tiwari A. Implementation of Unprocessed Dried Horse Manure Ash in Sustainable Concrete // *Indian Journal of Science and Technology*, 2018. Vol. 11(19). P. 1–8. doi: 10.17485/ijst/2018/v11i19/122630.

15. Sarkar A., Chatterjee A., Mandal S., Chattopadhyay B. An alkaliphilic bacterium BKH4 of Bakreshwar hot spring pertinent to bioconcrete technology // *J Appl Microbiol.*, 2019. Vol.126(6). P.1742–1750. doi: 10.1111/jam.14236. PMID: 30817048.
16. Seifan M., Samani A.K., Berenjian A. Bioconcrete: next generation of self-healing concrete // *Appl Microbiol Biotechnol.*, 2016. Vol.100(6). P. 2591–2602. doi: 10.1007/s00253-016-7316-z. PMID: 26825821.
17. Seifan M., Ebrahimezhad A., Ghasemi Y., Berenjian A. Microbial calcium carbonate precipitation with high affinity to fill the concrete pore space: nanobiotechnological approach // *Bioprocess Biosyst Eng.*, 2019. Vol.42(1). P.37–46. doi: 10.1007/s00449-018-2011-3. PMID: 30229327.
18. Shukla A., Gupta N., Dixit S., [et al.]. Effects of Various Pseudomonas Bacteria Concentrations on the Strength and Durability Characteristics of Concrete // *Buildings.*, 2022. Vol.12. 993. doi: 10.3390/buildings12070993.
19. Song Y., Chetty K., Garbe U., [et al.]. A novel granular sludge-based and highly corrosion-resistant bio-concrete in sewers // *Sci Total Environ.*, 2021. Vol.791. P.148270. doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.148270. PMID: 34119799.
20. Sumathi A., Murali G., Gowdhaman D., [et al.]. Development of bacterium for crack healing and improving properties of concrete under wet–dry and full-wet curing // *Sustainability (Switzerland)*, 2020. Vol.12 (24). P. 1–20. doi: 10.3390/su122410346.
21. Vasu K. Experimental Investigation on Partial Replacement of Cement with Cow Dung Ash // *IJARIIIE*, 2019. Vol.5. P.18–27.
22. Vishal R., Dipesh S., Pankaj S., [et al.]. Bacteria Based Self-Healing of Concrete Using Curd & Chicken Manure // *IJIRSET*, 2020. Vol.9(6). P.4760–4766.
23. Zhou S., Zhang S., Shen J., Guo W. Effect of cattle manure ash's particle size on compression strength of concrete // *Case Studies in Construction Materials*, 2019. Vol.10. e00215. doi.org/10.1016/j.cscm.2018.e00215.

24. Zhu T., Dittrich M. Carbonate Precipitation through Microbial Activities in Natural Environment, and Their Potential in Biotechnology: A Review // *Front Bioeng Biotechnol.*, 2016. Vol.4. P.4. doi: 10.3389/fbioe.2016.00004. PMID: 26835451.

25. Electronic resource of the Global Cement and Concrete Association: date of access 28.08.2022. access point – <https://gccassociation.org>

26. Statista electronic resource: date of access 08/28/2022. access point – <https://www.statista.com/statistics/1087115/global-cement-production-volume/>