УДК 691.535, 620.22

# СОСТАВ ПРОПИТОЧНОГО РАСТВОРА ДЛЯ БАКТЕРИАЛЬНОЙ БИОМИНЕРАЛИЗАЦИИ И ОСОБЕННОСТИ ЕГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ С КОМПОНЕНТАМИ ЦЕМЕНТНОЙ СИСТЕМЫ

Духанина У.Н., Балицкий Д.А., Строкова В.В., Есина А.Ю., Кузнецова А.А.

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова,
308012, г. Белгород, ул. Костюкова, 46,
Duhanina777@yandex.ru

**Аннотация.** Строительные материалы и изделия подвергаются различным видам коррозии, развитие которой сопряжено с большим числом переменных факторов, протекающих в сложной взаимосвязи. Скорость и характер протекания коррозионных процессов зависит от проницаемости бетонных изделий. Миграция агрессивных веществ в теле бетонной матрицы в результате транспортных механизмов (фильтрация, капиллярный перенос, диффузия) приводит к изменению пористости и, как следствие, физико-механических свойств материалов. Интенсивность транспортных процессов обуславливается с одной стороны внутренними параметрами (природой и составом вяжущего и иных компонентов цементной и бетонной системы, размерами заполнителей и пор), с другой, внешними параметрами (состоянием и степенью однородности поверхности изделия, наличием защитных покрытий, пропиток, изоляции и др.). В свою очередь установлено, что микробно-индуцированное осаждение кальцита способствует повышению и/или пролонгации резистентности материалов к воздействию внешних агрессивных факторов.

Для оптимизации процесса нанесения пропиточного биоцементирующего состава высказана гипотеза о возможности введения бактериального инокулята и прекурсоров в состав эмульсии. В качестве базового состава предложено использование полисилоксановой эмульсии на основе водорастворимого полимера, предназначенной для гидрофобизации поверхности цементобетонных изделий, в виду ее биопозитивности за счет отсутствия в ее составе летучих органических веществ в качестве растворителя гидрофобизирующей смолы. Для установления влияния отдельных компонентов и технологических особенностей получения эмульсии на продуцирующую способность бактерий, проведена оценка влияния на них кремнийорганической жидкости ГКЖ-94, поливинилового спирта (ПВС), температуры и интенсивности диспергирования (эмульгирования).

**Предмет исследования:** влияние компонентов полисилоксаной эмульсии на бактериальную жизнедеятельность *B. pumilus*.

**Материалы и методы:** обоснование путей возможных технологических решений и их реализации при подборе состава пропиточного раствора, применяемого для бактериальной минерализации в цементной системе совместно с компонентами полисилоксановой эмульсии.

**Результаты:** зафиксировано отсутствие губительного воздействия как ПВС, так и ГКЖ на бактерии *B. pumilus.* Нагрев раствора ПВС с бактериальным инокулятом до 80° С привело к споруляции более 80% бактерий. Установлено, что высокоскоростное диспергирование вызывает повреждение клеток, отмечается споруляция бактерий до $1{,}3 \cdot 10^6$ КОЕ/мл против начального значения $2 \cdot 10^8$ КОЕ/мл.

**Выводы:** анализ влияния отдельных компонентов и технологических операций получения эмульсии на сохранность жизнеспособности бактериальных клеток подтвердила перспективность высказанной гипотезы.

**Ключевые слова:** бактерии, инкапсуляция, эмульсия, бактериальная биоминерализация, бетон.

## ВВЕДЕНИЕ

Изделия на основе цемента являются наиболее широко используемыми строительными материалами благодаря их уникальным преимуществам, таким как физико-механические свойства, простота отливки в различные формы, низкая себестоимость и повышенная долговечность. Однако, наряду с вышеперечисленными преимуществами бетонные конструкции в процессе эксплуатации могут подвергаться различным видам коррозии. В результате фильтрации, капиллярного переноса или диффузии из окружающей среды в тело бетона и/или вынос вещества из бетона в окружающую среду происходит коррозия строительных конструкций, что в свою очередь приводит к увеличению пористости и снижению механических свойств строительных изделий. Таким образом, коррозия бетонных конструкций является результатом различных абиотических и биотических процессов [1].

В настоящее время для обработки поверхности строительных изделий широко используются различные защитные составы/покрытия и методы нанесения на поверхности для обеспечения качественной защиты. В виду того, что существуют некоторые недостатки, такие как разные коэффициенты теплового расширения защитного слоя и нижележащего слоя, деградация защитного слоя с течением времени и постоянный уход за ним [2].

Гигроскопичность и кислотонеустойчивость бетонов способствуют заселению их микроорганизмами и дальнейшей биокоррозии. Причинами биодеградации строительных материалов являются три основных процесса: механический, ассимиляционный (строительные материалы являются источником питания и энергии для микроорганизмов) и диссимиляционный (взаимодействие строительных материалов с агрессивными метаболитами микроорганизмов). Воздействие микроорганизмов на бетонные конструкции можно классифицировать по их влиянию на цементную матрицу, а также по

появлению дефектов и росту трещин. Это дополняется химическим действием микробных метаболитов, приводящим к изменению физико-химических свойств бетонных материалов и ускоряющим процесс разрушения [3].

Воздействие микроорганизмов на бетон приводит к увеличению пористости бетона, появлению трещин, сколов и других повреждений, что в конечном итоге значительно снижает срок службы этого материала. Благоприятными условиями для роста микробов на бетонных поверхностях являются повышенная влажность (от 60% до 98%), длительные циклы увлажнения и высыхания, замораживания и оттаивания, высокая концентрация углекислого газа, высокая концентрация $Cl^-$ или $SO_4^{2-}$ ионы и кислоты, продуцируемые микроорганизмами [4]. Основными деструкторами являются не только бактерии, но и микромицеты, синтезирующие широкий спектр органических кислот, которые могут быть чрезвычайно агрессивны по отношению к бетону [5].

## АНАЛИЗ ПУБЛИКАЦИЙ

Рядом авторов описано применение технологии микробно-индуцированного осаждения кальцита как метода вторичной защиты памятников архитектуры. Так образующаяся плотная биоминерализованная пленка на поверхности мрамора формируется с помощью технологии MICP как методом погружения, так и сплошным нанесением пропиточных растворов, что приводит к повышению долговечности. Аналогичные характеристики наблюдаются в образцах известняка, обработанных бактериями *Bacillus sphaericus* при оптимальной дозировке мочевины и источника кальция, что и для образцов, обработанных этилсиликатами, наряду со снижением водопоглощения и устойчивостью к ультразвуку [1]. Таким образом, поверхностная обработка природного камня по технологии микробно-индуцированного осаждения кальцита приводит к кольматации кристаллическими новообразованиями пор строительных и отделочных материалов и, как следствие, изменению физических свойств.

Несмотря на большое разнообразие существующих методов и технологических решений восстановления бетонных изделий при формировании различного рода микродефектов и трещин, одним из достаточно новых, но перспективных направлений является применение карбонатной биоминерализации. Бактериальное осаждение карбоната кальция в цементной матрице приводит к уплотнению порового пространства и заполнению новообразованиями трещин, что, соответственно, приводит к восстановлению структуры цементного камня и исходных физико-механических свойств бетонных изделий. Однако, в процессе гидратации цемента повышается pH, изменяется объем цементного камня за счет усадки при твердении или набухании за счет поглощения воды из окружающей среды. Данные процессы влияют на ферментативную активность и жизнедеятельность карбонатогенных бактериальных культур, а, следовательно, и на эффективность биоминерализации. Согласно, исследованиям зарубежных и отечественных авторов по залечиванию микротрещин в бетонах с целью защиты микроорганизмов применяют технологии иммобилизации: инкапсулирование и абсорбирование. Абсорбирование осуществляется пористыми по своей структуре материалами за счет внутренней диффузии бактериальных клеток от поверхности вглубь заполнителя по порам различного размера [1].

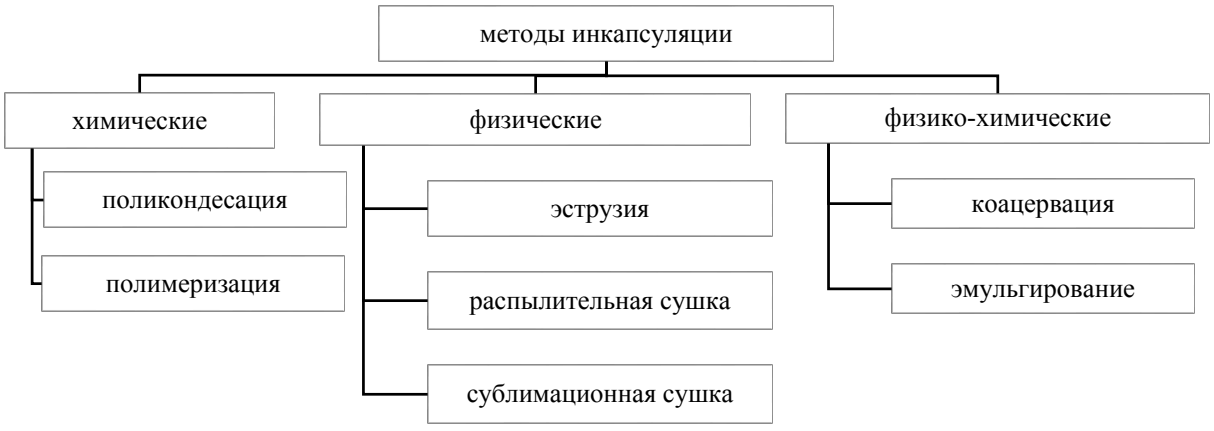



**Рис. 1.** Методы инкапсулирования бактерий с последующим введением в бетон
**Fig. 1.** Methods for encapsulating bacteria with subsequent introduction into concrete

Технология инкапсулирования получила широкое распространение в различных областях промышленности, в том числе и в производстве строительных материалов. Существующие технологии инкапсуляции микроорганизмов используют в качестве капсул биосовместимые нереакционноспособные материалы. Выбор материала для капсулирующей матрицы зависит от

назначения, способа и факторов высвобождения содержимого. Содержимое капсул может высвобождаться путем механического разрушения оболочки под действием деформаций цементобетонов (капсулы из стекла, форполимеров), а также при воздействии физических факторов: расплавление при повышении температуры и растворении при диффузии влаги из окружающей среды и повышении уровня pH (пленочные покрытия, стабилизированные эмульсии, гидрофильные матрицы) [6].

Наиболее применимыми методами инкапсуляции бактерий с последующим введением в бетон являются экструзия, сушка распыление и эмульгирование (рисунок 1).

**Полимеризация.** При полимеризации используемый для капсулирования хитозан модифицировали метакриловым альдегидом. 20 г/л хитозана растворяли в растворе уксусной кислоты (2 мас./об.%) при механическом перемешивании при комнатной температуре в течение 8 ч. После полного растворения pH смеси доводили до 5 добавлением 5 М раствора NaOH. Смешивание хитозана и метакрилового альдегида осуществлялось в течение 3 ч с последующей лиофилизацией. Заключительным этапом полимеризации являлось растворение модифицированного хитозана в водном растворе уксусной кислоты с нагреванием на водной бане при температуре 35 °C с добавлением бактерий *Bacillus sphaericus* [7, 8].

**Экструзия.** При инкапсуляции методом экструзии через сопла формующих устройств под давлением капсулируемый материал подается в стабилизирующий раствор [9]. Смешанные бактерии *Bacillus sphaericus* с альгинатом натрия, подаются с помощью перистальтического насоса в раствор $Ca(NO_3)_2$ для отверждения. Полученные капсулы осаждаются гравитационным методом и промываются дистиллированной водой [10].

В другом исследовании споры *Bacillus sphaericus* суспендировали до гомогенной суспензии в 200 мл 2% раствора альгината натрия и с помощью перистальтического насоса при 120 об/мин через иглу шприца диаметром 6 мм подавали в 2% раствор $CaCl_2$. Твердение капсул осуществлялось при комнатной температуре 30 мин. Образовавшиеся капсулы промывали стерильной дистиллированной водой, сушили на чистой бумаге до полного высыхания и затем хранили в эксикаторе [11].

Метод распылительной сушки. Входящий воздух нагревался до 105 °C после прохождения через вентилятор. Перистальтический насос доставлял смешанные споры *Bacillus sphaericus* с 2% раствором альгината натрия в распылитель жидкости из нержавеющей стали. Температуру воздуха на выходе поддерживали до 73 °C, регулируя скорость потока подаваемого раствора и скорость аспирации на 10% и 100%. Высушенные капсулы хранились в плотно закрытом эксикаторе [11].

Метод сублимационной сушки. Перед сублимацией суспензию спор в 2% растворе альгината натрия замораживали при температуре – 46 °C в жидком этаноле, а затем смешанный раствор лиофилизировали в течение 24 часов в лабораторной сублимационной сушилке при температуре ниже 0 °C и давлении в камере 0,05 мбар (5 Па). Высушенные инкапсуляты измельчались и хранились в эксикаторе [11].

**Коацервация и эмульгирование**. Метод коацервации построен на концепции использования полифосфата в качестве добавки к цементу. Бионеорганический полимер является распространенным компонентом всех бактерий. Микрочастицы полифосфата кальция готовили путем добавления 2,8 г $CaCl_2 \times 2H_2O$ растворяли в 25 мл дистиллированной воды и добавляли к 1 г Na-polyP в 25 мл дистиллированной воды при комнатной температуре при pH 10. После перемешивания образовывались микрочастицы, которые собирали фильтрованием, промывали этанолом и сушили. Микрочастицы имели размер ≈160–250 нм в диаметре [12]. Далее путем эмульгирования инкапсулировали питательные компоненты для биоминерализации. Для этого 10 г поливинилового спирта (ПВС) растворяли в 100 мл дистиллированной воды при 90 °C при перемешивании в течение 3 часов. Этот раствор добавляли к 200 мл парафинового масла с 10% Tween-80 с последующим введением 10 мл раствора $CaCl_2$. После перемешивания частицы получали осаждением. Образовавшиеся сферы лиофилизировали при 80°C. Для получения биополифункциональной добавки PolyP почвенные бактерии суспендировались в 1,0 мл 0,85% раствора NaCl, центрифугировались и с последующим экстрагированием. При оценке взаимодействия «инокулят *Escherichia coli* – эмульсионная система» и «добавки PolyP – эмульсионная система» отмечалась конверсия коацервата на поверхности цементного камня [13].

Таким образом, на основании анализа научной литературы предложена гипотеза о взаимном биопозитивном влиянии компонентов гидрофобизирующего пропиточного раствора с биоминерализующим, включающим в свой состав бактериальные культуры.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

**Бактериальные культуры.** В качестве бактериальной культуры, вызывающей гетерогенную нуклеацию кристаллов карбоната кальция в цементных системах, использована *Bacillus pumilus* (VKM B-23) Всероссийской коллекции микроорганизмов (ВКМ) Института биохимии и физиологии микроорганизмов им. Г.К. Скрябина Российской академии наук (ИБФМ РАН). Выбор основан на способности бактерий продуцировать уреазу, возможности

спорообразования, отсутствие патогенности, токсичности, авирулентености.

**Прекурсоры, участвующие в преципитации новообразований, и среды для культивирования микроорганизмов.** С целью стимуляции уреазной ферментативной активности бактерий и продуцирования кристаллов карбоната кальция применялись следующие прекурсоры: $CaCl_2$ «ЧДА» производства ЗАО «Вектон», $CH_4N_2$ «ЧДА» производства ООО ПО «УфаХимПроект».

Питательной средой для роста бактериальных культур являлся раствор, имеющий в своем составе: пептон для бактериологических питательных сред сухой производства ООО НИЦФ, г. Санкт-Петербург; D-глюкозу ($C_6H_{12}O_6$) производства ЗАО «Вектон».

**Компонентный состав гидрофобизирующей эмульсии.** В роли дисперсной фазы выступает кремнийорганическая жидкость ГКЖ-94 производства ООО «Химпродукт» (г. Люберцы), а в качестве дисперсионной среды поливиниловый спирт (ПВС) марки SUNDY PVA 088-05 производства SINOPEC SICHUAN VINYLON WORKS (Китай).

**Условия подготовки компонентов пропиточного раствора:**

1. Для получения накопительных культур и оценки жизнеспособности бактериальные микроорганизмы инкубировались в жидкой питательной среде пептона с добавлением глюкозы.

2. $CaCl_2$ растворялся в дистиллированной воде и подвергался стерилизации методом автоклавирования при температуре 120 °С в течение 20 мин. Гранулированную мочевину стерилизовали в сухожаровом шкафу при температуре 100° С в течение 20 мин с последующим растворением в дистиллированной воде с $CaCl_2$. Компонентный состав кристаллизационного раствора представлен в таблице 1.

**Таблица 1.** Компонентный состав кристаллизационного раствора
**Table 1.** Component composition of the crystallization solution

| Наименование бактерий | Количественное содержание в составе кристаллизационного раствора, г/л | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | Дистиллированная вода, л | Питательные компоненты, г | | Прекурсоры, г | |
| | | Пептон | Глюкоза | $CH_4N_2O$ | $CaCl_2$ |
| *B. pumilus* | 1 | 30 | 10 | 20 | 20 |

***Методы оценки взаимного влияния компонентов пропиточного раствора.*** Определение взаимного влияния бактерий и компонентов эмульсии осуществлялось с помощью инвертированного микроскопа МИБ-Р с фотофиксацией. Для проведения измерений каплю помещали на предметное стекло и накрывали покровным стеклом, предварительно обезжирив их ацетоном.

***Методика получения полисилоксановой эмульсии.*** Полисилоксановая эмульсия готовится путем высокоскоростного перемешивания при помощи лабораторного смесителя Silverson серии L5, где в качестве рабочей насадки используется сито для эмульгирования. Для приготовления дисперсной фазы, включающей в себя ПВС, к смесителю дополнительно был собран лабораторный комплекс, состоящий из следующих элементов: нагревающего термостата-циркулятора Huber MPC-202C для поддержания температуры, двухшприцевого инфузионного насоса Dixion Instilar 1428 для дозирования дисперсионной среды, TDS-метра, и стакана-рубашки, используемого в качестве емкости для приготовления. Такой комплекс позволяет приготавливать эмульсии с требуемой концентрацией дисперсной фазы, что обеспечивает оптимальный состав, требуемой дисперсности, без применения каких-либо поверхностно-активных веществ (ПАВ), что повышает биопозитивность состава.

**Таблица 2.** Компонентный состав полисилоксановой эмульсии
**Table 2.** Component composition of polysiloxane emulsion

| Наименование компонента | Количественное содержание в составе |
|---|---|
| Дистиллированная вода, мл | 315 |
| Поливиниловый спирт (ПВС), г | 35 |
| Кремнийорганическая жидкость ГКЖ-94, г | 150 |

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ АНАЛИЗ

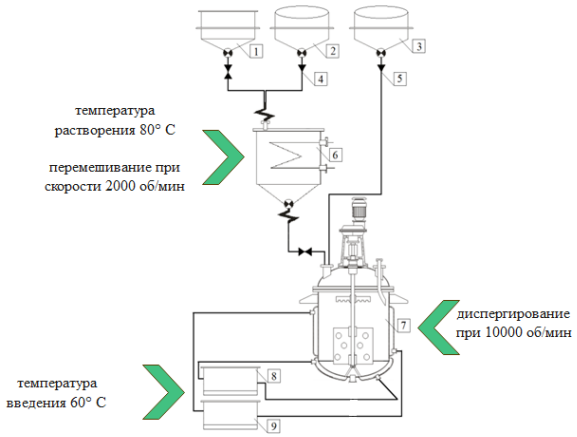
**Этапы технологии приготовления силоксановой эмульсии.** С целью максимальной реализации природоподобных технологий в строительном материаловедении для вторичной защиты эксплуатируемых бетонных конструкций необходимо сформировать новые функционально-технологические свойства. Данные технологические решения могут достигаться путем подбора оптимальных пропиточных составов гидрофобизирующих эмульсий, включающих карбонатогенные бактериальные культуры. Предполагается, что компоненты силоксановой эмульсии будут выполнять роль защитного покрытия для бактериальных культур в процессе инициации кристаллизации на поверхности и внутри цементного камня.

Технологию приготовления силоксановой эмульсии можно разбить на следующие последовательные этапы [14]:

I – приготовление раствора ПВС. Гранулированный ПВС добавляется в дистиллированную воду с дальнейшим перемешиванием при температуре 80° С на магнитной мешалке при скорости 2100 об/мин. Раствор охлаждают до комнатной температуры.

II – введение раствора ПВС в раствор ГКЖ-94. В раствор ГКЖ-94 на скорости 10000 об/мин двухшприцевым инфузионным насосом Dixion Instilar 1428 вводится раствор ПВС со скоростью 250 мл/час в стакан-рубашку, подключенный к термостату. Эмульгирование осуществляется до полного введения раствора ПВС при температуре не более 60°С до постоянства мутности.

Для подтверждения целесообразности применения технологии производства полисилоксановой эмульсии проведена оценка влияния компонентов системы (кремнийорганической жидкости ГКЖ-94, поливинилового спирта (ПВС) и физических факторов технологических этапов (температура, перемешивание, диспергирование) на жизнеспособность бактерий (рисунок 2).




1 – расходный бункер ПВС, 2 – емкость с водой, 3 – емкость с ГКЖ, 4 – насос с расходомером, 5 –дозировочный насос, 6 – реактор для синтеза водного раствора ПВС, 7 – смеситель, 8, 9 – термостат



Лабораторный комплекс: лабораторный смеситель Silverson серии L5 с термостатом-циркулятором Huber MPC-202C и двухшприцевым инфузионным насосом Dixion Instilar 1428

**Рис. 2.** Технологическая схема и общий вид лабораторного комплекса для получения полисилоксановых эмульсий
**Fig. 2.** Technological scheme and general view of the laboratory complex for the production of polysiloxane emulsions

**Оценка влияния компонентов силоксановой эмульсии и технологических этапов ее приготовления на жизнеспособность бактериальных культур.** Анализировалось влияние каждой технологической операции и концентрации бактериального инокулята и компонентов пропиточного биоцементирующего состава.

С целью оценки жизнеспособности бактерий, участвующих в процессе индукции карбоната кальция в строительных материалах, исследована культура рода B. pumilus как наиболее продуцирующая кристаллические новообразования и проявляющая устойчивость к физическим факторам окружающей среды. Для определения рациональной концентрации раствора бактериального инокулята с прекурсорами, его количество составляло 10% и 100% замещения дистиллированной воды, с последующим добавлением гранулированной формы ПВС (таблица 3).

**Таблица 3.** Компонентный состав пропитки
**Table 3.** Component composition of the impregnation

| Наименование компонента | Количественное содержание в составе | | | |
|---|---|---|---|---|
| | 1 | 2 | 3 | 4 |
| Бактериальный инокулят *B. pumilus* с прекурсорами, мл | 31,5 | 315 | 31,5 | 315 |
| Дистиллированная вода, мл | 283,5 | – | 283,5 | – |
| Поливиниловый спирт (ПВС), г | 35 | 35 | – | – |
| кремнийорганическая жидкость ГКЖ–94, г | – | – | 150 | 150 |

В ходе оценки влияния компонентов эмульсии зафиксировано отсутствие губительного воздействия как ПВС, так и ГКЖ на бактерии *B. pumilus.*

С целью выявления термических условий влияния на жизнедеятельность бактерий нагревание раствора ПВС осуществлялось до 80° С. Установлено, что высокотемпературное воздействие при скорости перемешивания привело к споруляции более 85% бактерий для состава с полной заменой дистиллированной воды. Оценка жизнеспособности культур при добавлении 10% бактериального инокулята без перемешивания вызвала затруднение количественного подсчета в виду агрегации микроорганизмов (рисунок 3).

Установлено, что высокоскоростное диспергирование вызывает повреждение клеток, отмечается споруляция бактерий до $1{,}3\times10^6$ КОЕ/мл против начального значения $2\times10^8$ КОЕ/мл при 100% замене дистиллированной воды (рисунок 3).

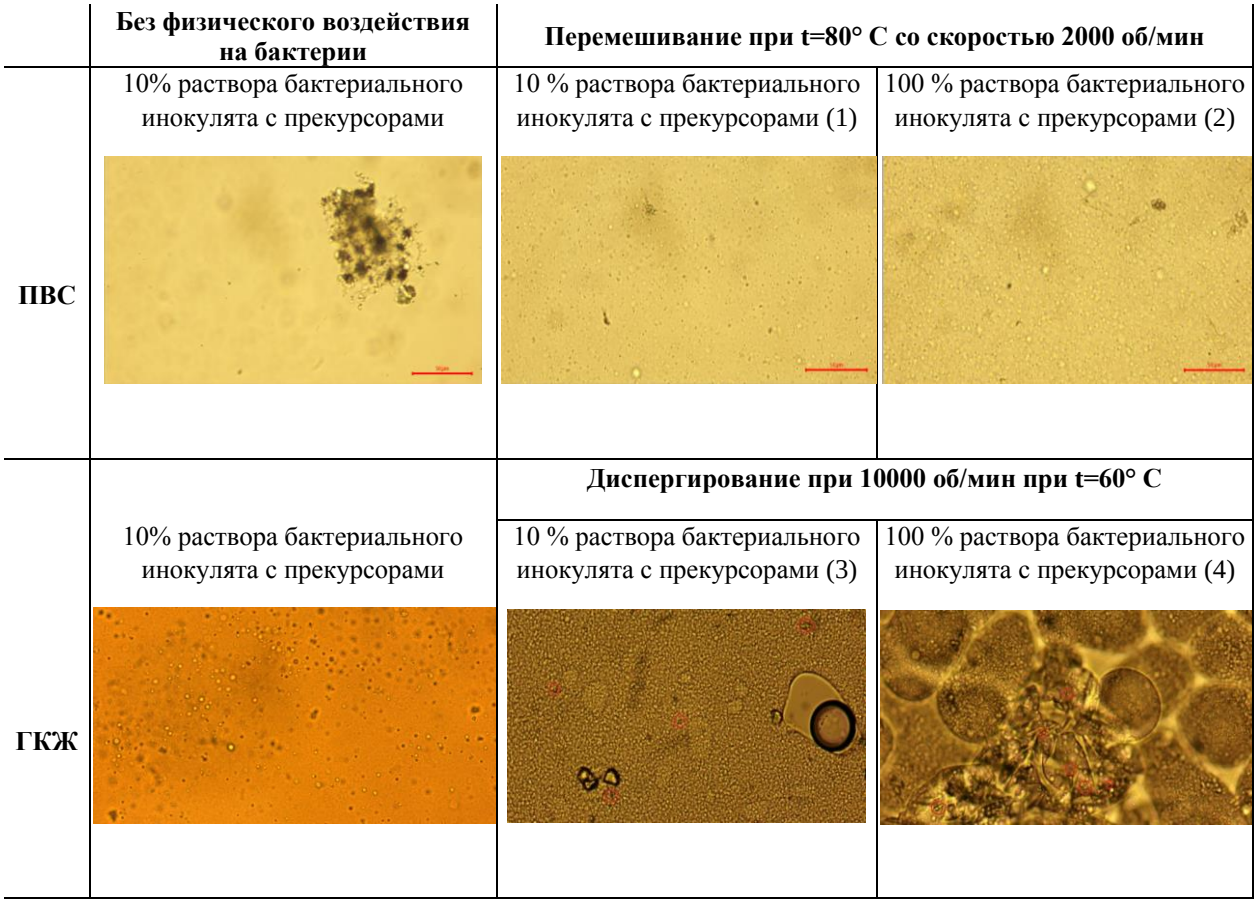



**Рис. 3.** Оценка жизнеспособности бактерии *B. pumilus* (составы 1–4 указаны согласно таблице 3)
**Fig. 3.** *B. pumilus* viability assessment (compositions 1–4 are indicated according to Table 3)

Анализ влияния отдельных компонентов и технологических операций получения эмульсии на сохранность жизнеспособности бактериальных клеток подтвердил перспективность высказанной гипотезы.

## ВЫВОДЫ

Проведен анализ применяемых методов инкапсуляции бактериальных агентов для их использования в технологии карбонатной биоминерализации строительных материалов, обеспечивающих сохранение жизнеспособности и ферментативной активности бактерий за счет подбора биосовместимых сырьевых компонентов.

В ходе экспериментальных исследований обоснована возможность совместного использования компонентов силоксановой эмульсии с бактериальным инокулятом и прекурсорами как пропиточного раствора для вторичной защиты бетонов.

*Работа выполнена в рамках реализации государственного задания Минобрнауки РФ № FZWN-2023-0006 с использованием оборудования Центра высоких технологий БГТУ им. В.Г. Шухова.*

*The work was realized within the framework of the implementation of the state task of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation No. FZWN-2023-0006 using equipment of High Technology Center at BSTU named after V.G. Shukhov*

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Строкова В.В., Власов Д.Ю., Франк-Каменецкая О.В., Духанина У.Н., Балицкий Д.А. Применение микробной карбонатной биоминерализации в биотехнологиях создания и восстановления строительных материалов: анализ состояния и перспективы развития // Строительные материалы. – 2019. – № 9. – С. 83-103.

2. Розенталь Н.К., Чехний Г.В., Сядук Г.В., Плитарак Ю.В. Гидрофобизация бетона как средство для повышения долговечности строительных конструкций // Бетон и железобетон. – 2015. – № 2. – С. 24-27.

3. Розенталь Н.К., Чехний Г.В. Коррозия и защита железобетонных конструкций в биологически активных средах // Вестник НИЦ Строительство. – 2013. – № 7-8. – С. 111-118.

4. Ерофеев В.Т., Федорцов А.П., Богатов А.Д., Федорцов В.А. Биокоррозия цементных бетонов, особенности ее развития, оценки и прогнозирования // Фундаментальные исследования. – 2014. – № 12. – С. 708-716.

5. Ерофеев В.Т., Смирнов В.Ф., Дергунова А.В., Завалишин Е.В. Повышение биостойкости строительных материалов и изделий посредством пропитки их пористой структуры // Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета. – 2010. – № 2(14). – С. 218-222.

6. Maqbool S., Singh K. Effect of bacterial encapsulation in concrete: A review on applications and effects // Materials Today: Proceedings. 2020. Vol. 33. pp. 1713 – 1719.

7. Zhu X., Mignon A., Nielsen S., Zieger S., Koren K., Boon N., De Belie N. Viability determination of *Bacillus sphaericus* after encapsulation in hydrogel for self-healing concrete via microcalorimetry and in situ oxygen concentration measurements // Cement and Concrete Composites. 2021. Pp. 119.

8. Wang J., Mignon A., Trenson G., Van Vlierberghe S., Boon N., De Belie N. A chitosan based pH-responsive hydrogel for encapsulation of bacteria for self-sealing concrete // Cement and Concrete Composites. 2018. № 93. Pp. 309 – 322.

9. Souid A., Esaker M., Elliott D., Hamza O. Experimental data of bio self-healing concrete incubated in saturated natural soil // Data in Brief. 2019. Vol. 26. pp. 104394

10. Feng J., Rohaizat R., Qian S. Polydopamine@carbon nanotube reinforced and calcium sulphoaluminate coated hydrogels encapsulating bacterial spores for self-healing cementitious composites // Cement and Concrete Composites. 2022. Pp. 20133.

11. Pungrasmi W., Intarasoontron J., Jongvivatsakul P., Likitlersuang S. Evaluation of microencapsulation techniques for micp bacterial spores applied in self-healing concrete // Scientific reports. 2019. №9 (1). Pp. 12484.

12. Emad A., A new polyphosphate calcium material with morphogenetic activity // Materials Letters. 2015. Vol. 148. Pp. 163-166.

13. Müller W., Tolba E., Wang S., Li Q., Neufurth M., Ackermann M., Muñoz-Espí R., Schröder H., Wang X. Transformation of construction cement to a self-healing hybrid binder // International journal of molecular sciences. 2019. Vol. 20. Pp. 2948.

14. Ищенко А.В., Баскаков П.С., Строкова В.В., Молчанов А.О. Стабилизация и коалесценция гидрофобизирующих эмульсий на основе полисилоксановой жидкости // Ученые записки Крымского федерального университета имени В.И. Вернадского. Биология. Химия. – 2018. – № 2. – С. 203 – 213.

## REFERENCES

1. Strokova V.V., Vlasov D.Yu., Frank-Kamenetskaya O.V., Dukhanina U.N., Balitsky D.A. Application of microbial carbonate biomineralization in biotechnologies of building materials creation and restoration: analysis of the state and prospects of development // Stroitel'nye materialy. 2019. N 9. Pp. 83-103. (In Russian)

2. Rozental N.K., Chekhniy G.V., Syaduk G.V., Plitarak Yu.V. Hydrophobization of concrete as a means to increase the durability of building structures // Beton i zhelezobeton. 2015. N 2. Pp. 24-27. (In Russian)

3. Rosenthal N.K., Chekhniy G.V. Corrosion and protection of reinforced concrete structures in biologically active environments // Vestnik NITS Stroitel'stvo. 2013. N 7 – 8. Pp. 111-118. (In Russian)

4. Erofeev V.T., Fedortsov A.P., Bogatov A.D., Fedortsov V.A. Biocorrosion of cement concretes,

features of its development, assessment and forecasting // Fundamental'nyye issledovaniya. 2014. N 12. Pp. 708-716. (In Russian)

5. Erofeev V.T., Smirnov V.F., Dergunova A.V., Zavalishin E.V. Increasing the biostability of building materials and products by impregnating their porous structure // Izvestiya Kazanskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta. 2010. N 2 (14). Pp. 218 -222. (In Russian)

6. Maqbool S., Singh K. Effect of bacterial encapsulation in concrete: A review on applications and effects // Materials Today: Proceedings. 2020. Vol. 33. Pp. 1713- 1719.

7. Zhu X., Mignon A., Nielsen S., Zieger S., Koren K., Boon N., De Belie N. Viability determination of *Bacillus sphaericus* after encapsulation in hydrogel for self-healing concrete via microcalorimetry and in situ oxygen concentration measurements // Cement and Concrete Composites. 2021. Pp. 119.

8. Wang J., Mignon A., Trenson G., Van Vlierberghe S., Boon N., De Belie N. A chitosan based pH-responsive hydrogel for encapsulation of bacteria for self-sealing concrete // Cement and Concrete Composites. 2018. N 93. Pp. 309-322.

9. Souid A., Esaker M., Elliott D., Hamza O. Experimental data of bio self-healing concrete incubated in saturated natural soil // Data in Brief. 2019. Vol. 26. pp. 104394

10. Feng J., Rohaizat R., Qian S. Polydopamine@carbon nanotube reinforced and calcium sulphoaluminate coated hydrogels encapsulating bacterial spores for self-healing cementitious composites // Cement and Concrete Composites. 2022. Pp. 20133.

11. Pungrasmi W., Intarasoontron J., Jongvivatsakul P., Likitlersuang S. Evaluation of microencapsulation techniques for micp bacterial spores applied in self-healing concrete // Scientific reports. 2019. N 9 (1). Pp. 12484.

12. Emad A., A new polyphosphate calcium material with morphogenetic activity // Materials Letters. 2015. Vol. 148. Pp. 163-166.

13. Müller W., Tolba E., Wang S., Li Q., Neufurth M., Ackermann M., Muñoz-Espí R., Schröder H., Wang X. Transformation of construction cement to a self-healing hybrid binder // International journal of molecular sciences. 2019. Vol. 20. Pp. 2948.

14. Ishchenko A.V., Baskakov P.S., Strokova V.V., Molchanov A.O. Stabilization and coalescence of water-repellent emulsions based on polysiloxane fluid // Uchenyye zapiski Krymskogo federal'nogo universiteta imeni V. I. Vernadskogo. Biologiya. Khimiya. 2018. N 2. Pp. 203-213. (In Russian)

# COMPOSITION OF THE IMPREGNATING SOLUTION FOR BACTERIAL BIOMINERALIZATION AND FEATURES OF ITS INTERACTION WITH CEMENT SYSTEM COMPONENTS

Dukhanina U.N., Balitsky D.A., Strokova V.V., Esina A.Yu., Kuznetsova A.A.

BSTU named after V.G. Shukhov,
Duhanina777@yandex.ru

**Abstract**. Building materials and products are subjected to various types of corrosion, the development of which is associated with a large number of variable factors occurring in a complex relationship. The speed and nature of corrosion processes depends on the permeability of concrete products. The migration of aggressive substances in the body of the concrete matrix as a result of transport mechanisms (filtration, capillary transfer, diffusion) leads to a change in porosity and, as a consequence, the physical and mechanical properties of materials. The intensity of transport processes is determined on the one hand by internal parameters (the nature and composition of the binder and other components of the cement and concrete system, the size of aggregates and pores), on the other – by external parameters (the condition and degree of uniformity of the surface of the product, the presence of protective coatings, impregnations, insulation, etc.). In turn, it was found that microbial-induced calcite deposition contributes to an increase and/or prolongation of the resistance of materials to external aggressive factors.

In order to optimize the process of applying an impregnating biocementitious composition, a hypothesis has been proposed about the possibility of introducing bacterial inoculate and precursors into the composition of the emulsion. The use of a polysiloxane emulsion based on a water-soluble polymer intended for the hydrophobization of the surface of cement concrete products, due to its biopositivity due to the absence of volatile organic substances in its composition as a solvent of hydrophobizing resin, is proposed as a base composition. To establish the influence of individual components and technological features of emulsion production on the producing ability of bacteria, an assessment of the effect of organosilicon liquid GKZH-94, polyvinyl alcohol (PVA), temperature and intensity of dispersion (emulsification) on them was carried out.

**Subject:** Influence of polysiloxane emulsion components on the bacterial activity of *B. pumilus*.

**Materials and methods:** Substantiation of the ways of possible technological solutions and their implementation in the selection of the composition of the impregnating solution used for bacterial mineralization in the cement system together with the components of the polysiloxane emulsion.

**Results:** The absence of harmful effects of both PVA and GKZH on B. pumilus bacteria was recorded. Heating the PVA solution with a bacterial inoculum to 60° C led to sporulation of more than 80% of bacteria. It has been established that high-speed dispersion causes cell damage, there is a sporulation of bacteria up to $1{,}3\times10^6$ CFU/ml against the initial value of $2\times10^8$ CFU/ml.

**Conclusions:** The analysis of the influence of individual components and technological operations of obtaining an emulsion on the preservation of the viability of bacterial cells confirmed the prospects of the expressed hypothesis.

**Key words:** Bacteria, encapsulation, emulsion, bacterial biomineralization, concrete.