

М.Г. БРУЯКО<sup>1</sup>, А.И. ГРИГОРЬЕВА<sup>2</sup>, Д.С. ГОЛОТЕНКО<sup>1</sup>, А.А. ПОДСЕВАЛОВА<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ), г. Москва, Россия,

<sup>2</sup> ООО «АМТЕК», г. Москва, Россия

## БИМОДИФИЦИРОВАНИЕ СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ БАКТЕРИЯМИ С УРЕАЗНОЙ АКТИВНОСТЬЮ

*Аннотация.* В данной статье описаны результаты исследований, касающиеся вопроса возможности получения самовосстанавливающихся строительных материалов на основе минеральных вяжущих веществ. Принцип получения таких материалов заключается в добавлении в растворные смеси микроконтейнеров, содержащих питательную среду и клетки бактерий с уреазной активностью, способствующей к образованию карбоната кальция, заполняющего образующиеся микродефекты в структуре материала.

Статья включает в себя результаты исследований по нахождению наиболее активных форм бактерий, которые возможно использовать при формировании строительных изделий, и их влияния на различные свойства модифицированных строительных растворов. Для получения растворных смесей с различным рН в качестве минеральных вяжущих веществ использовались портландцемент и гипсовое вяжущее. Уреазная активность бактерий являлась определяющим фактором их эффективности. В данной работе продемонстрирована зависимость водоцементного отношения от концентрации биомассы бактерий, находящейся в растворной строительной смеси, зависимость уреазной активности клеток от водородного показателя среды, а также влияние использования различных материалов в качестве носителей-микроконтейнеров.

Полученные результаты свидетельствуют о том, что наличие биологических поверхностно-активных веществ в составе клеток бактерий, оказывает значительное влияние на реологические свойства цементно-песчаных растворов. Установлено изменение сроков схватывания и прочностных характеристик цементно-песчаных растворов при различных концентрациях клеток.

**Ключевые слова:** самовосстанавливающие материалы, пластификаторы, биоПАВ, бетоны, строительные растворы, биомасса.

M.G. BRUYAKO<sup>1</sup>, A.I. GRIGOREVA<sup>2</sup>, D.S. GOLOTENKO<sup>1</sup>, A.A. PODSEVALOVA<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU), Moscow, Russia

<sup>2</sup> «AMTEK», Moscow, Russia

## BIOMODIFICATION OF BUILDING MATERIALS BY BACTERIA WITH UREASE ACTIVITY

*Abstract.* This article uses research results that allow you to get self-healing building materials based on mineral binders. This happens by adding microcontainers to dissolved mixtures, which use nutrients for bacteria with urease activity, which produce calcium carbonate, which fills microdefects in the material.

The research results include the use of active forming bacteria, as well as their effect on various properties of modified mortars. To obtain soluble mixtures with different pH values, Portland cement and gypsum binder were used. Indicators of their active work. In this work, the dependence of the aquatic environment on the concentration of biomass in the dissolved building mixture, the dependence on the aquatic environment and microorganisms is shown.

The results are associated with the presence of biological surfactants in bacterial cells, which have a significant effect on the rheological properties of cement-sand mortars. A change in the setting time and strength characteristics of cement-sand mortars at various cell concentrations

**Keywords:** self-healing materials, plasticizing agent, concrete, construction cement, biomass.

### 1 Введение

Строительные материалы на основе минеральных вяжущих подвергаются постоянному внешнему воздействию. Это способствует снижению прочностных и эксплуатационных характеристик конструкций. Для увеличения их срока службы необходимо постоянное техническое обслуживание, включающее проведение мероприятий для поддержания и восстановления поврежденных элементов.

Под воздействием различных нагрузок на строительные конструкции в поверхностных слоях материала образуются микротрещины, через которые увеличивается фильтрация жидких и газообразных сред, что в дальнейшем приводит к снижению долговечности изделия. Процесс самовосстановления основан на способности аэробных бактерий в процессе жизнедеятельности в окружающей среде продуцировать образование карбоната кальция, коагулирующего объем образовавшейся микротрещины, тем самым восстанавливая целостность поверхности материала. Придание материалам способности к самовосстановлению введением биодобавки, содержащей клетки бактерии, является перспективным способом сохранения эксплуатационных свойств строительных конструкций.

Анализ литературы показал, что различные биопроцессы нашли свое применение во многих областях человеческой деятельности. [1, 3–5] В современных отраслях известны методы, применяющие различные виды микроорганизмов для укрепления грунтов [1], очистки воды, почвы, пищевых кормов [3-5], получения поверхностно-активных веществ (ПАВ) [2,12], обеспечения процесса самовосстановления конструкций.[6-9,11,17] Способ восстановления микроструктуры строительных материалов на основе минеральных вяжущих веществ является экологически чистым и экономически более выгодным [1,2] по сравнению с другими известными способами [3,5,7-9,11,12].

Для придания строительным материалам на основе минеральных вяжущих способности самостоятельно восстанавливать микроструктуру путем биомодификации в данной работе были проведены следующие исследования: определена уреазная активность клеток бактерий и влияние характеристик окружающей среды на ее сохранение, рассмотрены пористые материалы для иммобилизации клеток, установлено влияние клеток на реологические и прочностные свойства материалов, проведено раман-спектроскопическое исследование поверхности восстановленных образцов.

Для проведения исследований были выбраны следующие компоненты: гипс строительный Г-4БП, портландцементное вяжущее ПЦ-400-Д0, кварцевый песок с модулем крупности равным 2,1, вода затворения, цеолит природный (предприятие Орловский цеолит) с фракцией до 0,63 мм, гранулированное вспененное стекло, фракции диаметром 1,5-2,0 мм т.м. Термогласс. Методы исследования и подготовки проб клеток аналогичны ранее проводимым исследованиям в работе [6].

Мировой опыт по разработке биомодифицирующей добавки включает в себя достаточно широкий список применяемых грамположительных и грамотрицательных клеток (*Sporosarcina pasteurii*, *Bacillus pasteurii*, *B. cohnii*, *B. sphaericus*, *B. pseudofirmus*, *B. cohnii*, *B. halodurans*, *B. subtilis*, *B. megaterium*, *B. alkalinitrilicus*, *Pseudomonas putida*, *Escherichia coli*) [1].

### 2 Методы

Биомодификация материалов заключается в введении добавки в материал, состоящей из биологического компонента, питательной среды и соединений, являющихся источниками ионов кальция. Действие такой добавки основано на образовании карбоната кальция при участии биокатализатора, активный фермент клетки которого значительно увеличивает скорость химических реакций. Многие исследования по разработке самовосстанавливающихся бетонов наиболее часто применяют соединения, являющиеся одновременно источником ионов кальция и питательным компонентом, необходимым для

жизнедеятельности клеток – лактат кальция, глутамат кальция, нитрат кальция, ацетат кальция. [13-18] Однако использование комплексной добавки, включающей в себя хлорид кальция и мочевины, является экономически выгодной и более изученной с точки зрения бетоноведения противоморозной добавкой. На рисунке 1 приведено сравнение влияния различных соединений, являющихся питательным компонентом для бактерий, и их концентраций на прочность цементного раствора в возрасте 28 суток, полученных данных и литературных источников. Количество добавки указано в процентах от массы цементного вяжущего, сравнение данных приведено на графике в виде процентного отношения, где прочность контрольного образца 100%.

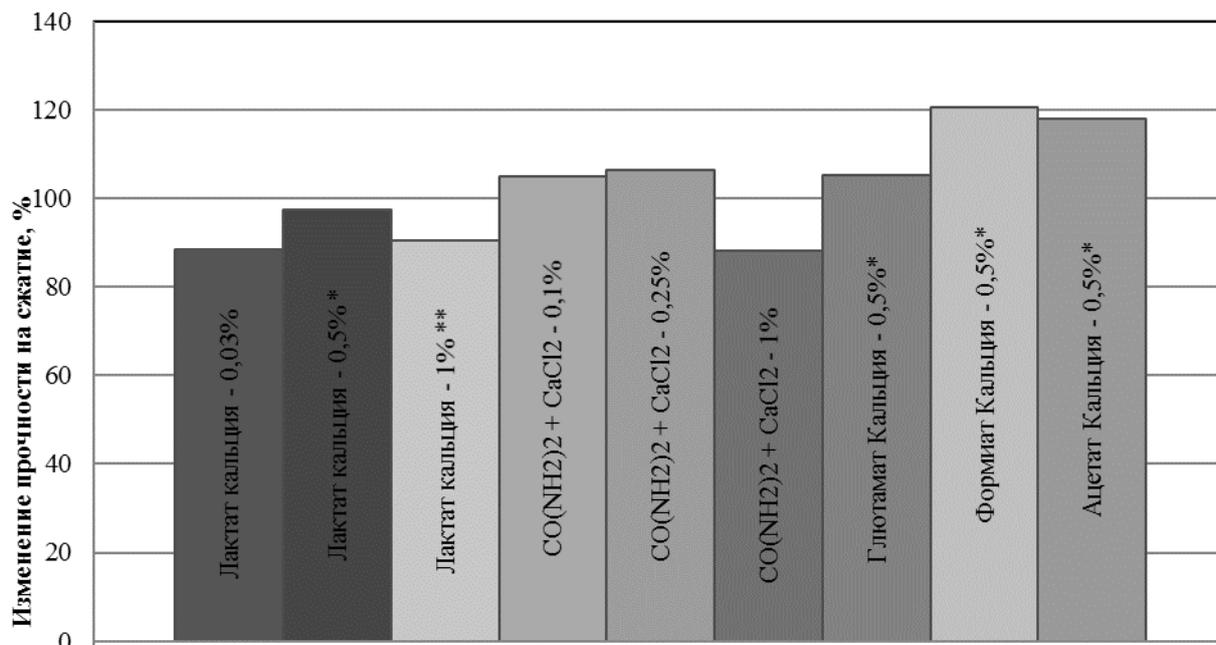


Рисунок 1 – Влияние различных соединений на прочность цементного раствора:  
\* - сравнение с испытаниями [10], \*\* - сравнение с испытаниями [11]

Карбамид в сочетании с хлоридом кальция в концентрации, не превышающей 0,5%, оказывает более положительное влияние на прочность минеральной матрицы по сравнению с лактатом кальция, который часто применяется для самовосстановления бетонов.

С целью обеспечения защиты активности клеток от агрессивного воздействия среды применяются пористые материалы, иммобилизующие бактерии. Такие микроконтейнеры-носители обеспечивают более продолжительным сроком функциональной активности клеток и позволяют повысить концентрацию вводимых микроорганизмов, не оказывая сильного влияния на реологию растворов. [19] Существуют исследования по применению разных видов материалов, используемых в качестве микроконтейнеров-носителей: полиуретан, гидрогель, пемза, цеолит, керамзит и пр. [20-23].

### 3 Результаты и их обсуждение

Определяющим фактором для выбора вида бактерий с целью придания строительным материалам на основе минеральных вяжущих веществ является их уреазная активность, которая определяет способность клеток продуцировать карбонат кальция. Уреаза — это фермент класса гидролаз, который расщепляет мочевины до аммиака и углекислого газа. По показателю уреазной активности было проведено сравнение выбранных клеток *Rhodococcus erythropolis* с *Bacillus pasteurii* для представителей групп воздушных и гидравлических вяжущих (таблица 1).

В процессе гидратации начальные значения pH в случае использования *Bacillus pasteurii* были выше, чем pH в случае использования клеток *Rhodococcus erythropolis*.

присутствии клеток *R. erythropolis* для гипсовых и цементных вяжущих наблюдается более интенсивное образование  $\text{NH}_4$ . Клетки *Rhodococcus erythropolis* демонстрируют более высокую адаптацию к изменяющимся условиям окружающей среды (увеличение значения pH цементного вяжущего), поскольку их уреазная активность по сравнению с *Bacillus pasteurii* выше на 45%. Оба вида клеток являются щелочестойкими бактериями и сохраняют свою активность при высоких значениях pH, однако в условиях среды с более низким показателем щелочности уреазная активность становится выше – для *R. erythropolis* почти в 2 раза.

Таблица 1 – Уреазная активность исследуемых клеток в гипсовом и цементном вяжущем

Биокомпонент	Тип вяжущего	Биомасса клеток, мг	Начальный pH	Конечный pH	Активность $\text{NH}_4$ , мг / г / сут
<i>Bacillus pasteurii</i>	Цемент	0,46	8,47	10,49	32,88
	Гипс	0,52	8,39	8,19	39,72
<i>Rhodococcus erythropolis</i>	Цемент	0,49	7,8	11,62	47,69
	Гипс	0,56	6,86	6,89	88,97

Для определения эффективности пористых материалов с целью применения их в качестве микроконтейнеров, которые защищают клетки от негативного воздействия внешней окружающей среды вяжущего, измерялась их уреазная активность. Исследования по выбору наиболее подходящей основы для микроконтейнера-носителя были проведены на двух типах пористых материалов с открытой и закрытой пористостью (природные цеолиты, гранулированное пеностекло). Полученные результаты приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Изменение уреазной активности клеток *Rhodococcus er.* для различных пористых материалов

Образец	Масса образца, г	Начальный pH	Конечный pH	Активность $\text{NH}_4$ , мг / г / сут
Цеолит	2,3	7,3	9,8	2518,95
Пеностекло	2,0	7,54	9,33	332,38

По анализу полученных данных можно заключить, что цеолиты имеют преимущество в сохранении уреазной активности клеток по сравнению с гранулированным пеностеклом.

В данной работе приведены результаты исследований зависимости прочностных характеристик материала на основе гипсового вяжущего от концентрации введенных клеток при постоянном В/Г=0,67 (таблица 3). На графиках (рисунки 2 и 3) отображена зависимость прочностных показателей, определяемых в соответствии с ГОСТ 23789-79, изготовленных образцов для цементного вяжущего от концентрации введенной биомассы клеток.

Таблица 3 – Изменение прочностных характеристик образцов на гипсовом вяжущем в зависимости от концентрации *R. erythropolis*

		Концентрация клеток, % к масс. гипс. / Номер серии				
		0/ 1	0,01/ 2	0,015/ 3	0,025/ 3	0,1/ 4
Прочность, МПа	Изгиб	2,03	2	2,01	1,99	1,84
	Сжатие	4,17	3,98	3,96	3,87	3,86

Различные концентрации клеток *Rhodococcus erythropolis* оказывают влияние на прочность образцов гипса. Увеличение содержания биомассы клеток выше 0,015% для

гипсового вяжущего приводит к снижению прочностных характеристик образца по причине оказываемого сильного пластифицирующего эффекта. Такие биоПАВ называются также биосурфактанты и могут синтезироваться не только приведенными в данной работе бактериями, но и другими видами, дрожжами, микроводорослями, мицелиальными грибами.

Увеличение концентрации клеток *Rhodococcus erythropolis* оказывает существенное влияние на реологические характеристики цементно-песчаных растворов. На рисунке 1 графически отображена зависимость водоцементного отношения от концентрации биомассы бактерий. Введение в строительный цементно-песчаный раствор 1% биомассы клеток позволяет снизить значение В/Ц с 0,45 до 0,415. Такой эффект позволит снизить количество воды затворения, что позволит создавать более плотную структуру минеральной матрицы.

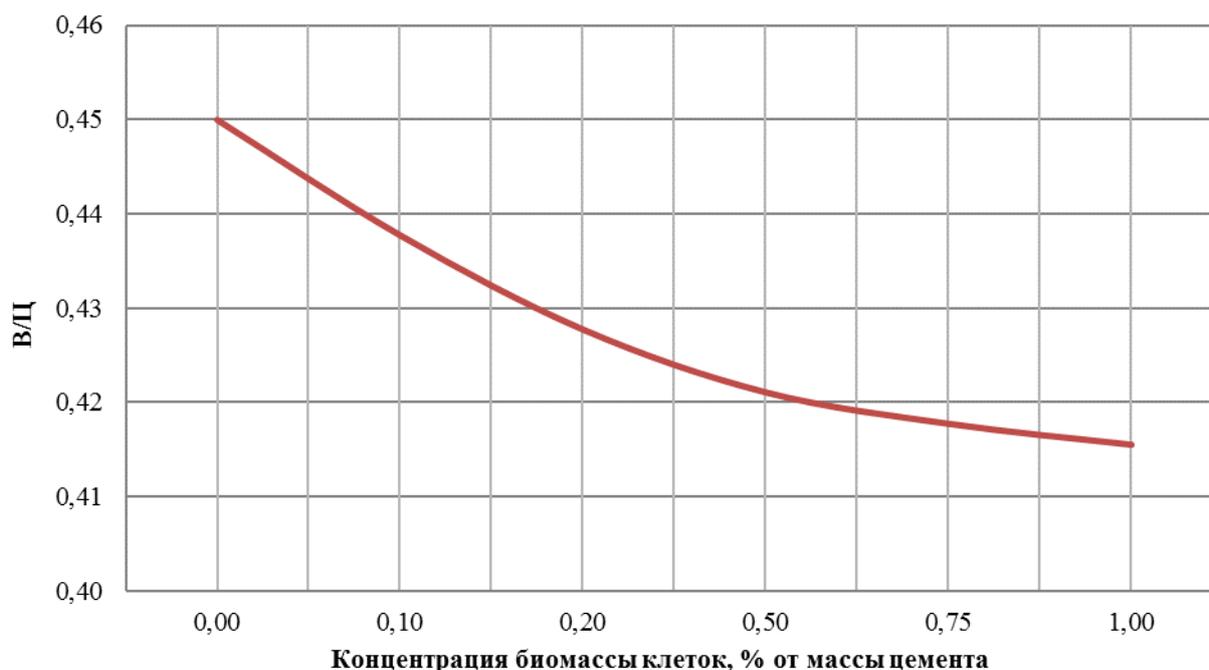


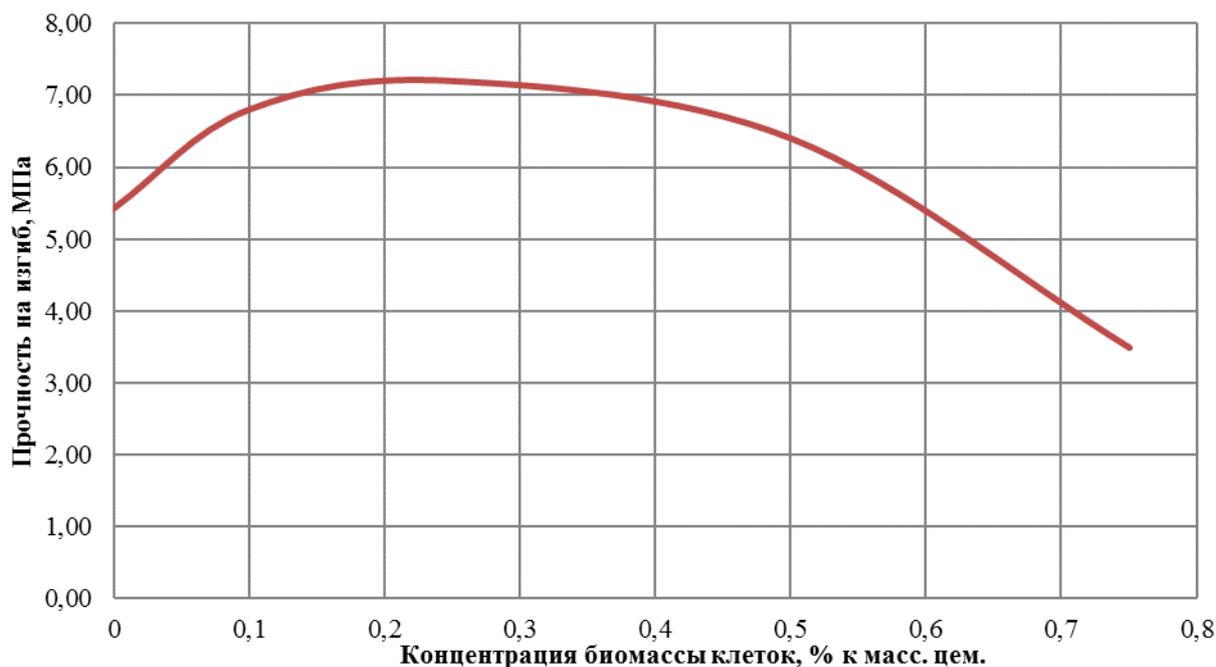
Рисунок 2 – Зависимость водоцементного отношения (В/Ц) от концентрации введенной клеточной биомассы в цементно-песчаный раствор

Определение прочностных показателей изготовленных биомодифицированных цементно-песчаных образцов в возрасте 28 суток проводилось по стандартной методике ГОСТ 30744-2001 в нормальных условиях твердения (рисунки 3, 4). Введение биодобавки в количестве более 0,7% (по отношению к цементному вяжущему) приводит к снижению прочности материала.

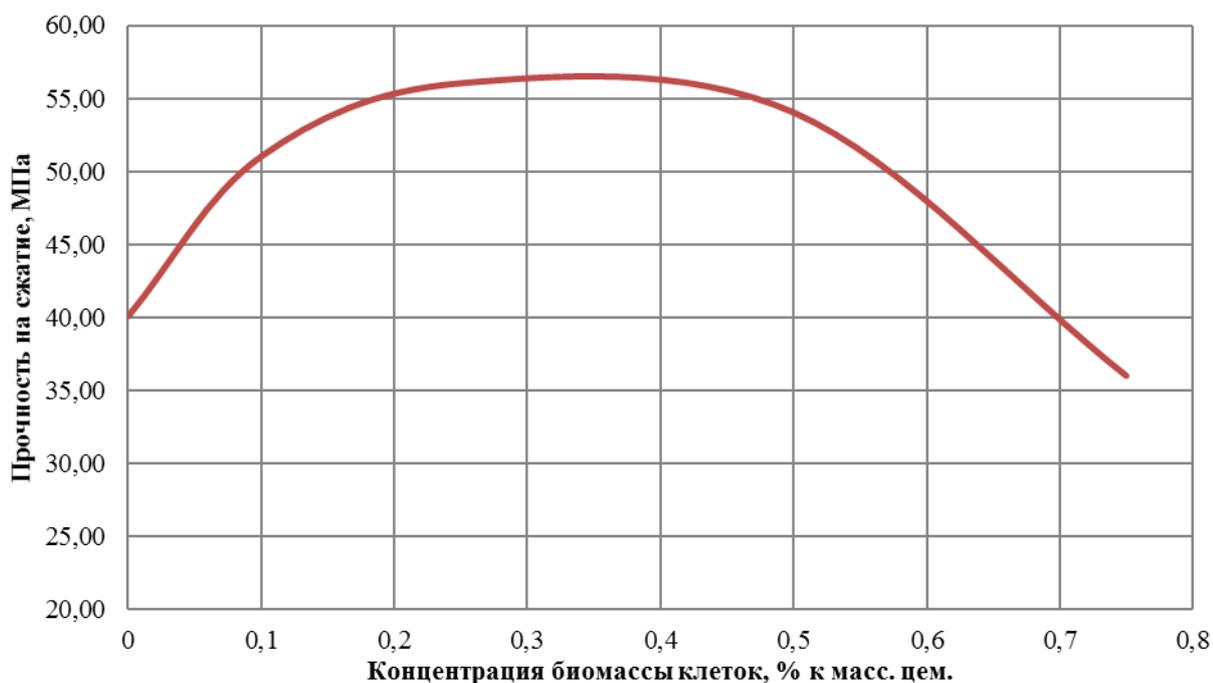
Подбор оптимального количества вводимой биомодифицирующей добавки для обеспечения эффекта самовосстановления производится по влиянию на прочностные характеристики цементно-песчаного раствора.

На рисунке 5 показано изменение прочности на сжатии цементных образцов в зависимости от вводимой концентрации биомассы *R. erythropolis* и питательной среды, при следующем постоянном соотношении мочевины и хлорида кальция (1:1), постоянной концентрации питательного компонента (0,1% масс.цем.) и В/Ц.

Принятая оптимальная концентрации питательного компонента в соответствии с Рисунком 1, равна 0,1% от массы цемента, в сочетании с биомассой клеток с уреазной активностью не более 0,1% обеспечивают повышение прочности на сжатие, что доказывает образование кольматирующего карбоната кальция, который заполняя микродефекты минеральной матрицы образцов уплотняет материал, повышая его прочность.



*Рисунок 3 – Влияние концентрации бактериальной биомассы R. erythropolis на прочность при изгибе цементно-песчаных образцов*

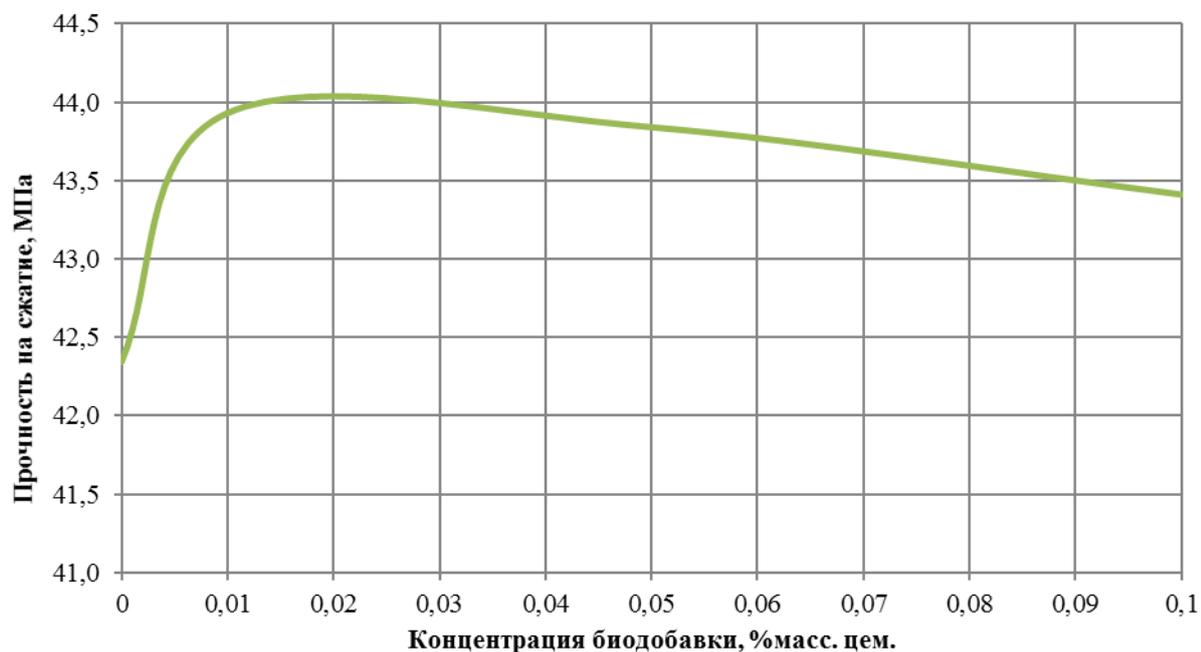


*Рисунок 4 – Влияние концентрации бактериальной биомассы Rhodococcus er. на прочность при сжатии цементно-песчаных образцов*

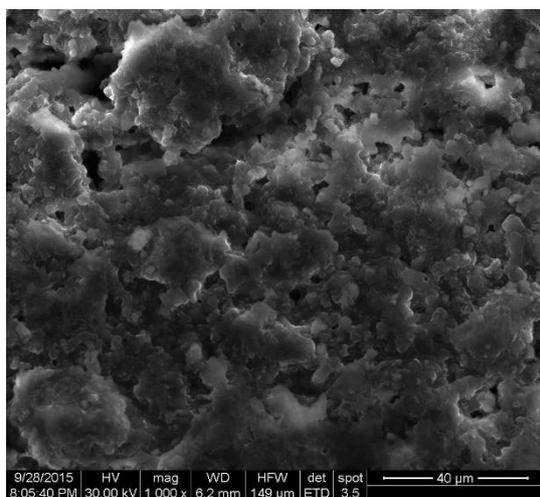
Повышение прочности образцов напрямую связано с заполнением микродефектной структуры цементно-песчаной матрицы колматирующим карбонатом кальция. Фотографии изменения поверхности образцов до и после биомодификации представлены на рисунках 5 и 6.

Причинами возникновения микродефектов и трещин у строительных материалов служат внешние и внутренние нагрузки, вызывающие деформацию изделий, и в зависимости от величины нагрузок, дефекты имеют различные размеры, геометрию и расположение. Также появление трещин возможно в любое время, как в течении 1 часа после формования

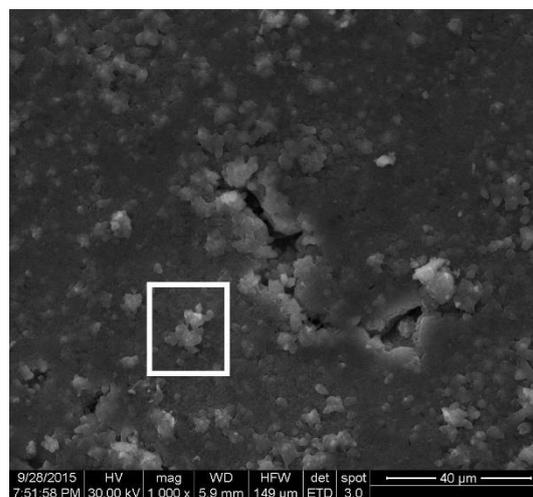
изделия по причине усадки, так и через несколько лет из-за коррозии арматуры, возникшей вследствие разрушения защитного слоя бетона.



**Рисунок 5 – Изменение прочности цементных образцов на сжатие в зависимости от концентрации вводимой биодобавки**



**Рисунок 6 - Фотография поверхности контрольного цементно-песчаного образца без биодобавки**



**Рисунок 7 - Фотография поверхности цементно-песчаного образца с концентрацией клеток 0,05%**

Другим способом, подтвердившим образование соединения карбоната кальция на поверхности модифицированных биодобавкой цементно-песчаных образцов, был метод спектроскопии комбинационного рассеяния света. В области, отмеченной на рисунке 6, был взят образец, химический состав которого был идентифицирован на Раман-спектроскопии. На рисунке 8 волновое число максимального пика составило  $1085,7 \text{ см}^{-1}$ , что наиболее соответствует отклику минерала кальцита. В связи с этим можно утверждать, что процесс восстановления микроструктуры минеральной матрицы цементно-песчаных растворов обеспечивается в результате коагуляции дефектов карбонатом кальция.

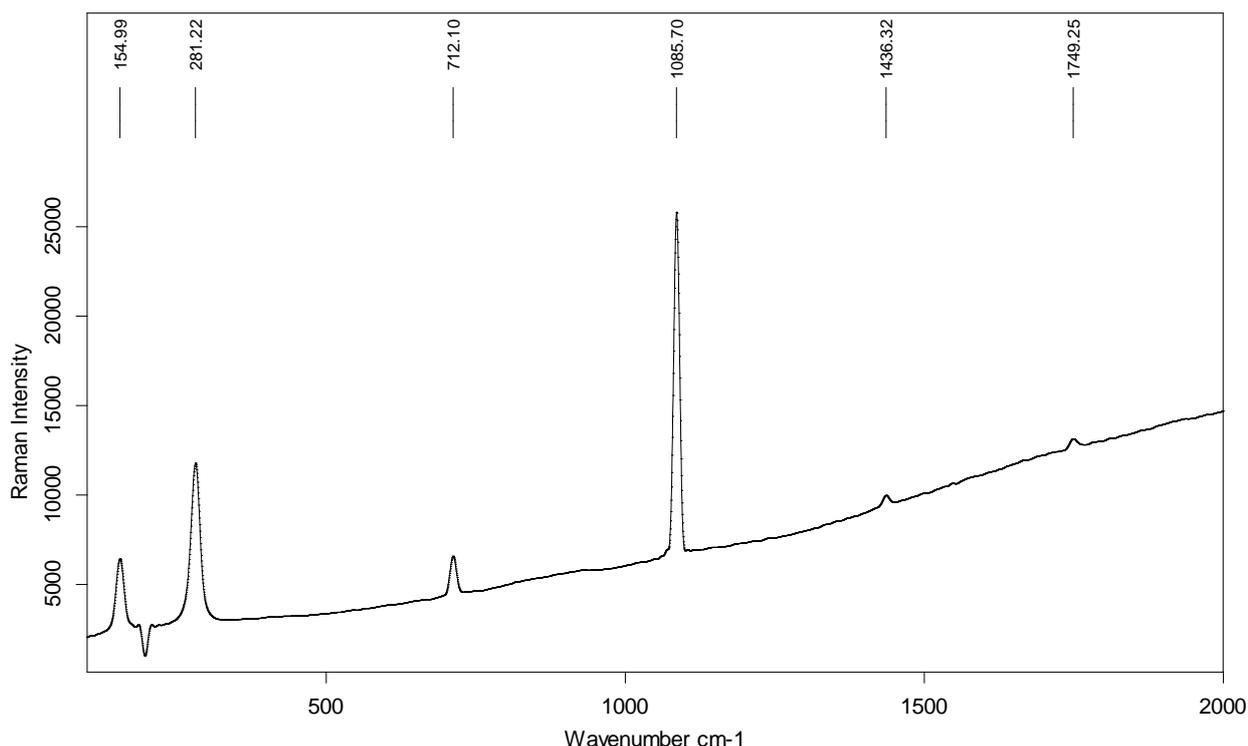


Рисунок 7 - Раман спектр материала с поверхности цементно-песчаного образца

Использование полученного метода биомодифицирования бактериями с уреазной активностью с уреазной активностью позволяет поддерживать надежность строительных конструкций, самостоятельно восстанавливающих микроструктуру на самых начальных этапах образования микродефектов, кольматируя их карбонатом кальция. Такой способ биомодификации материалов с целью придания способности к самовосстановлению имеет несколько преимуществ: экологичность, экономичность, меньшие трудозатраты на ремонтно-реставрационные работы, подходит для использования в конструкциях любой сложности и может использоваться для восстановления ценных памятников архитектуры.

#### 4 Выводы

В итоге проделанной работы достигнутые результаты сформулированы ниже:

1. Доказана наибольшая уреазная активности клеток *Rhodococcus erythropolis* по сравнению с *Bacillus pasteurii*, широко известными научному сообществу клетками для целей самовосстановления бетонных конструкций.
2. Для среды гипсового и цементного вяжущих изучена уреазная активность щелочестойких клеток бактерий.
3. Определено влияние клеток с уреазной активностью на прочностные показатели для цементных и гипсовых изделий.
4. Установлены вид и оптимальная концентрация питательного компонента, необходимого для обеспечения процесса самовосстановления – хлорид кальция и карбамид в концентрации 0,1% от массы вяжущего.
5. Выявлено, что клетки обладают свойствами пластифицирующих добавок и способны уменьшать количество воды, необходимое для гидратации вяжущих, что увеличивает прочность строительных бетонных конструкций. Оптимальная концентрация для цементных растворов лежит в диапазоне 0,01-0,5% от массы вяжущего.
6. Наиболее подходящим видом пористого материала для иммобилизации бактерий, обеспечивающим наибольшую уреазную активность, является природный цеолит.

7. При помощи Раман-спектроскопии определено, что введение биодобавки обеспечивает образование минерала карбоната кальция, колюматирующего поверхностные микродефектуры структуры материала.

Данное исследование доказывает возможность применения биологии в строительстве, обеспечивающих прогресс для технологии минеральных вяжущих, которым биомодифицирующие добавки способны придать новые, ранее им не присущие, свойства.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Terzis D., Laloui L. A decade of progress and turning points in the understanding of bio-improved soils: A review // *Geomechanics for Energy and the Environment*. 2019. Vol. 19. 100116. <https://doi.org/10.1016/j.gete.2019.03.001>
2. Соломатов В.И., Черкасов В.И., Бузулуков В.И., Царева С.В. Биологические модификаторы бетона // *БСТ: Бюллетень строительной техники*. 2001. № 5. С. 6.
3. Christofi N. Microbial surfactants and their use in field studies of soil remediation // *Journal of Applied Microbiology*. 2002. Vol. 93. Pp. 915–929.
4. Lima T.M., Procopio L.C., Brandao F.D. et al. Biodegradability of bacterial surfactants // *Biodegradation*. 2011. Vol. 22. No 3. Pp. 585–592.
5. Maier R., Soberon-Chavez M.G. Pseudomonas aeruginosa rhamnolipids: biosynthesis and potential applications // *Applied Microbiology and Biotechnology*. 2000. Vol. 54. Pp. 625–633.
6. Степанов Н.А., Ефременко Е.Н., Бруяко М.Г., Григорьева А.И. Изменение свойств строительных материалов при введении в них биомассы бактерий с уреазной активностью // *Вестник МГСУ*. 2017. Т. 12. № 7 (106). С. 788-796.
7. Raijiwala D.B., Hingwe P.S., Babhor V.K. Bacterialconcrete — an ideal concrete for historical structures // *Concrete Solutions: International conference on concrete solutions*. London: Taylor & Francis Group, 2009. Pp. 185–189.
8. Van Tittelboom K. Self-healing concrete through incorporation of encapsulated bacteria - or polymer-based healing agents. Ghent: Ghent University, 2012. 344 p.
9. Jonkers H.M. Development of a bacteria-based self-healing concrete. / Jonkers H.M., Schlangen E. // In *Tailor made concrete structures - new solutions for our society*. Proc. Int. FIB symposium (ed. J. C. Walraven & D. Stoelhorst), Amsterdam, the Netherlands, 2008. Pp. 425-430.
10. Ерофеев В.Т., Аль Дулайми Салман Давуд Салман. Исследование изменений прочностных характеристик цементных композитов в зависимости от концентрации в них бактерий и возраста образцов // *Приволжский научный журнал. Строительные материалы и изделия*. 2018. № 3. С. 70–77.
11. Bundur Z.B., Kirisits M.J., Ferron R.Ds. Biomineralized cement-based materials: Impact of inoculating vegetative cells on hydration and strength // *Cement and Concrete Research*. 2015. Vol. 67. Pp. 237–245.
12. Дудынов С.В. Разработка модифицирующих добавок из фрагментов природных соединений с применением биотехнологии для использования в бетонах // *Строительные материалы, оборудование, технологии XXI века*. 2004. № 9 (68). С. 23-25.
13. Изотов В.С., Соколова Ю.А. Химические добавки для модификации бетона. М.: Палеотип, 2006. 244 с.
14. Guadalupe Sierra-Beltran M. Characterization of sustainable bio-based mortar for concrete repair / M. Guadalupe Sierra-Beltran, H. M. Jonkers, E. Schlangen // *Construction and Building Materials*. Vol. 67, No 9. 2014. Pp. 344–352.
15. Jonkers H. M. A two component bacteria based self-healing concrete/ *Concrete Repair, Rehabilitation and Retrofitting II*. Vol. 3. 2009. Pp. 215–220.
16. W. De Muynck, D. Debrouwer, N. De Belie, W. Verstraete. Bacterial carbonate precipitation improves the durability of cementitious materials. // *Cement and Concrete Research*, 2008. Vol.38, No.7. Pp. 1005–1014.
17. Salmabanu L., Suthar G. A review paper on self healing concrete // *J Civ Eng Res*, 2015. Vol.5. No.3. Pp.53-58.
18. Логинова Т.В., Сивков С.П. Исследование свойств бактериальных цементов // *Успехи в химии и химической технологии*. 2017. Т. 31. № 1 (182). С. 15-16.
19. Ефременко Е. Н., Андрияшина В. А., Балабанова Т. В. и др. Имобилизованные клетки: биокатализаторы и процессы: монография. Москва: РИОР, 2018. 500 с. DOI:10.29039/02004-3.
20. Van Tittelboom K. Self-healing concrete through incorporation of encapsulated bacteria- or polymer-based healing agents. Ghent: Ghent University, 2012. 344 p.
21. Bang S.S., Galinat J.K., Ramakrishnan V. Calcite precipitation induced by polyurethane-immobilized // *Bacillus pasteurii*, *Enzyme and Microbial Technology*, 2001. Vol. 28, No.4. Pp.404–409.
22. Jonkers H. Bacteria-based self-healing concrete // *HERON*, 2011. Vol.56, No.1. Pp.1-12.

23. Salman Dawood Salman AL-Dulaimi, Taher AL-Dafafea, Maksimova I.N and Erofeev V.T. Study of self-healing bio-concrete // International Journal of Civil Engineering & Technology (IJCIET). 2019.Vol.10, No. 4, Pp. 1354 – 1360.

## REFERENCES

1. Terzis D., Laloui L. A decade of progress and turning points in the understanding of bio-improved soils: A review. *Geomechanics for Energy and the Environment*. 2019. Vol. 19. 100116. <https://doi.org/10.1016/j.gete.2019.03.001>
2. Solomatov V.I., Cherkasov V.I., Buzulukov V.I., Tsareva S.V. Biologicheskiye modifikatory betona [Biological concrete modifiers]. *BST: Byulleten' stroitel'noy tekhniki*. 2001. No 5. Pp. 6.
3. Christofi N. Microbial surfactants and their use in field studies of soil remediation. *Journal of Applied Microbiology*. 2002. Vol. 93. Pp. 915–929.
4. Lima T.M., Procopio L.C., Brandao F.D. et al. Biodegradability of bacterial surfactants. *Biodegradation*. 2011. Vol. 22. No 3. Pp. 585–592.
5. Maier R., Soberon-Chavez M.G. Pseudomonas aeruginosa rhamnolipids: biosynthesis and potential applications. *Applied Microbiology and Biotechnology*. 2000. Vol. 54. Pp. 625–633.
6. Stepanov N.A., Yefremenko Ye.N., Bruyako M.G., Grigor'yeva A.I. Izmeneniye svoystv stroitel'nykh materialov pri vvedenii v nikh biomassy bakteriy s ureaznoy aktivnost'yu [Changes of construction material properties with addition of bacterial cell biomass possessing Urease activity into the materials]. *Vestnik MGSU*. 2017. T. 12. № 7 (106). S. 788-796
7. Rajjiwala d.B., Hingwe P.S., Babhor V.K. Bacterial-concrete — an Ideal Concrete for Historical Structures. Concrete Solutions: International conference on concrete solutions. London, Tailor & Francis Group, 2009, pp. 185–189.
8. Van Tittelboom K. Self-healing concrete through Incorporation of Encapsulated Bacteria — or Polymer-Based Healing Agents. Ghent University, Ghent, 2012. p. 344.
9. Jonkers H.M. Development of a bacteria-based self-healing concrete. / Jonkers H.M., Schlangen E. // In Tailor made concrete structures - new solutions for our society. Proc. Int. FIB symposium (ed. J. C. Walraven & D. Stoeelhorst), Amsterdam, the Netherlands, 2008. Pp. 425-430.
10. Erofeev V.T., Al' Dulaymi Salman Davud Salman. Issledovaniye izmeneniy prochnostnykh kharakteristik tsementnykh kompozitov v zavisimosti ot kontsentratsii v nikh bakteriy i vozrasta obraztsov [Issledovanie izmeneniy prochnostnykh kharakteristik cementnykh kompozitov v zavisimosti ot koncentracii v nih bakterij i vozrasta obrazcov]. *Privolzhskiy nauchnyy zhurnal. Stroitel'nyye materialy i izdeliya*. 2018. No 3. Pp. 70–77.
11. Bundur Z.B., Kirisits M.J., Ferron R.Ds. Biomineralized cement-based materials: Impact of inoculating vegetative cells on hydration and strength. *Cement and Concrete Research*. 2015. Vol. 67. Pp. 237–245.
12. Dudynov S.V. Razrabotka modifitsiruyushchikh dobavok iz fragmentov prirodnykh soyedineniy s primeneniym biotekhnologii dlya ispol'zovaniya v betonakh [The development of modifying additives from fragments of natural compounds with the use of biotechnology for use in concrete]. *Stroitel'nyye materialy, oborudovaniye, tekhnologii XXI veka*. 2004. No 9 (68). Pp. 23-25.
13. Izotov V.S., Sokolova YU.A. Himicheskie dobavki dlya modifikatsii betona [Chemical additives for concrete modification]. Moscow: Paleotip, 2006, 244 p.
14. Guadalupe Sierra-Beltran M. Characterization of sustainable bio-based mortar for concrete repair / M. Guadalupe Sierra-Beltran, H. M. Jonkers, E. Schlangen. *Construction and Building Materials*. Vol. 67, No 9. 2014. Pp. 344–352.
15. Jonkers H.M. A two component bacteria based self-healing concrete. *Concrete Repair, Rehabilitation and Retrofitting II*. Vol. 3. 2009. Pp. 215–220.
16. W. De Muynck, D. Debrouwer, N. De Belie, W. Verstraete. Bacterial carbonate precipitation improves the durability of cementitious materials. *Cement and Concrete Research*, 2008. Vol.38, No.7. Pp. 1005–1014.
17. Salmabanu L., Suthar G. A review paper on self healing concrete. *J Civ Eng Res*, 2015. Vol.5, No.3. Pp.53-58.
18. Loginova T.V., Sivkov S.P. Issledovaniye svoystv bakterial'nykh tsementov [Investigation of the properties of bacterial cements]. *Uspekhi v himii i himicheskoy tekhnologii*. 2017. Vol. 31, No. 1(182). Pp.15-16.
19. Efremenko E.N. Issledovaniye svoystv bakterial'nykh tsementov [Immobilized cells biocatalysts and processes]. Moscow: RIOR, 2018. 500 p.
20. Van Tittelboom K. Self-healing concrete through incorporation of encapsulated bacteria- or polymer-based healing agents. Ghent: Ghent University, 2012. 344 p.
21. Bang S.S., Galinat J.K., Ramakrishnan V. Calcite precipitation induced by polyurethane-immobilized *Bacillus pasteurii*, *Enzyme and Microbial Technology*, 2001. Vol. 28, No.4. Pp.404–409.
22. Jonkers H. Bacteria-based self-healing concrete. *HERON*, 2011. Vol.56, No.1. Pp.1-12.

23. Salman Dawood Salman AL-Dulaimi, Taher AL-Dafafea, Maksimova I.N and Erofeev V.T. Study of self-healing bio-concrete. *International Journal of Civil Engineering & Technology (IJCIET)*. 2019.Vol.10, No. 4, Pp. 1354 – 1360.

#### Информация об авторах

**Бруяко Михаил Герасимович**

ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет» (НИУ МГСУ), г. Москва, Россия,  
кандидат технических наук, доцент кафедры технологии вяжущих веществ и бетонов.  
E-mail: [mbruyako@yandex.ru](mailto:mbruyako@yandex.ru)

**Григорьева Александра Игоревна**

ООО «АМТЕК», г. Москва, Россия,  
главный архитектор проекта.  
E-mail: [shelie@yandex.ru](mailto:shelie@yandex.ru)

**Голотенко Дарья Сергеевна**

ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет» (НИУ МГСУ), г. Москва, Россия,  
студент кафедры технологии вяжущих веществ и бетонов.  
E-mail: [golotenko.darya@yandex.ru](mailto:golotenko.darya@yandex.ru)

**Подсевалова Анастасия Алексеевна**

ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет» (НИУ МГСУ), г. Москва, Россия,  
студент кафедры технологии вяжущих веществ и бетонов  
E-mail: [podsevalova\\_aa@mail.ru](mailto:podsevalova_aa@mail.ru)

#### Information about authors

**Bruyako Mikhail G.**

Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU), Moscow, Russia,  
candidate of Technical Sciences, Associated Professor of the Department of Technologies of Cohesive Materials and Concretes.  
E-mail: [mbruyako@yandex.ru](mailto:mbruyako@yandex.ru)

**Grigoreva Aleksandra I.**

LLC «АМТЕК», Moscow, Russian Federation,  
architectural Technician.  
E-mail: [shelie@yandex.ru](mailto:shelie@yandex.ru)

**Golotenko Daria S.**

Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU), Moscow, Russia,  
student of the Department of Technologies of Cohesive Materials and Concretes.  
E-mail: [golotenko.darya@yandex.ru](mailto:golotenko.darya@yandex.ru)

**Podsevalova Anastasiya A.**

Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU), Moscow, Russia,  
student of the Department of Technologies of Cohesive Materials and Concretes.  
E-mail: [podsevalova\\_aa@mail.ru](mailto:podsevalova_aa@mail.ru)