

Биоминеральные добавки для самозалечивания бетона

Тамара Николаевна Черных, Кирилл Алексеевич Горбачевских,
Михаил Владимирович Криушин, Александр Анатольевич Орлов,
Мария Владимировна Комелькова, Павел Олегович Платковский

Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)
(ЮУрГУ (НИУ)); г. Челябинск, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Рассмотрены причины снижения долговечности изгибаемых конструкций через призму нарушения защитного слоя арматуры, который в первую очередь нарушается при образовании трещин. Трещины могут самозалечиваться различными методами, наиболее эффективным из которых является микробно-индуцированное осаждение карбоната кальция.

Материалы и методы. Использованы штаммы *Bacillus subtilis* VKM B-70 и VKM B-501 (всероссийская коллекция микроорганизмов), микрокремнезем, метакаолин, золу уноса. Оценка выживаемости бактерий проведена путем культивирования бактериальных штаммов из образцов-таблеток. Определение pH образцов выполнено с помощью pH-метра. Оценка скорости зарастания трещин осуществлена путем визуального осмотра образцов-таблеток под оптическим микроскопом.

Результаты. Приведены результаты эксперимента по подбору оптимального размера альгинатных бактериальных гранул для биоминеральной добавки. Изучено влияние биоминеральных добавок различного состава на зарастание трещин шириной от 100 до 500 мкм. Показано эффект повышения активности бактерий в присутствии пуццоланового компонента, выявлена связь щелочности среды образца и активности бактерий.

Выводы. Рекомендуемым диаметром гранул с точки зрения обеспечения прочности, вероятности залечивания трещин и технологических причин является диапазон 1–1,8 мм. Активность бактерий в таких гранулах увеличивается при наличии в составе добавки пуццоланового компонента. Зола уноса по сравнению с другими видами пуццолановых добавок наиболее эффективна в составах с бактериями *Bacillus subtilis* из-за способности снижать щелочность цементно-песчаных композиций, создавая более благоприятные условия для жизнедеятельности бактерий. При использовании комплексных биоминеральных добавок происходит значительное увеличение скорости зарастания трещин, что позволяет обеспечить закрытие трещин шириной 100 мкм всего за 5 циклов «вода – воздух».

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: *Bacillus subtilis*, пуццолановые добавки, самовосстановление, самозалечивание, трещины, бетон, раствор

Благодарности. Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (государственное задание на выполнение фундаментальных научных исследований № FENU-2023-0012 (2023012ГЗ)).

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Черных Т.Н., Горбачевских К.А., Криушин М.В., Орлов А.А., Комелькова М.В., Платковский П.О. Биоминеральные добавки для самозалечивания бетона // Вестник МГСУ. 2024. Т. 19. Вып. 4. С. 569–579. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.4.569-579

Автор, ответственный за переписку: Тамара Николаевна Черных, chernykh@susu.ru.

Biom mineral additives for self-healing of concrete

Tamara N. Chernykh, Kirill A. Gorbachevskykh, Mikhail V. Kriushin,
Aleksander A. Orlov, Maria V. Komelkova, Pavel O. Platkovskii

South Ural State University (National Research University) (SUSU (NRU)); Chelyabinsk, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. The reasons for the reduction of durability of flexural structures due to the violation of the protective layer of reinforcement are considered. It breaks down when cracks form. Cracks can self-heal by various methods, the most effective of which is microbial-induced precipitation of calcium carbonate.

Materials and methods. *Bacillus subtilis* strains VKM B-70 and VKM B-501 (All-Russian Collection of Microorganisms), microsilica, metakaolin, and fly ash were used. Bacterial activity was assessed by culturing bacterial strains from tablet specimens. The pH of the specimens was determined using the pH meter. The crack growth rate was assessed by visual inspection of the tablet specimens by the optical microscope.

Results. The results of the experiment on selection of optimal size of alginate bacterial granules for biom mineral additives are shown. The effect of biom mineral additives of various compositions on the overgrowth of cracks with a width of 100 to 500 μ m

was studied. The effect of increasing bacterial activity in the presence of the pozzolanic component is shown. The relationship between the alkalinity of the specimen medium and bacterial activity was revealed.

Conclusions. The recommended granule diameter is 1–1.8 mm. The bacterial activity in such granules increases in the presence of pozzolanic component in the composition of the additive. Fly ash was most effective in formulations with *Bacillus subtilis* bacteria due to its ability to lower the pH of cement-sand compositions. By lowering the pH, conditions that are more favourable are created for the vital activity of bacteria. When using complex biomineral additives, there is a significant increase in the rate of crack healing, which will allow self-healing of cracks with a width of 100 microns in just five water-air cycles.

KEYWORDS: *Bacillus subtilis*, pozzolanic additives, self-healing, cracks, concrete, mortar

Acknowledgements. The study was financially supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (State Assignment for Basic Research No. FENU-2023-0012 (2023012Г3)).

FOR CITATION: Chernykh T.N., Gorbachevskiyh K.A., Kriushin M.V., Orlov A.A., Komelkova M.V., Platkovskii P.O. Biomineral additives for self-healing of concrete. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2024; 19(4):569-579. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.4.569-579 (rus.).

Corresponding author: Tamara N. Chernykh, chernykh@susu.ru.

ВВЕДЕНИЕ

К железобетону современных уникальных зданий и сооружений, срок службы которых составляет 100 и более лет, предъявляются высокие требования по долговечности. Трещинообразование — одна из основных проблем снижения долговечности железобетона. К образованию трещин могут привести усадочные явления; технологические ошибки при изготовлении и укладке бетонной смеси; физические воздействия при эксплуатации, превышающие расчетные значения. Причиной снижения долговечности при трещинообразовании является не столько потеря прочности бетоном, сколько нарушение защитного слоя арматуры. Зачастую ремонт и восстановление железобетонных конструкций приводят к большим затратам материальных и трудовых ресурсов, а иногда и невозможны. В таких ситуациях самозалечивание трещин бетона — реальная возможность продлить срок службы конструкций. Для реализации процесса самозалечивания в настоящее время учеными предложено несколько оптимальных методов искусственного самовосстановления: с использованием полимеров с эффектом памяти, инкапсулированных питательных веществ, питательной сети и микробно-индуцированное осаждение карбоната кальция [1, 2]. Кроме того, цементные материалы склонны к самозалечиванию трещин. Материалы на основе цемента обладают способностью к самовосстановлению, что позволяет им герметизировать и заживлять микротрещины вследствие остаточного ресурса портландцемента и процессов карбонизации портландита [3–6].

Наиболее эффективным способом искусственного самовосстановления на сегодняшний день считается микробно-индуцированное осаждение карбоната кальция. Это естественный биологический процесс, при котором микробы производят неорганические материалы в рамках своей основной метаболической активности. Данная технология широко изучена [6–12] и перспективна в направлении внедрения самовосстанавливающихся бетонов в практику. Однако для надежного протекания самовос-

становления необходимо создать определенные условия.

1. Источник самозалечивания должен быть готов к распространению или находиться в трещине, при растрескивании он должен активизироваться, поэтому чаще всего микробный агент вводят в виде капсул [13–16], способных разрушаться при прохождении через них трещины, например, используют гранулы на основе отвержденного альгината кальция [17].

2. После разрушения капсулы к аэробным бактериям должны начать поступать воздух и влага с растворенными питательными веществами, заранее введенными в бетон, благодаря чему они активизируются и запускают процессы жизнедеятельности [18]. Весь процесс самозалечивания должен проходить в диапазоне условий эксплуатации, достаточном для полного залечивания трещин. С этой точки зрения наиболее эффективно использовать эффект самозалечивания в конструкциях, подвергающихся хотя бы периодическому увлажнению, или работающих во влажном воздухе, так как вода служит проводником питательных веществ для бактерий.

3. До трещинообразования источнику самозалечивания необходимо сохранять способность к активизации в течение всего срока службы конструкции, поэтому следует применять штаммы бактерий, способные долгое время находиться в состоянии спор, не погибая, и максимально активизироваться при трещинообразовании.

Известно, что биодобавки из бактерий вида *Bacillus subtilis* [19, 7] могут залечивать трещины, возникающие в строительных конструкциях под действием нагрузок или агрессивной окружающей среды. Бактерии *Bacillus subtilis* при наличии кальцийсодержащего питательного вещества, например лактата кальция, в процессе жизнедеятельности выделяют карбонат кальция (кальцит) [20, 21], который кристаллизуется в трещинах и постепенно заполняет их, восстанавливая сплошность строительных материалов [22].

Согласно биологической характеристике штамма *Bacillus subtilis*¹, активный рост бактерий происходит при pH от 4,5 до 8,0. При этом обычные цементные бетоны, растворы и сухие строительные смеси имеют pH не менее 11,5 [23]. В связи с чем эффективность залечивания трещин без учета уровня pH среды значительно снижается и не может достоверно прогнозироваться, поскольку обычно уровень pH цементных материалов является неблагоприятным для деятельности бактерий.

Цель исследования — создание концепции биоминеральных добавок для самовосстанавливающегося бетона на основе бактерий *Bacillus subtilis* и оценка его способности к самозалечиванию трещин.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В качестве биоактивного компонента добавки использовали штаммы *Bacillus subtilis* VKM В-70 и VKM В-501 (всероссийская коллекция микроорганизмов), способные осаждать кальцит. В качестве питательной среды для выращивания штамма применяли универсальный стерильный жидкий мясопептонный бульон. Штаммы *Bacillus subtilis* высевали на питательную бульонную среду, а после достижения максимума (10^8 КОЕ/мл) бактериальный бульон использовали для изготовления гранул.

Для получения гранул сначала смешивали бульон с различным количеством альгината натрия до полного усреднения, что позволяло регулировать вязкость жидкости. Полученную жидкость медленно закачивали в иглу шприца с помощью перистальтического насоса, который затем доставлял капли размером 0,8–3,2 мм в емкость с 2 %-ным раствором хлорида кальция, поставленную на магнитную мешалку, с образованием отвержденных по поверхности гранул. Готовые гранулы подсушивали в течение 30 мин на воздухе и окатывали в смеси порошкообразных компонентов: пуццолана и лактата кальция.

Использовали пуццолановые добавки трех видов: микрокремнезем (МК-85, (побочный продукт производства ферросилиция Челябинского электрометаллургического завода)), метакаолин (МТК, произведен из природного каолина месторождения Журавлиный Лог), зола уноса (ЗУ, продукт от сжигания каменного угля на Рефтинской ГРЭС).

Соотношения компонентов в добавках, полученные в ходе предварительного эксперимента, составляли: гранулы:метакаолин 2:1, гранулы:микрокремнезем 1:1 и гранулы:зола уноса 1:4. Выбор соотношения гранулы:пуццолан проводили на уровне предварительного эксперимента по эффективности самозалечивания образцов без бактерий. Лактат

кальция, который служит питательным веществом для бактерий и источником кальция для залечивающего агента, вводили в количестве 15 % от массы гранул.

Для эксперимента использовали портландцемент ЦЕМ 42,5Н без добавок, изготовленный из клинкера 96,5 % и двуводного сульфата кальция в виде природного гипса 3,5 %.

Готовили смесь цемента и стандартного полифракционного песка в соотношении портландцемент:песок 1:3, к которой добавляли биоминеральную добавку. Смесь тщательно перемешивали всухую, затем с водой при одинаковом водоцементном отношении 0,4.

Из полученной смеси изготавливали образцы различных размеров:

- образцы-таблетки диаметром 10 мм и толщиной 5 мм, которые 28 сут твердели при нормальных условиях, после чего в них искусственно создавали трещину, прикладывая с двух сторон сжимающие нагрузки с помощью тисков; образцы с шириной трещины менее 100 и более 500 мкм отбраковывали (рис. 1);

- образцы-балочки размерами 40 × 40 × 160 мм для испытания на прочность, которые до 28 сут твердели при нормальных условиях, образцы испытывали разрушением на прочность при изгибе и сжатии в возрасте 28 сут.

Образцы-таблетки после образования трещины фиксировали на предметном стекле с помощью водостойкого клея, затем образцы твердели циклически (12 ч в воде, после чего 12 ч на воздухе при относительной влажности воздуха 60 % ± 2°).

Оценку выживаемости бактерий выполняли путем культивирования бактериальных штаммов из образцов-таблеток. 1 г растертого до прохождения через сито с ячейкой 0,08 мм образца-таблетки смешивали с 10 мл физраствора. Для определения общей бактериальной обсемененности (общего микробного числа) жидкость с порошком взбалтывали и сразу отбирали 1,0 см³ с помощью шприца, затем помещали в чашку Петри и заливали расплавленным мясо-пептонным агаром. После

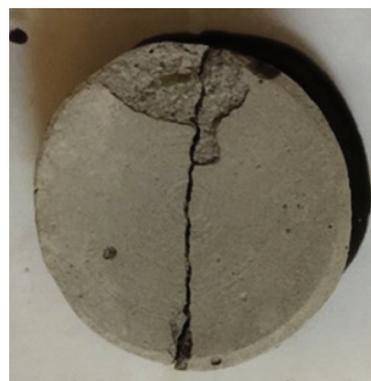


Рис. 1. Образец-таблетка с заложённой трещиной

Fig. 1. Specimen tablet with embedded crack

¹ МУК 4.2.2770–10. Метод микробиологического измерения концентрации клеток микроорганизма. М. : Федеральный центр гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора, 2011. 20 с.

застывания среды чашки с посевами вверх дном помещали в термостат при температуре 37 °С. Подсчет выросших колоний производили через 72 ч. Количество колоний, выросших на чашке, умножали на 10 для определения общего количества колониеобразующих единиц (КОЕ) на 1 г образца-таблетки (МР 4.2.0220–20). Общее микробное число на 1 г образца-таблетки равно среднему количеству КОЕ на 1 г образца-таблетки. Бактериальную культуру идентифицировали визуально по морфологическим свойствам, а также по микроскопическим свойствам путем изучения мазков методом иммерсионной микроскопии, для чего приготавливали препараты фиксированных клеток на предметных стеклах, после фиксации препараты окрашивали метиленовым синим, по Граму и методом Ожешко для спорообразующих культур.

Определение рН образцов проводили с помощью рН-метра testo 206, точность измерения $\pm 0,02$ рН.

Оценку скорости зарастания трещин осуществили с помощью визуального осмотра образцов-таблеток под оптическим микроскопом ММН-2.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Для регулирования размера капли и, соответственно, размера отвержденной гранулы использовали различное количество альгината натрия. При увеличении концентрации альгината натрия гранулы получаются закономерно большего диаметра (рис. 2, 3).

Чем меньше гранула, тем выше вероятность ее нахождения на пути образующейся трещины, поэтому нужно стремиться к уменьшению размера гранул. Для оценки влияния введения гранул на прочность цементно-песчаных композиций провели эксперимент на образцах с содержанием гранул 1 %, соответствующих вероятности их нахождения на пути трещины (рассчитано математически при идеально равномерном распределении), прочности при сжатии и изгибе приведены в табл. 1.

По результатам табл. 1 видно, что введение альгинатных гранул в состав цементно-песчаной смеси приводит к снижению прочности, при этом прочность при сжатии образцов с гранулами диаметром до 1,81 мм изменяется незначительно, а при повышении диаметра начинает существенно снижаться.

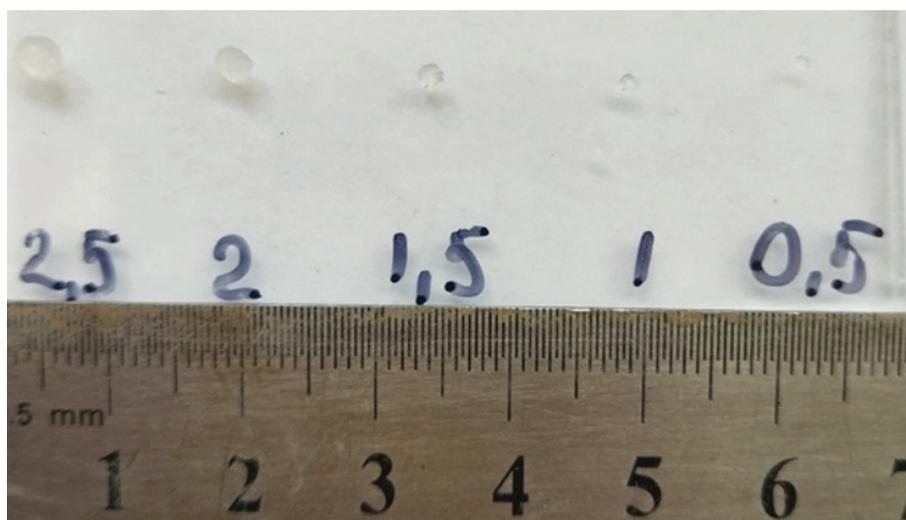


Рис. 2. Внешний вид гранул при различном количестве альгината натрия в бактериальном бульоне

Fig. 2. Photo of granules with different amounts of sodium alginate in bacterial broth

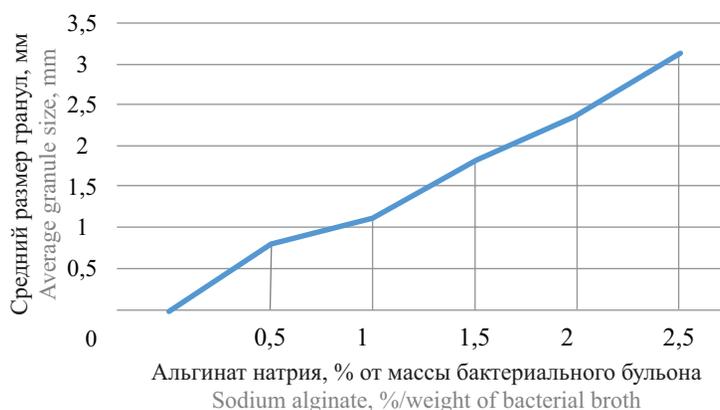


Рис. 3. Изменение размера гранул в зависимости от количества альгината натрия в бактериальном бульоне

Fig. 3. Change in the size of granules depending on the amount of sodium alginate in the bacterial broth

Табл. 1. Прочность цементно-песчаных образцов в зависимости от размера гранул**Table 1.** The strength of cement-sand specimens depending on the size of granules

Альгинат натрия, % от массы бактериального бульона Sodium alginate, % weight of bacterial broth	Средний размер гранул, мм Average granule size, mm	Вероятность нахождения гранулы на пути трещины, % Probability to be a granule on the crack path, %	Прочность при изгибе, МПа Bending strength, MPa	Прочность при сжатии, МПа Compressive strength, MPa
–	–	0	5,4	54,6
0,5	0,81	100,00	5,2	50,0
1	1,12	100,00	4,9	50,1
1,5	1,81	100,00	4,8	50,0
2	2,37	88,08	4,6	47,4
2,5	3,14	71,51	4,8	46,2

ся, что, вероятно, связано с тем, что крупные гранулы, не имея собственной прочности, выступают значимыми концентраторами напряжений. Также при ограничении диаметра гранулы 1,8 мм можно обеспечить наличие гранулы в трещине с максимальной вероятностью. С другой стороны, технологически удобно получать гранулы диаметром не менее 1 мм, поэтому рекомендуемым диапазоном диаметров гранул является 1,0–1,8 мм.

Оценку активности бактерий в среде цементно-песчаных композиций проводили на образцах-таблетках в 90 сут их твердения при различных дозировках биоминеральных добавок, так чтобы дозировка гранул диаметром 1–1,5 мм без порошкообразных веществ составляла 5 %. Результаты, представленные в табл. 2, показывают корреляцию между рН среды образца, заданного пуццоланом, и количеством колоний (общим микробным числом).

Штамм ВКМ-501 показал меньшую активность в среде цементно-песчаных образцов. При этом для обоих штаммов даже небольшое уменьшение рН-образцов приводило к более активному росту бактерий. Как видно по результатам оценки обще-

го микробного числа, с помощью изменения рН-среды пуццолановым компонентом добавки увеличилась активность бактерий, что может увеличить скорость самозалечивания.

Способность к зарастанию трещин устанавливали на образцах-таблетках с биоминеральными добавками, состоящими из бактериальных гранул диаметром 1–1,5 мм с бактериями более активного штамма ВКМ-70, лактата кальция и пуццолана, а также для сравнения на добавках того же состава, но без бактериальных гранул. Фотографии трещин в процессе зарастания приведены на рис. 4. Средняя скорость закрытия трещин представлена в табл. 3.

В результате эксперимента установлено значительное увеличение скорости зарастания трещин при использовании комплексных биоминеральных добавок, что позволит обеспечить закрытие трещин шириной 0,1 мм всего за 5 циклов «вода – воздух», что хорошо укладывается в разные климатические условия РФ, кроме вечной мерзлоты. Увеличение скорости закрытия трещин, вероятно, связано с установленным ранее повышением активности бактерий в присутствии пуццолановых добавок.

Табл. 2. Оценка среднего количества колоний бактерий (общего микробного числа) в среде цементно-песчаных композиций в возрасте 90 суток**Table 2.** Estimation of the average number of bacterial colonies (total microbial number) in the medium of cement-sand compositions at the age of 90 days

Вид пуццолана в составе биоминеральной добавки Type of pozzolan in biominerall additive	рН образца-таблетки PH tablet specimen	Общее микробное число на 1 г образца-таблетки Total bacteria count (TBC) in 1 g tablet specimen	
		ВКМ-70 VKM-70	ВКМ-501 VKM-501
Без пуццолана Without pozzolan	11,00	100	30
МК-85 Microsilica	10,95	110	40
МТК Metakaolin	10,65	110	50
ЗУ Fly ash	10,50	150	70

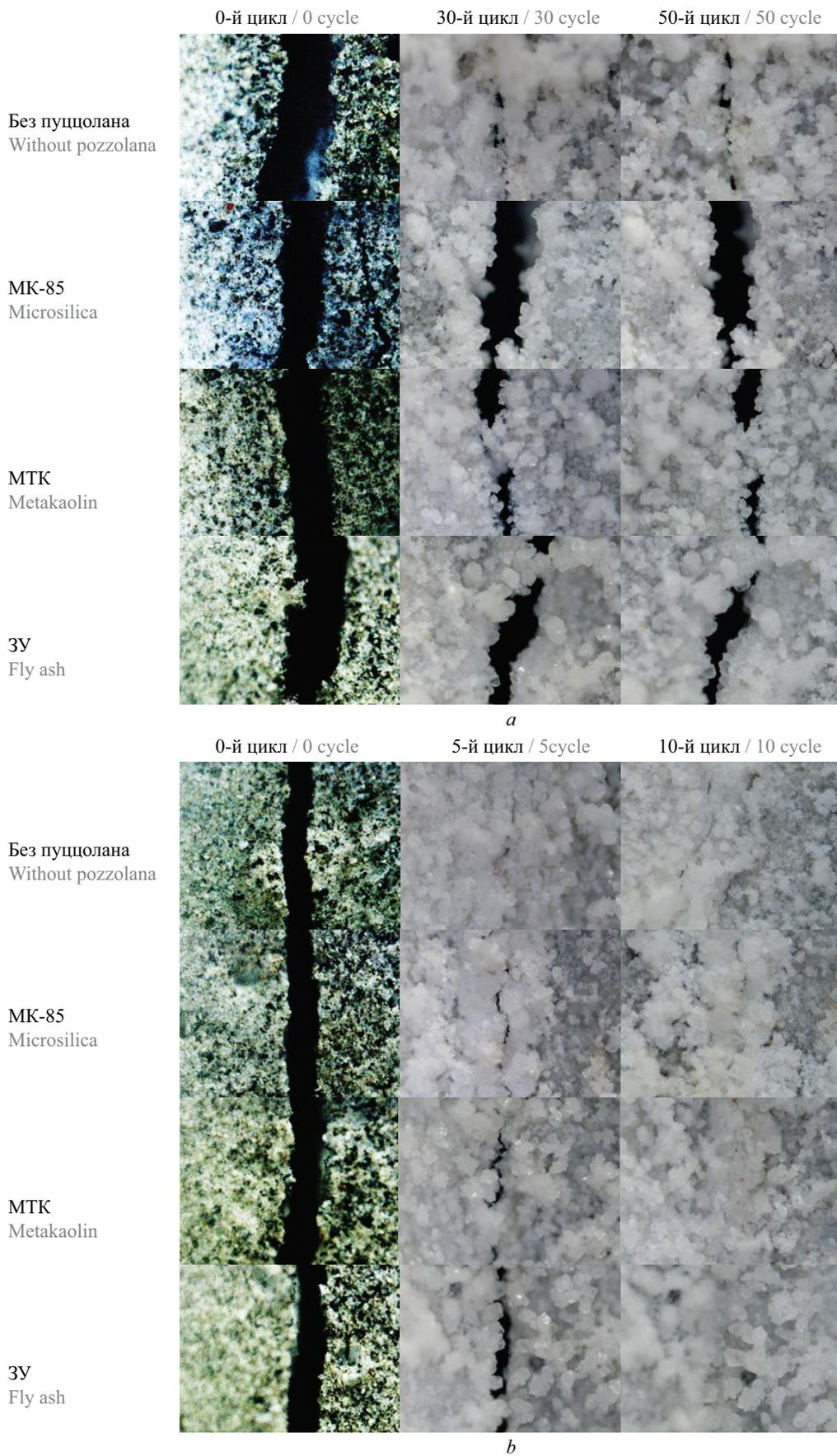


Рис. 4. Фотографии зарастания трещин в образцах-таблетках: *a* — без бактериальных гранул; *b* — с бактериальными гранулами

Fig. 4. Photographs of crack healing in tablet samples: *a* — without bacterial granules; *b* — with bacterial granules

Табл. 3. Параметры зарастания трещин

Table 3. Parameters of crack healing

Состав добавки Additive composition	Средние ширины трещин в образцах-таблетках, мкм Average crack widths in tablet specimens, μm			Количество циклов, при котором закрылась самая тонкая трещина Number of cycles at which the thinnest crack closed	Средняя скорость закрытия трещин, мкм/цикл Average crack closing speed, $\mu\text{m}/\text{cycle}$
<i>Без бактериальных гранул</i> <i>Without bacterial granules</i>					
Без пуццоланов Without pozzolan	214	266	295	60	3,6
МК-85 Microsilica	162	190	190	70	2,3
МТК Metakaolin	181	195	214	70	2,4
ЗУ Fly ash	143	167	233	65	2,6
<i>С бактериальными гранулами</i> <i>With bacterial granules</i>					
Без пуццоланов Without pozzolan	102	119	124	11	8,8
МК-85 Microsilica	128	143	147	10	11,9
МТК Metakaolin	152	167	171	9	16,9
ЗУ Fly ash	119	133	143	5	22,4

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Самозалечивание трещин в цементно-песчаных композициях, содержащих биоминеральные добавки на основе пуццоланов, бактерий вида *Bacillus subtilis* и лактата кальция, исследовали путем оценки уменьшения ширины трещин исходной ширины 100–500 мкм. В процессе разработки добавки установлено, что увеличение диаметра бактериальных альгинатных гранул свыше 1,8 мм приводит к снижению прочности цементно-песчаных образцов и уменьшению вероятности нахождения гранулы в трещине при дозировке 1 %, технологически удобным является размер не менее 1 мм, поэтому

рекомендуемый диапазон — 1–1,8 мм. Активность бактерий в таких гранулах увеличивается при наличии в составе добавки пуццоланового компонента. Зола уноса по сравнению с другими видами пуццолановых добавок была наиболее эффективной в составах с бактериями *Bacillus subtilis* из-за способности снижать щелочность цементно-песчаных композиций, создавая более благоприятные условия для жизнедеятельности бактерий. Использование комплексных биоминеральных добавок для регулирования скорости залечивания трещин в цементных композициях представляется перспективным направлением развития области самозалечивания трещин бетонов.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Aytakin B., Mardani A., Yazıcı Ş. State-of-art review of bacteria-based self-healing concrete: Biomineralization process, crack healing, and mechanical properties // Construction and Building Materials. 2023. Vol. 378. P. 131198. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2023.131198
2. De Rooij M., Van Tittelboom K., De Belie N., Schlangen E. Self-healing phenomena in cement-based materials // RILEM State-of-the-Art Reports. Springer, Dordrecht, Netherlands, 2013. DOI: 10.1007/978-94-007-6624-2
3. Termkhajornkit P., Nawa T., Yamashiro Y., Saito T. Self-healing ability of fly ash–cement systems // Cement and Concrete Composites. 2009. Vol. 31. Issue 3. Pp. 195–203. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2008.12.009
4. Ter Heide N. Crack healing in hydrating concrete. Delft University of Technology, 2005.
5. Mamo G., Mattiasson B. Alkaliphiles: the emerging biological tools enhancing concrete durability // Alkaliphiles in Biotechnology. 2019. Pp. 293–342. DOI: 10.1007/10_2019_94

6. Баженов Ю.М., Ерофеев В.Т., Салман А.Д.С.Д., Смирнов В.Ф., Фомичев В.Т. Технология самовосстановления железобетонных конструкций с помощью микроорганизмов // Русский инженер. 2018. № 4 (61). С. 46–48. EDN YOOLYD.
7. Jonkers H.M., Thijssen A., van Breugel K. Bacteria mediated remediation of concrete structures // Proceedings of the second international symposium on service life design for infrastructures. 2010. Pp. 833–840.
8. Dhani N.K., Reddy M.S., Mukherjee A. Biomineralization of calcium carbonates and their engineered applications : a review // Frontiers in Microbiology. 2013. No. 4. DOI: 10.3389/fmicb.2013.00314
9. Ghosh P., Mandal S., Chattopadhyay B.D., Pal C. Use of microorganism to improve the strength of cement mortar // Cement and Concrete Research. 2005. Vol. 35. Issue 10. Pp. 1980–1983. DOI: 10.1016/j.cemconres.2005.03.005
10. Ghosh S., Biswas M., Chattopadhyay B.D., Mandal S. Microbial activity on the microstructure of bacteria modified mortar // Cement and Concrete Composites. 2009. Vol. 31. Issue 2. Pp. 93–98. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2009.01.001
11. Biswas M., Majumdar S., Chowdhury T., Chattopadhyay B., Mandal S., Halder U. et al. Bioremediase a unique protein from a novel bacterium BKH1, ushering a new hope in concrete technology // Enzyme and Microbial Technology. 2010. Vol. 46. Issue 7. Pp. 581–587. DOI: 10.1016/j.enzmictec.2010.03.005
12. Строчкова В.В., Власов Д.Ю., Франк-Каме-нецкая 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. DOI: 10.31659/0585-430X-2019-774-9-83-103. EDN JCENZK.
13. Wang J.Y., Snoeck D., Van Vlierberghe S., Verstraete W., De Belie N. Application of hydrogel encapsulated carbonate precipitating bacteria for approaching a realistic self-healing in concrete // Construction and Building Materials. 2014. Vol. 68. Pp. 110–119. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2014.06.018
14. Seifan M., Ebrahimezhad A., Ghasemi Y., Berenjian A. Microbial calcium carbonate precipitation with high affinity to fill the concrete pore space: nanobiotechnological approach // Bioprocess and Biosystems Engineering. 2018. Vol. 42. Issue 1. Pp. 37–46. DOI: 10.1007/s00449-018-2011-3
15. Seifan M., Sarmah A.K., Samani A.K., Ebrahimezhad A., Ghasemi Y., Berenjian A. Mechanical properties of bio self-healing concrete containing immobilized bacteria with iron oxide nanoparticles // Applied Microbiology and Biotechnology. 2018. Vol. 102. Issue 10. Pp. 4489–4498. DOI: 10.1007/s00253-018-8913-9
16. Иноземцев С.С., До Т.Ч. Состояние и перспективы развития технологии самовосстанавливающихся дорожных материалов // Вестник МГСУ. 2020. Т. 15. № 10. С. 1407–1424. DOI: 10.22227/1997-0935.2020.10.1407-1424
17. Wang J.Y., Soens H., Verstraete W., De Belie N. Self-healing concrete by use of microencapsulated bacterial spores // Cement and Concrete Research. 2014. Vol. 56. Pp. 139–152. DOI: 10.1016/j.cemconres.2013.11.009
18. Nielsen S.D., Koren K., Löbmann K., Hinge M., Scoma A., Kjeldsen K.U. et al. Constraints on CaCO₃ precipitation in superabsorbent polymer by aerobic bacteria // Applied Microbiology and Biotechnology. 2019. Vol. 104. Issue 1. Pp. 365–375. DOI: 10.1007/s00253-019-10215-4
19. Аль Дулайми С.Д.С. Самовосстанавливающие бетоны, модифицированные микробиологической добавкой : дис. ... канд. техн. наук. М., 2019. 310 с. EDN OVDXMN.
20. Joshi K.A., Kumthekar M.B., Ghodake V.P. Bacillus Subtilis Bacteria impregnation in concrete for enhancement in compressive strength // International Research Journal of Engineering and Technology. 2016. Vol. 3. Issue 5. Pp. 1229–1234.
21. De Leeuw N.H., Parker S.C. Surface structure and morphology of calcium carbonate polymorphs calcite, aragonite, and vaterite: an atomistic approach // The Journal of Physical Chemistry B. 1998. Vol. 102. Issue 16. Pp. 2914–2922. DOI: 10.1021/jp973210f
22. Jongvivatsakul P., Janprasit K., Nuaklong P., Pungrasmi W., Likitlersuang S. Investigation of the crack healing performance in mortar using microbially induced calcium carbonate precipitation (MICP) method // Construction and Building Materials. 2019. Vol. 212. Pp. 737–744. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.04.035
23. Леонович С.Н., Литвиновский Д.А., Чернякевич О.Ю., Степанова А.В. Прочность, трещиностойкость и долговечность конструкционного бетона при температурных коррозионных воздействиях : в 2 ч. Минск : БНТУ, 2016. 204 с. EDN RCHYPK.

Поступила в редакцию 17 сентября 2023 г.

Принята в доработанном виде 28 сентября 2023 г.

Одобрена для публикации 6 октября 2023 г.

ОБ АВТОРАХ: **Тамара Николаевна Черных** — доктор технических наук, доцент, профессор кафедры строительных материалов и изделий; **Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет) (ЮУрГУ (НИУ))**; 454080, г. Челябинск, пр-т Ленина, д. 76; РИНЦ ID: 4731125, Scopus: 6508381737, ResearcherID: K-8568-2014, ORCID: 0000-0002-4288-2115; chernykhnt@susu.ru;

Кирилл Алексеевич Горбачевских — студент Архитектурно-строительного института; **Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет) (ЮУрГУ (НИУ))**; 454080, г. Челябинск, пр-т Ленина, д. 76; kirill38964@gmail.com;

Михаил Владимирович Кriuшин — младший научный сотрудник кафедры строительных материалов и изделий; **Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет) (ЮУрГУ (НИУ))**; 454080, г. Челябинск, пр-т Ленина, д. 76; РИНЦ ID: 1147146, ResearcherID: AGU 7556-2022, ORCID: 0000-0002-6425-4531; kriushinmv@susu.ru;

Александр Анатольевич Орлов — кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой строительных материалов и изделий; **Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет) (ЮУрГУ (НИУ))**; 454080, г. Челябинск, пр-т Ленина, д. 76; SPIN-код: 3296-8955, Scopus: 56486973500, ResearcherID: K-8880-2014, ORCID: 0000-0002-4505-1587; orlovaa@susu.ru;

Мария Владимировна Комелькова — доктор биологических наук, доцент, старший научный сотрудник Научно-образовательного Российско-Китайского центра системной патологии; **Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет) (ЮУрГУ (НИУ))**; 454080, г. Челябинск, пр-т Ленина, д. 76; РИНЦ ID: 821160, Scopus: 57188550625, ResearcherID: M-6294-2016, ORCID: 0000-0003-2431-8358; komelkovamv@susu.ru;

Павел Олегович Платковский — лаборант Научно-образовательного Российско-Китайского центра системной патологии; **Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет) (ЮУрГУ (НИУ))**; 454080, г. Челябинск, пр-т Ленина, д. 76; РИНЦ ID: 934627, Scopus: 57197762232, ORCID: 0000-0002-9403-3481; paw.platkovski@yandex.ru.

Вклад авторов:

Черных Т.Н. — научное руководство, концепция исследования, написание статьи, научное редактирование текста.

Горбачевских К.А. — сбор и обработка материала.

Кriuшин М.В. — сбор и обработка материала.

Орлов А.А. — сбор и обработка материала.

Комелькова М.В. — развитие методологии, сбор и обработка материала.

Платковский П.О. — сбор материала, обработка материала.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

REFERENCES

1. Aytekin B., Mardani A., Yazıcı Ş. State-of-art review of bacteria-based self-healing concrete: Biomineralization process, crack healing, and mechanical properties. *Construction and Building Materials*. 2023; 378:131198. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2023.131198
2. De Rooij M., Van Tittelboom K., De Belie N., Schlangen E. Self-healing phenomena in cement-based materials. *RILEM State-of-the-Art Reports*. Springer, Dordrecht, Netherlands, 2013. DOI: 10.1007/978-94-007-6624-2
3. Termkhajornkit P., Nawa T., Yamashiro Y., Saito T. Self-healing ability of fly ash–cement systems. *Cement and Concrete Composites*. 2009; 31(3):195-203. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2008.12.009
4. Ter Heide N. *Crack healing in hydrating concrete*. Delft University of Technology, 2005.
5. Mamo G., Mattiasson B. Alkaliphiles: the emerging biological tools enhancing concrete durability. *Alkaliphiles in Biotechnology*. 2019; 293-342. DOI: 10.1007/10_2019_94
6. Bazhenov Yu.M., Erofeev V.T., Sal-man A.D.S.D., Smirnov V.F., Fomichev V.T. Technology of manufacture and repair of reinforced concrete structures by microorganisms. *Russian Engineer*. 2018; 4(61):46-48. EDN YOOLYD. (rus.).
7. Jonkers H.M., Thijssen A., van Breugel K. Bacteria mediated remediation of concrete structures. *Proceedings of the second international symposium on service life design for infrastructures*. 2010; 833-840.
8. Dhami N.K., Reddy M.S., Mukherjee A. Biomineralization of calcium carbonates and their engineered applications : a review. *Frontiers in Microbiology*. 2013; 4. DOI: 10.3389/fmicb.2013.00314
9. Ghosh P., Mandal S., Chattopadhyay B.D., Pal C. Use of microorganism to improve the strength of cement mortar. *Cement and Concrete Research*. 2005; 35(10):1980-1983. DOI: 10.1016/j.cemconres.2005.03.005
10. Ghosh S., Biswas M., Chattopadhyay B.D., Mandal S. Microbial activity on the microstructure of bacteria modified mortar. *Cement and Concrete Composites*. 2009; 31(2):93-98. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2009.01.001
11. Biswas M., Majumdar S., Chowdhury T., Chattopadhyay B., Mandal S., Halder U. et al. Bioremediase a unique protein from a novel bacterium BKH1, ushering a new hope in concrete technology. *Enzyme*

and *Microbial Technology*. 2010; 46(7):581-587. DOI: 10.1016/j.enzmictec.2010.03.005

12. 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. *Construction Materials*. 2019; 9:83. DOI: 10.31659/0585-430X-2019-774-9-83-103. EDN JCENZK. (rus.)

13. Wang J.Y., Snoeck D., Van Vlierberghe S., Verstraete W., De Belie N. Application of hydrogel encapsulated carbonate precipitating bacteria for approaching a realistic self-healing in concrete. *Construction and Building Materials*. 2014; 68:110-119. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2014.06.018

14. Seifan M., Ebrahiminezhad A., Ghasemi Y., Berenjian A. Microbial calcium carbonate precipitation with high affinity to fill the concrete pore space: nanobiotechnological approach. *Bioprocess and Biosystems Engineering*. 2018; 42(1):37-46. DOI: 10.1007/s00449-018-2011-3

15. Seifan M., Sarmah A.K., Samani A.K., Ebrahiminezhad A., Ghasemi Y., Berenjian A. Mechanical properties of bio self-healing concrete containing immobilized bacteria with iron oxide nanoparticles. *Applied Microbiology and Biotechnology*. 2018; 102(10):4489-4498. DOI: 10.1007/s00253-018-8913-9

16. Inozemtcev S.S., Toan Trong Do. Technology of self-healing road pavements: current status and development prospects. *Vestnik MGSU [Monthly Journal on Construction and Architecture]*. 2020; 15(10): 1407-1424. DOI: 10.22227/1997-0935.2020.10.1407-1424 (rus.).

17. Wang J.Y., Soens H., Verstraete W., De Belie N. Self-healing concrete by use of microencapsulated bacterial spores. *Cement and Concrete Research*. 2014; 56:139-152. DOI: 10.1016/j.cemconres.2013.11.009

18. Nielsen S.D., Koren K., Löbmann K., Hinge M., Scoma A., Kjeldsen K.U. et al. Constraints on CaCO₃ precipitation in superabsorbent polymer by aerobic bacteria. *Applied Microbiology and Biotechnology*. 2019; 104(1):365-375. DOI: 10.1007/s00253-019-10215-4

19. Al' Dulaymi S.D.S. *Self-healing concretes modified with a microbiological additive : thesis of candidate of technical science*. Moscow, 2019; 310. EDN OVDXMN. (rus.).

20. Joshi K.A., Kumthekar M.B., Ghodake V.P. Bacillus Subtilis Bacteria Impregnation in Concrete for Enhancement in Compressive Strength. *International Research Journal of Engineering and Technology*. 2016; 3(5):1229-1234.

21. De Leeuw N.H., Parker S.C. Surface structure and morphology of calcium carbonate polymorphs calcite, aragonite, and vaterite: An atomistic approach. *The Journal of Physical Chemistry B*. 1998; 102(16):2914-2922. DOI: 10.1021/jp973210f

22. Jongvivatsakul P., Janpravit K., Nuaklong P., Pungrasmi W., Likitlersuang S. Investigation of the crack healing performance in mortar using microbially induced calcium carbonate precipitation (MICP) method. *Construction and Building Materials*. 2019; 212:737-744. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.04.035

23. Leonovich S.N., Litvinovskiy D.A., Chernyakevich O.Yu., Stepanova A.V. *Strength, crack resistance and durability of structural concrete under temperature and corrosion effects : in 2 parts*. Minsk, BNTU, 2016; 204. EDN RCHYPK. (rus.).

Received September 17, 2023.

Adopted in revised form on September 28, 2023.

Approved for publication on October 6, 2023.

BIONOTES: **Tamara N. Chernykh** — Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Professor of the Department of Building Materials and Products; **South Ural State University (National Research University) (SUSU (NRU))**; 76 Lenina prospekt, Chelyabinsk, 454080, Russian Federation; ID RSCI: 4731125, Scopus: 6508381737, ResearcherID: K-8568-2014, ORCID: 0000-0002-4288-2115; chernykhnt@susu.ru;

Kirill A. Gorbachevskykh — student of the Institute of Architecture and Civil Engineering; **South Ural State University (National Research University) (SUSU (NRU))**; 76, Lenina prospekt, Chelyabinsk, 454080, Russian Federation; kirill38964@gmail.com;

Mikhail V. Kriuшин — junior researcher Department of Building Materials and Products; **South Ural State University (National Research University) (SUSU (NRU))**; 76, Lenina prospekt, Chelyabinsk, 454080, Russian Federation; ID RSCI: 1147146, ResearcherID: AGU 7556-2022, ORCID: 0000-0002-6425-4531; kriushinmv@susu.ru;

Aleksander A. Orlov — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Department of Building Materials and Products; **South Ural State University (National Research University) (SUSU (NRU))**; 76, Lenina prospekt, Chelyabinsk, 454080, Russian Federation; SPIN-code: 3296-8955, Scopus: 56486973500, ResearcherID: K-8880-2014, ORCID: 0000-0002-4505-1587; orlovvaa@susu.ru;

Maria V. Komelkova — Doctor of Technical Sciences, Senior Research Associate of the Scientific and Educational Russian-Chinese Center for Systemic Pathology; **South Ural State University (National Research University) (SUSU (NRU))**; 76, Lenina prospekt, Chelyabinsk, 454080, Russian Federation; ID RSCI: 821160, Scopus: 57188550625, ResearcherID: M-6294-2016, ORCID: 0000-0003-2431-8358; komelkovamv@susu.ru;

Pavel O. Platkovskii — laboratory assistant of the Scientific and Educational Russian-Chinese Center for Systemic Pathology; **South Ural State University (National Research University) (SUSU (NRU))**; 76, Lenina prospekt, Chelyabinsk, 454080, Russian Federation; ID RSCI: 934627, Scopus: 57197762232, ORCID: 0000-0002-9403-3481; paw.platkovski@yandex.ru.

Contribution of the authors:

Tamara N. Chernykh — scientific management, concept of research, article writing, scientific text editing.

Kirill A. Gorbachevskykh — research, illustrations.

Mikhail V. Kriushin — research, illustrations.

Aleksander A. Orlov — research, illustrations.

Maria V. Komelkova — development of methodology, research.

Pavel O. Platkovskii — research, illustrations.

The authors declare no conflict of interest.