ИЗМЕНЕНИЕ СВОЙСТВ СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ ПРИ ВВЕДЕНИИ В НИХ БИОМАССЫ БАКТЕРИЙ С УРЕАЗНОЙ АКТИВНОСТЬЮ¹

Н.А. Степанов, Е.Н. Ефременко, М.Г. Бруяко*, А.И. Григорьева*

*Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова (МГУ им. Ломоносова),
119991, ГСП-1, г. Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 3;*

**Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет
(НИУ МГСУ), 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26*

АННОТАЦИЯ. В статье описаны результаты исследований по приданию строительным материалам на основе минеральных вяжущих веществ способности самовосстановления при введении в растворные смеси микроконтейнеров, содержащих питательную среду для биомассы аэробных бактерий с уреазной активностью, обеспечивающих направленный синтез карбоната кальция в качестве коагулирующего вещества при образовании микродефектов в структуре материала.

Статья содержит результаты исследования по выявлению наиболее активных форм биологического материала, адаптированных к условиям формирования строительных изделий на основе минеральных вяжущих веществ, и изучению их влияния на реологические, технологические и эксплуатационные свойства модифицированных строительных растворов. В качестве минеральных вяжущих веществ для получения растворных смесей с различным значением водородного показателя в работе использовались портландцемент и гипсовое вяжущее. Эффективность действия клеток бактерий определялась по уровню их уреазной активности. Показаны изменения значений водоцементного отношения в зависимости от концентрации биомассы, вводимой в состав растворных строительных смесей, изменения уреазной активности клеток микроорганизмов в зависимости от кислотности pH среды, использования высокопористых природных и искусственных материалов в качестве носителей-микроконтейнеров.

Полученные результаты позволяют сделать вывод о существенном изменении реологических свойств цементно-песчаных растворов вследствие наличия биологических поверхностно-активных веществ, входящих в состав клеток микроорганизмов. Установлено влияние изменения концентрации клеток на сроки схватывания и на прочностные характеристики цементно-песчаных растворов.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: самовосстанавливающие материалы, пластификаторы, биоПАВ, интеллектуальные материалы, бетоны, строительные растворы, биомасса

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: 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. Вып. 7 (106). С. 788–796. DOI: 10.22227/1997-0935.2017.7.788-796

CHANGES OF CONSTRUCTION MATERIAL PROPERTIES WITH ADDITION OF BACTERIAL CELL BIOMASS POSSESSING UREASE ACTIVITY INTO THE MATERIALS

N.A. Stepanov, E.N. Efremenko, M.G. Bruyako*, A.I. Grigoreva*

Lomonosov Moscow State University (MSU), 1 Lenin Hills, Moscow, 119991, Russian Federation;

**Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU),
26 Yaroslavl'skoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation*

ABSTRACT. Results of research that aimed on appearance of self-healing ability between characteristics of construction materials and products, based on mineral binding substances, via bioprocesses of selective action, resulting from the introduction of bacterial biomass into the composition of mortar and construction cement mixes were shown in the article.

The article contains the results of revealing the most active forms of biological material adapted to the conditions of formation of building products based on mineral binders and results of investigating their effect on the rheological, technological and operational properties of mortars that are modified. Portland cement and gypsum binder were used as mineral binders to produce solution mixtures with different pH values. Efficiency of bacterial cell action was determined via estimation of cell urease activity. The variations of values of water-cement ratio appeared to be pronounced in dependence on: concentrations of introduced cell biomass content; changes in the urease activity of the bacterial cells, varied with the values of pH of used medium; the use of both highly porous natural and artificial materials as microcontainer carriers.

The obtained results make it possible to conclude about significant change in the rheological properties of cement-sand mortars owing to the presence of biological surfactants entering into a content of bacterial cells. The influence of cells concentration on a setting time and strength characteristics of cement-sand mortars was determined.

¹ Работа выполнена при финансовой поддержке Фонда содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере (договор № 9792ГУ2015 от 15.02.2016).

KEY WORDS: self-healing materials, plasticizing agent, biosurfactants, intellectual materials, concrete, construction cement, biomass

FOR CITATION: Stepanov N.A., Efremenko E.N., Bruyako M.G., Grigoreva A.I. *Izmenenie 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* [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]. 2017, vol. 12, issue 7 (106), pp. 788–796. DOI: 10.22227/1997-0935.2017.7.788-796

Всем известным на сегодняшний день строительным материалам на основе минеральных вяжущих веществ свойственно снижение эксплуатационных характеристик под влиянием неблагоприятных условий внешней окружающей среды. С этой целью для повышения срока службы конструкций традиционно проводится постоянное обслуживание и последующие восстановительные ремонты. Одним из способов поддержания исходных свойств для материалов является придание им эффекта самовосстановления путем введения в процессе изготовления специально разработанной добавки, содержащей биоактивный компонент.

Общий принцип процесса самовосстановления заключается в том, что при воздействии на строительные конструкции внешних различных типов нагрузок (статических, динамических, в сочетании с возможным присутствием агрессивной химической средой) в поверхностных и приповерхностных слоях материала возникают микротрещины, в которые проникает воздух и влага из окружающей среды. В этих условиях бактерии, предварительно введенные в состав материала совместно с питательной средой, активируются, и в результате происходящих биохимических процессов образуется карбонат кальция, выполняющий кольматирующие функции, обеспечивая процессы самовосстановления структуры и эксплуатационных характеристик материала. После заполнения дефектного объема трещины карбонатом кальция необходимые для обеспечения активности клеток воздух и влаги перестают поступать и микроорганизмы переходят в состояние анабиоза.

Для реализации эффекта самовосстановления строительных материалов на основе минеральных вяжущих веществ решались следующие задачи: исследовать и выбрать наиболее эффективные виды и формы микроорганизмов для обеспечения самовосстановления в период эксплуатации структуры цементных растворов, определить влияние изменения внешних условий на активность выбранных микроорганизмов и путей поддержания их ферментативной активности; определить эффективность участия микроорганизмов в самовосстановлении строительных материалов, изделий и конструкций на основе различных минеральных вяжущих; выбрать питательную среду и определить ее оптимальную концентрацию для обеспечения процессов самовосстановления материала.

В настоящее время наблюдается повышенный интерес к поверхностно-активным веществам био-

генного происхождения, называемым биосурфактанты (биоПАВ), как экологически безопасным и экономически эффективным поверхностно-активным агентам [1, 2], которые синтезируются различными видами бактерий, дрожжей, микроводорослей, мицелиальных грибов [3]. БиоПАВ находят применение в фармакологии, в автомобильной, строительной и горнодобывающей промышленности, для ремедиации почв и вод и др. [4–7].

Анализ современных публикаций на тему создания интеллектуальных самовосстанавливающихся строительных материалов показал предпочтительность использования биологических процессов для обеспечения пролонгированного эффекта восстановления структуры материалов по сравнению с другими известными способами [8–14]. Поэтому были проведены исследования по определению влияния на реологические свойства и прочностные характеристики введенных в состав биомодифицированных строительных растворов биомассы различных бактерий.

В литературных источниках [2, 15] приводятся данные о влиянии биоПАВ на реологические свойства и конечные характеристики цементно-песчаных и бетонных растворов. В частности, в работе [2] отмечается, что повышение содержания биомассы клеток более 0,02 % от массы цемента негативно сказывается на прочностных характеристиках материалов и изделий на основе минеральных вяжущих. Так, на графиках (рис. 2 и 3) видно, что превышение используемых концентраций выбранного типа клеток более 0,2 % приводит к уменьшению прочностных показателей изделий.

Определенная концентрация влияет положительно на прочностные характеристики из-за возможности снижения количества вводимой воды затворения. При дальнейшем увеличении количества введенных добавок происходит увеличение толщины пленки сорбированного ПАВа на частицах вяжущего и поверхности гидратных новообразований, что препятствует доступу воды затворения к поверхности гидратирующихся зерен [16].

Результаты данной работы применимы для улучшения технологии метода увеличения долговечности и надежности строительных конструкций за счет эффекта самовосстановления строительных материалов. Использование разработанной биодобавки позволит осуществлять процесс самовосстановления строительных конструкций на самых ранних стадиях образования микродефектов путем кольматирования последних продуктами жизнедея-

ятельности введенных в тело материала биомассы клеток микроорганизмов с уреазной активностью.

Методы обеспечения процессов самовосстановления бетонов с использованием непатогенных бактерий являются экологически безопасными, позволяют снизить затраты на обслуживание, упрощают технологию проведения ремонтных работ, повышают производительность при проведении ремонтно-восстановительных работ, подходят для увеличения долговечности конструкций любой сложности промышленных и гражданских зданий и сооружений, а также уникальных памятников архитектуры и скульптурных памятников.

В качестве исходных компонентов в работе использовались: гипсовое вяжущее Г4БП², портландцемент ПЦ400Д0³, мелкий заполнитель кварцевый песок МК2,1⁴, вода для затворения минеральных вяжущих соответствует ГОСТ 23732-79⁵, природный цеолит фракции 0,32...0,63 мм (выпуска ЗАО «Орловский цеолит», Орловская область, Россия), гранулированное пеностекло «Термогласс»⁶, марка по зерновому составу — 2.

Прочность гипсовых образцов определялась в соответствии с ГОСТ 23789-79⁷. Водоцементное отношение, прочность на растяжение при изгибе и на сжатие, сроки схватывания проводились по ГОСТ 30744-2001⁸.

Изображения поверхности цементно-песчаных растворов были получены на растровом электронном микроскопе FEI Quanta 200, характеризующемся максимальным увеличением до 100 000 крат и апертурой 7,5...120 мкм.

Определение уреазной активности бактериальных штаммов проводилось с использованием реактива Несслера на спектрофотометре Agilent UV-853 при длине волны 400 нм. Подготовка проб проводилась следующим образом: 5 мл суспензии клеток бактерий помещали в колбы объемом 100 мл куда вносили 10 мл 1М калий-фосфатного буфера (рН 7) и 10 мл 10%-ного раствора мочевины. Колбы закрывали ватно-марлевыми пробками, тщательно встряхивали и помещали в термостат, где инкубировали в течение 24 ч при 37 °С. После чего из каждой пробирки отбирали пробы объемом 1 мл и центрифугировали при 6000 об/мин в течение 5 мин.

² ГОСТ 125-79**. Вяжущие гипсовые.

³ ГОСТ 25328-82. Цемент для строительных растворов.

⁴ ГОСТ 8736-2014. Песок для строительных работ. Технические условия.

⁵ ГОСТ 23732-79. Вода для бетонов и растворов. Технические условия.

⁶ ТУ 5914-001-84843324-2008. Изделия из пеностекла т. м. «Термогласс».

⁷ ГОСТ 23789-79. Вяжущие гипсовые. Методы испытаний.

⁸ ГОСТ 30744-2001. Цементы. Методы испытаний с использованием полифракционного песка.

Для определения количества аммиачного азота в реакционной смеси 1 мл центрифугата помещался в пенициллиновый флакон объемом 15 мл, в который добавляли 3,6 мл дистиллированной воды, а затем прибавляли 0,2 мл 50 %-ного раствора сегнетовой соли и 0,2 мл реактива Несслера. После добавления каждого реактива смесь тщательно перемешивали. Через 5 мин измеряли оптическую плотность полученных растворов. Если раствор опалесцирует, прибавляли еще 0,2 мл сегнетовой соли.

Единица активности уреазы — это 1 мг NH_4 /мг/мин. Количество аммиачного азота вычисляется по стандартной калибровочной кривой. Для этого используют растворы NH_4Cl с точно известной концентрацией ионов NH_4^+ , мг/мл. Количество аммиачного азота находят по стандартной калибровочной кривой.

Исследование и выбор наиболее эффективных видов и форм микроорганизмов для обеспечения самовосстановления цементных композитов. В период твердения изменение значений кислотности рН и температуры растворных и бетонных смесей в значительной степени зависит от химической природы используемых минеральных вяжущих и внешних условий.

Так, значение рН для гипсовых строительных смесей лежит в пределах 6,8...7,5, для строительных растворов и бетонов на основе портландцемента может достигать 12...12,5. В результате экзотермических процессов при гидратации цементных и гипсовых вяжущих наблюдается повышение температуры формовочных смесей. В свою очередь, скорость нарастания значений температуры и условия твердения могут негативно влиять на активность и жизнедеятельность введенных клеток. В связи с этим в работе были проведены исследования по нахождению форм клеток, удовлетворяющих требованиям сохранения активности в специфических условиях твердения растворных смесей для различных вяжущих веществ.

Выбор исследуемых микроорганизмов основывался на их способности к образованию коагулирующего вещества — карбоната кальция — в образующихся микродефектах поверхности цементных материалов. Для обеспечения самовосстановления в процессе эксплуатации строительных материалов на основе минеральных вяжущих веществ можно использовать клетки различных грамположительных и грамотрицательных бактерий (*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].

Наиболее часто встречающимся в аналогичных исследованиях видом организмов является *Bacillus pasteurii* (Клетки I), который был выбран в качестве эталона для сравнения эффективности выбранных

для испытаний Клеток II (в связи с оформлением документов на интеллектуальную собственность исследуемый в работе выбранный штамм обозначен как «Клетки II»).

Эффективность клеток при проведении исследований определялась по их уреазной активности (табл. 1). Уреаза представляет собой фермент класса гидролаз, расщепляющий карбамид (мочевину) до аммиака и углекислого газа.

Изменение значений pH обусловлено как процессами, связанными с гидратацией вяжущих, так и процессами образования аммиака NH_4 . Более высокое начальное значение pH среды было показано как на цементном вяжущем, так и на гипсовом с применением клеток бактерий *Bacillus pasteurii* по сравнению со значением у Клеток II, что было обусловлено более активным образованием аммиака данными клетками в начальный период твердения полученных строительных растворов. Ферментативная активность *Bacillus pasteurii* со временем значительно сокращается вследствие увеличения значения pH по сравнению со значением для Клеток II. Отсюда можно сделать вывод о более высокой адаптации Клеток II к изменяющимся факторам окружающей среды (изменение pH), что объясняет наш выбор в их пользу для достижения поставленной цели, а именно обеспечения пролонгации процессов самовосстановления строительных материалов и изделий на различных типах вяжущих с использованием биологически-активного материала.

Результаты исследований показали более высокую активность Клеток II по сравнению с Клетками I для гипсовых вяжущих — более чем в два раза, для цементных вяжущих — в 1,5 раза. В связи с этим при проведении дальнейших испытаний использовались Клетки II.

Определение влияния изменения внешних условий на активность выбранных микроорганизмов и путей поддержания их ферментационной актив-

ности. Снижение ферментативной активности клеток также связано с изменением температуры строительных растворов $T_{кр}$ (критическая температура), повышение которой на минеральных вяжущих вызвано экзотермическим характером прохождения химических процессов, при твердении минеральных вяжущих и в большой степени зависит от характеристик и свойств вяжущих, геометрических размеров изделий на их основе. Повышение температуры в значительной степени обусловлено скоростью тепловыделения минеральных вяжущих, связанной с их реакционной способностью, а также с химическим и минералогическим составом, дисперсностью и другими показателями, характеризующими активность минеральных вяжущих. Отрицательное влияние температуры на ферментативную активность клеток за счет высокой скорости тепловыделения при гидратации минеральных вяжущих особенно характерно для быстротвердеющих гипсовых вяжущих. Для минеральных вяжущих с низкой скоростью гидратации влияние экзотермического эффекта на повышение температуры в значительной меньшей степени оказывает негативное влияние на активность клеток.

В ходе проведенной работы было исследовано влияние концентрации введенных клеток на прочностные свойства материалов на основе гипсового вяжущего (табл. 2).

В результате анализа полученных данных максимальная концентрация клеток в процентах массы к вяжущему не должна превышать 0,015. Дальнейшее увеличение концентрации клеток приводит к снижению прочностных показателей гипсовых образцов. Это обусловлено увеличением концентрации биологических поверхностно-активных веществ, входящих в структуру клеток.

Были проведены предварительные исследования по определению эффективности пористых минеральных материалов как искусственного, так и природного происхождения в качестве микро-

Табл. 1. Сравнение уреазной активности различных клеток и изменения кислотности pH в гипсовом и цементном тесте

Биообразец	Вид вяжущего	Биомасса клеток, мг	Начальная pH	Конечная pH	Активность, NH_4 мг/г/сут
Клетки I	Цемент	0,46	8,47	10,49	32,88
	Гипс	0,52	8,39	8,19	39,72
Клетки II	Цемент	0,76	7,8	11,62	47,69
	Гипс	0,86	6,86	6,89	88,97

Табл. 2. Влияние прочности гипсовых образцов от концентрации Клеток II

		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

контейнеров для обеспечения защиты клеток и повышения их эффективности влияния на процессы самовосстановления строительных растворов. В качестве исследуемых материалов были выбраны пористые материалы: природные цеолитсодержащие горные породы (природный цеолит Хотынецкого месторождения) и искусственные пористые заполнители на основе силикатных стекол (пеностекло). Результаты определения уреазной активности приведены в табл. 3 и показали более высокую эффективность цеолита.

Определение эффективности участия микроорганизмов в самовосстановлении строительных материалов, изделий и конструкций на основе различных минеральных вяжущих. В процессе проведенных исследований было установлено пластифицирующее воздействие вводимых микроорганизмов, результаты которых на цементно-песчаном растворе приведены на рис. 1.

Снижение В/Ц цементно-песчаного раствора обусловлено влиянием увеличения концентрации биоПАВ в зависимости от увеличения концентрации введенных клеток. Особенность клеток данного вида оказывать действие на смесь как ПАВ повышает эффективность разрабатываемой добавки.

Для определения влияния концентрации клеток на характеристики цементно-песчаных образцов были проведены испытания по определению изменения прочности на растяжение при изгибе и сжатии по стандартной методике в период набора прочности материалов (до 28 сут) (см. рис. 2, 3).

Увеличение концентрации биодобавок до значений 0,5 % от количества цементного вяжущего, введенных в цементно-песчаный раствор, позволяет увеличить период сохранения подвижности растворных смесей за счет увеличения содержания биоПАВ, находящегося в составе биомассы бактерий с уреазной активностью (рис. 4). Однако при достижении концентрации биодобавки в 0,5 % от количества цементного вяжущего наблюдается снижение прочностных свойств цементно-песчаных растворов по сравнению с контрольными образцами и образцами с меньшей концентрацией (0,01 и 0,05 %) в возрасте, превышающем 15 сут твердения в нормальных условиях. Полученные данные согласуются с данными исследований по определению влияния ПАВ на свойства бетонных смесей [2]. В то же время наличие биодобавки с концентрацией биомассы бактерий менее 0,5 % от массы цементного вяжущего показывает повыше-

Табл. 3. Сравнение уреазной активности Клеток II для различных потенциальных носителей-микроконтейнеров

Образец	Масса навески, г	pH начальный	pH конечный	Активность, NH_4 мг/г/сут
Цеолит	2,3	7,3	9,8	2518,95
Пеностекло	2,0	7,54	9,33	332,38

Рис. 1. Зависимость водоцементного отношения В/Ц от концентрации введенных клеток в цементно-песчаном растворе

Рис. 2. Изменение прочности образцов на растяжение при изгибе цементно-песчаного раствора в зависимости от концентрации введенных клеток: 2 — образцы без биодобавки, 2-1 — образцы с концентрацией клеток 0,01 % от массы цемента, 2-2 — образцы с концентрацией клеток 0,05 % от массы цемента, 2-3 — образцы с концентрацией клеток 0,5 % от массы цемента

Рис. 3. Изменение прочности образцов на сжатие цементно-песчаного раствора в зависимости от концентрации введенных клеток: 2 — образцы без биодобавки, 2-1 — образцы с концентрацией клеток 0,01 % от массы цемента; 2-2 — образцы с концентрацией клеток 0,05 % от массы цемента; 2-3 — образцы с концентрацией клеток 0,5 % от массы цемента

Рис. 4. Изменение сроков схватывания цементного вяжущего в зависимости от количества Клеток II

Рис. 5. Фотография поверхности контрольного цементно-песчаного образца без биодобавки в возрасте твердения 28 сут

Рис. 6. Фотография поверхности цементно-песчаного образца с концентрацией клеток 0,05 % от масс. цементного вяжущего в возрасте твердения 28 сут

ние прочностных показателей при сжатии и изгибе цементно-песчаных растворов от 9 до 15 % по сравнению с контрольными образцами в течение всего периода набора прочности (до 28 сут). Это объясняется образованием колюматирующего материала (карбоната кальция) в микродефектах цементно-песчаной матрицы (рис. 5, 6).

Колюматирующий микродефекты эффект обусловлен синтезом карбоната кальция в результате прохождения химических и биохимических процессов, связанных с жизнедеятельностью выбранных аэробных бактерий в присутствии питательной среды.

В результате процесса колюматации микродефектов прекращается доступ воздуха, что приводит к прекращению жизнедеятельности и росту биомассы аэробных бактерий. Восстановление жизнедеятельности бактерий возможно только в случае образования новых микродефектов.

В результате проведенных исследований была изучена уреазная активность клеток микроорганизмов и выбраны наиболее эффективные виды микроорганизмов для обеспечения процессов самовосстановления структуры. Определено влияние изменения внешних условий среды на активность

выбранных микроорганизмов при введении их биомассы в состав строительных растворов на основе минеральных вяжущих. В результате исследований процесса самовосстановления строительных материалов был выявлен пластифицирующий эффект клеток, который дает возможность регулировать сроки схватывания и скорости твердения строительных растворов смесей, уменьшить количество воды затворения для обеспечения требуемых условий формования, что позволяет повысить прочностные характеристики строительных материалов.

Эффективность выбранных микроорганизмов для обеспечения эффекта самовосстановления строительных растворов свидетельствует о возможности прогнозирования положительного экономического эффекта вследствие использования в составе модифицирующей биологической добавки. Была исследована возможность применения пористых материалов в качестве носителей для иммобилизации клеток микроорганизмов, которая показала более высокую эффективность цеолитов.

Приведенные результаты исследований демонстрируют возможность увеличения долговечности строительных бетонных и железобетонных конструкций на основе минеральных вяжущих.

ЛИТЕРАТУРА

1. Об экологической доктрине Российской Федерации : Распоряжение Правительства Российской Федерации от 31 августа 2002 г. № 1225-р.
2. Царева С.В. Бетоны, модифицированные биодобавкой : дис. ... канд. техн. наук. Саранск, 2001. 118 с.

3. Яковлева О.В. Аэробные спорообразующие бактерии рода *Bacillus* Cohn продуценты поверхностно-активных веществ : дис. ... канд. биол. наук. Уфа, 2004. 117 с.
4. Christofi N. Microbial surfactants and their use in field studies of soil remediation // *Journal of Applied Microbiology*. 2002. Vol. 93. Pp. 915–929.

5. Lima T.M., Procopio L.C., Brandao F.D. et al. Biodegradability of bacterial surfactants // *Biodegradation*. 2011. Vol. 22. No 3. Pp. 585–592.
6. Maier R., Soberon-Chavez M.G. Pseudomonas aeruginosa rhamnolipids: biosynthesis and potential applications // *Applied Microbiology and Biotechnology*. 2000. Vol. 54. Pp. 625–633.
7. Gunther N.W. Production of rhamnolipids by Pseudomonas chlororaphis, a nonpathogenic bacterium // *Applied and Environmental Microbiology*. 2005. Vol. 71. Pp. 2288–2293.
8. Shoeb E., Badar U., Akhter J. et al. Screening of Surfactant Producing Bacterial Strains Isolated from Soil Samples of an Automobile Workshop // *Karachi University Journal of Science*. 2012. Vol. 40. Pp. 31–36.
9. Raijiwala D.B., Hingwe P.S., Babhor V.K. Bacterial-concrete — an ideal concrete for historical structures // *Concrete Solutions : International conference on concrete solutions*. London : Taylor & Francis Group, 2009. Pp. 185–189.
10. van Tittelboom K. Self-healing concrete through incorporation of encapsulated bacteria- or polymer-based healing agents. Ghent : Ghent University, 2012. 344 p.
11. Jonkers H.M., Thijssen A., Muyzer G. et al. Application of bacteria as self-healing agent for the development of sustainable concrete // *Ecological Engineering*. 2010. Vol. 36 (2). Pp. 230–235.
12. Pelletier M.M., Brown R., Shukla A., Bose A. Self-healing concrete with a microencapsulated healing agent. Режим доступа: <http://energetics.chm.uri.edu/system/files/Self%20healing%20concrete%20-7-11.pdf>
13. Ye-Ji Lim, Young-Kyu Song, Hwan-Chul Yu, Chan-Moon Chung. Self-healing coatings for concrete protection // *Eurasia Conference on Chemistry of Solutions*. Режим доступа: [http://eurasia12.uoi.gr/Abstracts_pdf/\(14\)%20Polymer%20Science/S14%20POSTER/PP6_Abstract_Lim_PP.pdf](http://eurasia12.uoi.gr/Abstracts_pdf/(14)%20Polymer%20Science/S14%20POSTER/PP6_Abstract_Lim_PP.pdf).
14. 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.
15. Дудынов С.В. Бетоны общестроительного назначения с комплексными биодобавками : дис. ... канд. техн. наук. Саранск, 2006. 322 с.
16. Изотов В.С., Соколова Ю.А. Химические добавки для модификации бетона. М. : Палеотип, 2006. 244 с.

Поступила в редакцию в апреле 2017 г.

Принята в доработанном виде в июне 2017 г.

Одобрена для публикации в июне 2017 г.

Об авторах: **Степанов Николай Алексеевич** — кандидат технических наук, научный сотрудник кафедры химической энзимологии, **Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова (МГУ имени М.В. Ломоносова)**, 119991, ГСП-1, г. Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 3, na.stepanov@gmail.com;

Ефременко Елена Николаевна — доктор биологических наук, профессор кафедры химической энзимологии, **Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова (МГУ имени М.В. Ломоносова)**, 119991, ГСП-1, г. Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 3, elena_efremenko@list.ru;

Бруяко Михаил Герасимович — кандидат технических наук, доцент кафедры технологии вяжущих веществ и бетонов, **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**, 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26, mbruyako@yandex.ru;

Григорьева Александра Игоревна — аспирант кафедры технологии вяжущих веществ и бетонов, **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**, 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26, shelie@yandex.ru.

REFERENCES

1. Ob ekologicheskoy doktrine Rossiyskoy Federatsii : Rasporyazheniye Pravitel'stva Rossiyskoy Federatsii ot 31 avgusta 2002 g. № 1225-r. [On the Ecological Doctrine of the Russian Federation: Resolution of the Government of the Russian Federation of August 31, 2002 No. 1225-r.] (In Russian)
2. Tsareva S.V. *Betony, modifitsirovannyye biobavkoy : dissertatsiya ... kandidata tekhnicheskikh nauk* [Concretes Modified with Bioadditives : Thesis of Candidate of Technical Sciences]. Saransk, 2001, 118 p. (In Russian)
3. Yakovleva O.V. *Aerobnye sporoobrazuyushchie bakterii roda Bacillus Cohn produtsenty poverkhnostno-aktivnykh veshchestv : dissertatsiya ... kandidata biologicheskikh nauk* [Aerobic Spore-Forming Bacteria of the Genus Bacillus Cohn Producers of Surface-Active Substances : Thesis of Candidate of Biological Sciences]. Ufa, 2004, 117 p. (In Russian)
4. Christofi N. Microbial Surfactants and Their Use in Field Studies of Soil Remediation. *Journal of Applied Microbiology*. 2002, vol. 93, pp. 915–929.
5. Lima T.M., Procopio L.C., Brandao F.D. et al. Biodegradability of Bacterial Surfactants. *Biodegradation*. 2011, vol. 22, no. 3, pp. 585–592.
6. Maier R.M. Pseudomonas Aeruginosa Rhamnolipids: Biosynthesis and Potential Applications. *Applied Microbiology and Biotechnology*. 2000, vol. 54, pp. 625–633.
7. Gunther N.W. Production of Rhamnolipids by Pseudomonas Chlororaphis, a Nonpathogenic Bacterium. *Applied and Environmental Microbiology*. 2005, vol. 71, pp. 2288–2293.
8. Shoeb E., Badar U., Akhter J. et al. Screening of Surfactant Producing Bacterial Strains Isolated from Soil Samples of an Automobile Workshop. *Karachi University Journal of Science*, 2012, vol. 40, pp. 31–36.
9. Raijiwala D.B., Hingwe P.S., Babhor V.K. Bacterial-concrete — an Ideal Concrete for Historical Structures. *Concrete Solutions : International conference on concrete solutions*. London, Taylor & Francis Group, 2009, pp. 185–189.

10. van Tittelboom K. *Self-healing concrete through Incorporation of Encapsulated Bacteria — or Polymer-Based Healing Agents*. Ghent University, Ghent, 2012, p. 344.
11. Jonkers H.M., Thijssen A., Muyzer G. et al. Application of Bacteria as Self-Healing Agent for the Development of Sustainable Concrete. *Ecological Engineering*. 2010, vol. 36 (2), pp. 230–235.
12. Pelletier M.M., Brown R., Shukla A., Bose A. *Self-healing Concrete with a Microencapsulated*. Available at: <http://energetics.chm.uri.edu/system/files/Self%20healing%20concrete%20-7-11.pdf>.
13. Ye-Ji Lim, Young-Kyu Song, Hwan-Chul Yu, Chan-Moon Chung. Self-healing Coatings for Concrete Protection. *Eurasia Conference on Chemistry of Solutions*. Available at: [http://eurasia12.uoi.gr/Abstracts_pdf/\(14\)%20Polymer%20Science/S14%20POSTER/PP6_Abstract_Lim_PP.pdf](http://eurasia12.uoi.gr/Abstracts_pdf/(14)%20Polymer%20Science/S14%20POSTER/PP6_Abstract_Lim_PP.pdf)
14. 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.
15. Dudynov S.V. *Betony obshchestroitel'nogo naznacheniya s kompleksnymi biodobavkami : dissertatsiya ... kandidata tekhnicheskikh nauk* [General Purpose Concrete with Complex Supplements : Thesis of Candidate of Technical Sciences]. Saransk, 2006, 322 p. (In Russian)
16. Izotov V.S., Sokolova Yu.A. *Khimicheskie dobavki dlya modifikatsii betona* [Chemical Additives for Concrete Modification]. Moscow, Paleotip Publ., 2006, 244 p. (In Russian)

Received in April 2017.

Adopted in revised form in June 2017.

Approved for publication in June 2017.

About the authors: **Stepanov Nikolay Alekseevich** — Doctor of Technical Sciences, Scientific Researcher of Chemical Enzymology Department, **Lomonosov Moscow State University (MSU)**, 1 Lenin Hills, Moscow, 119991, Russian Federation, GSP-1, na.stepanov@gmail.com;

Efremenko Elena Nikolaevna — Doctor of Biological Sciences, Professor of Chemical Enzymology Department, **Lomonosov Moscow State University (MSU)**, 1 Lenin Hills, Moscow, 119991, Russian Federation, GSP-1, elena_efremenko@list.ru;

Bruyako Mikhail Gerasimovich — Doctor of Technical Sciences, Associated Professor of the Department of Technologies of Cohesive Materials and Concretes, **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**, 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation, mbruyako@yandex.ru;

Grigoreva Aleksandra Igorevna — Postgraduate Student, Department of Technologies of Cohesive Materials and Concretes, **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**, 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation, shelie@yandex.ru.