

УДК 576.8:620.193.81

## МИКРОБИОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ПРОЦЕССА ПОВРЕЖДЕНИЯ БЕТОННЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ

Василенко М.И., Гончарова Е.Н.

ФГБОУ ВПО «Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова»,  
Белгород, e-mail: [vasilemn@mail.ru](mailto:vasilemn@mail.ru)

В работе представлены материалы по выявлению особенностей процесса разрушения бетонных поверхностей в реальных условиях техногенно-нагруженных территорий городской среды. На основе микробиологических исследований показано преимущественное присутствие микроскопических грибов на бетонных поверхностях зданий и преобладающая роль тионовых бактерий в коррозии коллекторов сточных вод, выявлено наличие водорослей на поверхности разрушенных зданий. Продемонстрирована тенденция формирования специфических биоценозов в экологически неблагоприятных участках. По результатам физико-химических анализов водных вытяжек сколов поврежденных поверхностей проанализированы продукты процесса микробиологической агрессии, приводящие к снижению величины pH, накоплению органических соединений, выщелачиванию кальция из материалов, а также к возникновению минеральных новообразований на их поверхности. Показано, что определяющим звеном в процессе биоповреждения бетонных поверхностей является тот организм, для которого экологические параметры среды будут оптимальными.

**Ключевые слова:** биоповреждение бетонов, микроскопические грибы, бактерии, водоросли

## MICROBIOLOGICAL CHARACTERISTICS OF DAMAGE TO CONCRETE SURFACES

Vasilenko M.I., Goncharova E.N.

Belgorod State Technological University n.a. V.G. Shoukhov, Belgorod, e-mail: [vasilemn@mail.ru](mailto:vasilemn@mail.ru)

The work presents the materials to identify features of the fracture process of concrete surfaces in real conditions of technogenic busy terrains of the urban environment. On the basis of microbiological researches primary presence of microscopic fungi on concrete surfaces of buildings and a prevailing role of bacteria in corrosion of collectors of sewage is shown, existence of algae on a surface of the destroyed buildings is revealed. The tendency of formation of specific biocenoses in ecologically unsuccessful sites is shown. By results of physical and chemical analyses of water extracts of chips of the damaged surfaces products of process of the microbiological aggression, sizes bringing to decrease pH, to accumulation of organic compounds, a calcium illuviation from materials, and also to emergence of mineral new growths on their surface are analysed. It is shown that defining link in the course of biodamage of concrete surfaces is that organism for which ecological parameters of the environment will be optimum.

**Keywords:** biological damages concretes, microscopic fungi, bacteria, algae

Бетон и железобетон в современном строительстве являются одними из наиболее часто применяемых строительных материалов. Широкое их использование объясняется объективными факторами, главными из которых являются: уникальность физико-механических свойств, практически неисчерпаемые запасы природного сырья для их производства и потенциальная возможность замены его техногенными отходами различных отраслей промышленности, сравнительно низкая энергоёмкость исходных материалов и технологических процессов, высокие эколого-экономические показатели производства по сравнению с другими взаимозаменяемыми материалами [4, 5]. Однако, наряду с вышеназванными преимуществами, у данных материалов имеются некоторые неблагоприятные особенности – гигроскопичность, кислотонестойчивость и другие, которые способствуют заселению их микроорганизмами и дальнейшему биоразрушению [12].

Биологическая коррозия строительных материалов интенсивно развивается в условиях техногенных сред, которыми, в первую

очередь, являются промышленные предприятия, особенно химической, пищевой и медицинской промышленности, канализационные коллекторы и сооружения для отведения сточных вод, а также территории производственной и придорожной застройки в условиях современных городов. Наличие богатой питательной среды в цехах указанных предприятий, высокая влажность и затруднённый воздухообмен, а также различные поллютанты в городской среде – все это создает благоприятные условия для интенсивного развития биодеструкторов [1, 10].

Микробы-деструкторы чрезвычайно разнообразны, среди них наибольшее значение, по мнению многих исследователей, имеют нитрифицирующие и сероокисляющие бактерии, а также микроскопические грибы [10], скорость роста которых, специфический состав метаболитов, концентрация агрессивных веществ, длительность воздействия определяют интенсивность и степень повреждения объектов. Перечисленные классы организмов «запускают» процессы биоповреждений посредством воздействия собственных продуктов жиз-

недеятельности (кислот, щелочей, окислительно-восстановительных и гидролитических ферментов и других агрессивных веществ) на компоненты строительных материалов, разрушая связующие растворы, бетон, металлоизделия и другие элементы строительных конструкций.

Важное значение в составе биоценозов-разрушителей имеют тионовые бактерии, которым принадлежит основная роль в окислении широкого спектра разнообразных соединений серы до серной кислоты. Интенсивность аварий на один километр железобетонных трубопроводов в год достигает 1,8, в то время как этот же параметр для керамических трубопроводов – 0,09, а для кирпичных – 0,009. До 74% аварий на бетонных коллекторах обусловлено коррозией сводовой части трубопроводов, вызванной серной кислотой биогенного происхождения [3].

Опасность и интенсивность биологических загрязнений и разрушений зданий усугубляется хозяйственной деятельностью человека – пренебрежением экологическими нормами при строительстве зданий, безграмотной и беспечной эксплуатацией их, бесчисленными повреждениями крыш, протечками, затоплением подвалов, неисправной сантехники, непредсказуемым тепло-влажностным режимом и другими факторами. В результате на поверхностях стен, потолков и других частей зданий появляются плесневые грибы, разрастающиеся колонии которых диффундируют вглубь материала с выделением токсинов, вызывающих биохимическое разрушение конструкций.

**Цель исследования.** Изучение особенностей процесса повреждения бетонных поверхностей различными строительными микроорганизмами в реальных условиях эксплуатации.

### Материалы и методы исследования

Объектом исследования в данной работе являлись образцы сколов с поврежденных бетонных поверхностей зданий и коллекторов, в ряде случаев модельные образцы цементно-песчаного бетона кубической формы с ребром 20 мм (портландцемент М400 производства ОАО «Белгородский цемент»).

Строительные материалы с наличием биообразований служили источником получения смешанных и чистых культур водорослей, бактерий и грибов. Микроорганизмы с поверхности разрушенных материалов выделяли на различных питательных средах: Кнопа и Чу-10 (для выделения и учета водорослей), Бейеринка (для тионовых бактерий); микроскопические грибы методом смывов и отпечатков на твердую среду Чапека [11].

Для определения pH среды использовали иономер марки ЭВ-74; для выявления твердых продуктов воздействия микроорганизмов на бетонный композит – рентгенофазовый анализ; вымываемых в среду веществ – аналитические химические методы [7].

### Результаты исследования и их обсуждение

С целью выявления наличия и характера биоповреждений внешней бетонной поверхности городских зданий были исследованы застройки различных зон города Белгорода. Согласно принятой системе функционального зонирования территории, при выборе участков ориентировались на объекты (здания), расположенные вблизи промышленных зон и вдоль транспортных магистралей разной степени загруженности. Обследование позволило сделать вывод, что наибольшее количество поврежденных зданий расположено вдоль дорог: 80% домов имели выраженные локальные участки биоповреждений, где наблюдалось «глубокое повреждение отделочных слоев, поверхностный плесневой налет, локальные выкрашивания в лицевом слое материала, вздутия» (рис. 1), что, согласно существующей системе оценок [6], соответствовало 1–2 степени биоповреждений.



а



б

Рис. 1. Обрастание бетонной поверхности зданий плесневыми грибами (а) и водорослями (б)

В случае с повреждениями систем коммуникаций, наиболее глубокие коррозионные разрушения происходят в самотечных канализационных коллекторах и сооруже-

ниях для очистки сточных вод на территориях коттеджной застройки. На рис. 2 представлен внешний вид бетона септика после эксплуатации в течение трех лет.

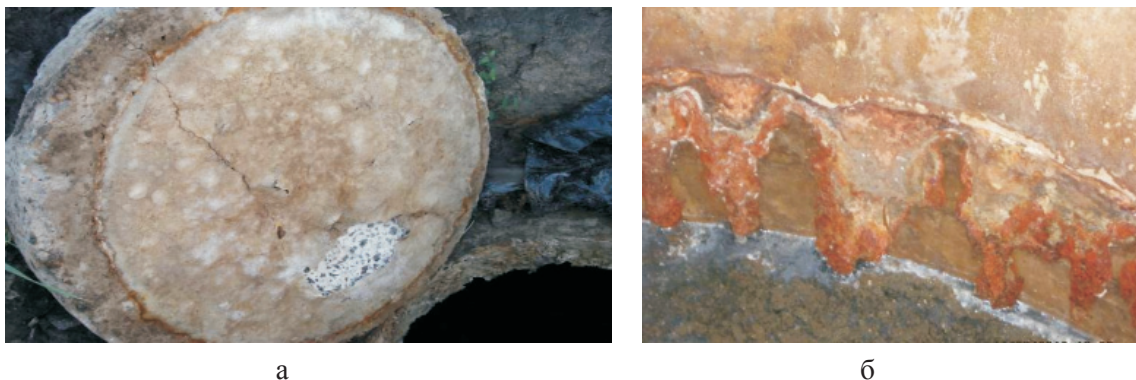


Рис. 2. Бетонная крышка септика (а) и корродированная арматура бетона в колодце из железобетонных конструкций (б)

Как видно, коррозия крышки септика затронула поверхностный слой бетона, а на внутренней его части наблюдалось отслоение коррозионного слоя арматуры бетонных колец, что соответствовало 3 степени биоповреждений.

Результаты микробиологического исследования разрушенных участков бетона позволили выявить наличие на их поверхности представителей тионовых и нитрифицирующих бактерий, зеленых водорослей, микроскопических грибов. Что касается последних, то методом отпечатков с пораженных локальных участков городских зданий были выделены и идентифицированы грибы следующих родов: *Alternaria*, *Aspergillus*, *Cladosporium*, *Fusarium*, *Ulocladium*, *Aureobasidium*, *Penicillium*, *Stemphylium*, *Rizopus* [8]. Значительную долю из них (в условиях застройки промзон и магистрали федерального значения до 50%) составили грибы, имеющие темноокрашенные колонии (рис. 3). Наличие у таких микромицетов протекторных меланиновых пигментов делает их устойчивыми не только к ультрафиолетовому излучению, но и к другим токсичным соединениям, что и объясняет их скопление в наиболее экологически неблагоприятных зонах города. Сравнительный анализ структуры микоценозов поврежденных поверхностей бетона, снега и воздуха около этих же зданий свидетельствовал о том, что возрастающее разнообразие грибов на поверхности зданий по сравнению с окружающей атмосферой характеризуется появлением представителей родов *Aureobasidium*, *Rizopus*, *Stemphylium*, создающими в совокупности специфические наиболее разнообразные грибные ком-

плексы внешней поверхности зданий. Чем более антропогенно нагруженной оказывалась территория города, тем чаще наблюдалось присутствие оппортунистических микроскопических грибов, а именно потенциально патогенных для человека и растений, микотоксичных видов, прежде всего, рода *Fusarium* и *Aspergillus* (количество колоний последних на территории промышленных зон доходило до 30% от суммарного количества выросших колоний).

Ведущими агентами биоповреждения на ряде объектов являются тионовые бактерии. Разрушение происходит в условиях эксплуатации бетонных и железобетонных конструкций, предусматривающих контакт с природными и, особенно, со сточными водами, насыщенными органическими веществами и продуктами их разложения (в особенности сероводородом). При выделении тионовых бактерий с поверхности разрушенных бетонных изделий и канализационных коллекторов было установлено, что на поверхности строительных материалов в окружающей среде преобладают *Thiobacillus thioaragus*, тогда как в разрушенных сооружениях, отводящих сточные воды преимущественно *Acidithiobacillus thiooxidans* и *Ac. ferrooxidans* [9], т.е. виды бактерий, которые предпочитают более низкие значения pH (5,8). В подземных сооружениях концентрация тионовых бактерий составляла  $10^6$  кл/г, на внешней поверхности в зависимости от степени ее разрушения –  $10^2$ – $10^4$  кл/г.

На поверхности разрушенного бетона были обнаружены также зеленые (*Chlorophyta*), сине-зеленые (*Cyanophyta*) и диатомовые водоросли (*Bacillariophyta*).

Среди сине-зеленых преобладали водоросли порядков Oscillatoriales и Chroococcales (род *Microcystis* и *Gloeocapsa*). Диатомовые водоросли были представлены порядком Naviculales [2].

Любопытно заметить, что в предварительных лабораторных экспериментах по определению эффекта воздействия отдельных водорослей на бетон через 60 дней прочность образцов практически не уменьшилась. Исключение составили диатомовые водоросли, обрастание которыми поверхности бетона привело к возрастанию массы и прочности изделий, вероятно по причине большей массы этих водорослей на строительных материалах в отличие, например,

от зеленых или сине-зеленых. Однако в натуральных наблюдениях, когда поверхность бетона заселялась различными микроорганизмами, с явным превалированием водорослей, по истечении года фиксировалось полное разрушение изделий (рис. 1, б). Не являясь основными деструкторами твердой поверхности строительного материала, возможно, водоросли вносят вклад в процесс разрушения опосредовано, способствуя созданию условий (через среду и питание) для существования других микроорганизмов, обладающих преимущественным агрессивным типом воздействия, в нашем случае для хемолитотрофных бактерий и микроскопических грибов.

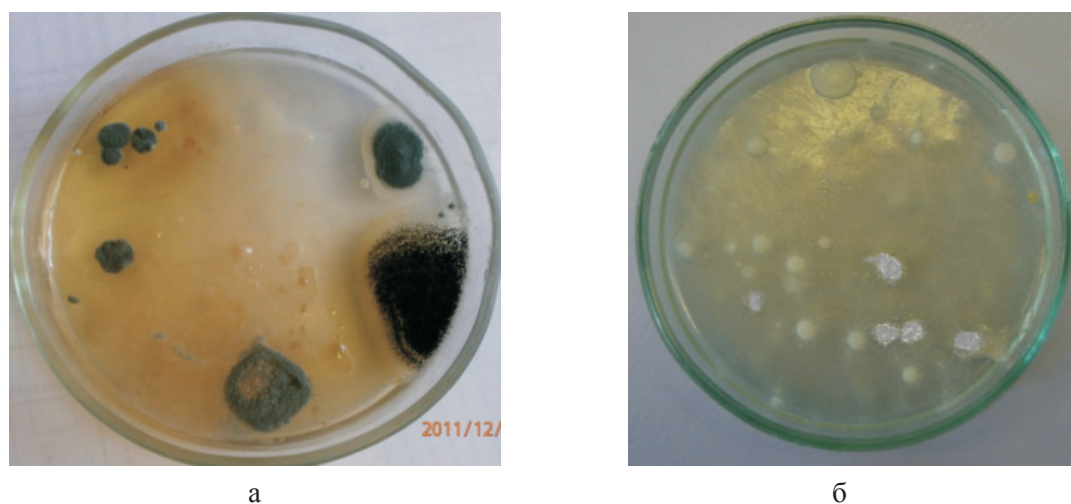


Рис. 3. Колонии грибов с бетонной поверхности зданий, расположенных вдоль границы промзоны (а) и в пригороде (б)

Для получения отдельных химических характеристик механических сколов поврежденных поверхностей зданий анализировали их водную вытяжку. Результаты анализов показали, что рН водных вытяжек сколов с явно неповрежденных поверхностей составляет 8,8, тогда как в вариантах поврежденных зданий наблюдается тенденция снижения значений рН, наиболее низкие из которых составили 6,5. Вероятно, рН среды на поверхности бетона меняется при воздействии на нее продуктов метаболизма микроорганизмов, среди которых значительную долю составляют кислоты (уксусная, лимонная, щавелевая, яблочная, серная, азотная и другие).

Взаимодействие кислот с бетоном приводит к высвобождению из него ионов кальция и протеканию реакций образования новых соединений с другими физико-химическими свойствами, что обуславливает появление микротрещин, а в дальнейшем приводит к растрескиванию

и потере прочности. Выщелачиванию ионов кальция в окружающую среду способствует и процесс роста тионовых бактерий, сопровождающийся биосинтезом сульфатов. Концентрация выщелоченного, не прореагировавшего кальция в опытах с тионовыми бактериями достигала в водной среде 300 мг/л, что подтвердило предполагаемый механизм химического воздействия.

Наличие в водной вытяжке разрушенного материала органических соединений, которые в данном случае могут быть представлены подобными соединениями в составе загрязнителей окружающей среды, а в большей степени продуктами метаболизма и лизиса клеток микроорганизмов, выявлено через показатель ХПК, величина которого достигала 450 мгО/л (для неповрежденных участков – 112 мгО/л). Такая ситуация подтверждает факт биологического заселения и разрушения поверхности зданий, является причиной дальнейшей атаки бетона микроорганизмами, интенсив-

но развивающимися на продуктах лизиса предшественников.

Процесс нарушения механической целостности бетонных изделий связан не только с выщелачиванием кальция, но и с формированием на поверхности новых минеральных соединений (рис. 4). Минералогический состав новообразованных кристаллов наиболее корродированных участков поверхности коллектора сточных вод свидетельствовал, что продуктами коррозии являются двухводный гипс, четырехкальциевый монокарбонатный гидроалюминат, эттрингит,  $\beta$ -кварц.

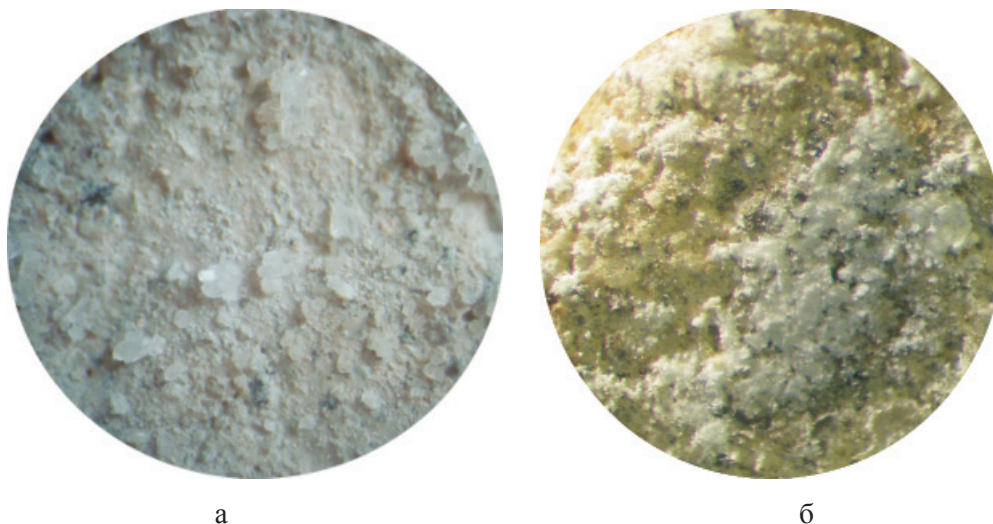


Рис. 4. Новообразования на поверхности цементно-песчаных материалов: кристаллические (а) и аморфные (б) соединения

Образование гипса и, особенно, эттрингита, имеющих значительно больший объем, чем исходные компоненты бетона, сопровождается растрескиванием поверхности. Появляющиеся трещины являются каналами, по которым вглубь бетона диффундируют углекислота и летучие кислоты, усугубляя дальнейший процесс коррозии.

Таким образом, видовой состав биоценоза на поверхности разрушенного бетона изменяется в зависимости от совокупности абиотических факторов. На бетонных поверхностях городских зданий и сооружений преобладают бактерии *Th. thioparus* и микотоксичные грибы родов *Aspergillus* и *Fusarium*, оптимальные значения pH для роста которых сдвинуты в щелочную сторону (отдельные формы способны развиваться при pH 9,8), тогда как на поверхностях канализационных коллекторов, где pH имеет менее щелочные условия вследствие вымывания из материала гидроксида кальция, обнаруживаются в большом количестве *Ac.thiooxidans*, которые интенсифицируют дальнейшее снижение pH, потерю прочности цементного камня в процессе взаимодействия с сероводородом и образование серной кислоты. Мицелиальные грибы в зависимости от абиоти-

ческих условий также имеют различную экологическую валентность по отношению к действию тех или иных факторов. Присутствие в среде отдельных представителей этой группы микроорганизмов определяется уровнем антропогенной нагрузки той или иной территории. В наиболее нагруженных участках магистралей и на промышленных объектах возрастало обилие темноокрашенных форм грибов, появлялись микотоксичные и потенциально патогенные для человека и растений виды. Водоросли хорошо развиваются на бетоне, защищенном карбонатами кальция, но потребление последнего автотрофами приводит к быстрому разрушению карбонатного барьера и отслоению верхней части поверхности в виде корок, что открывает путь для заселения глубинных слоев другими живыми организмами. Таким образом, в зависимости от действия антропогенных абиотических факторов, определяющим звеном в процессе биоповреждения бетонных поверхностей будет тот организм, для которого экологические параметры данной среды обитания будут оптимальны.

*Работа выполнена в рамках реализации Программы стратегического развития БГТУ им. В.Г. Шухова на 2012–2016 гг.*

**Список литературы**

1. Василенко М.И. Сравнительная оценка видового разнообразия микроскопических грибов в атмосфере различных функциональных зон города Белгорода / М.И. Василенко, Ю.И. Заика // Научные ведомости БелГУ, Естественные науки. – 2011. – Вып. 14. – № 3(98). – С. 42–47.
2. Водоросли. Справочник. / С.П. Вассер, Н.В. Кондратьева, Н.П. Масюк и др. – Киев: Наук. думка, 1989. – 608 с.
3. Возбудители микробиологической коррозии бетона / Е.Н. Гончарова, В.А. Юрченко, Е.В. Бригада, Ю.В. Чаплина // Экология и промышленность России. – 2003. – № 3. – С. 22–24.
4. Евтушенко Е.И. К вопросу стабилизации свойств строительных материалов / Е.И. Евтушенко, В.С. Лесовик // Вестник отделения строительных наук. – 2005. – Вып. 9. – С. 267–271.
5. Евтушенко Е.И. Стабилизация свойств строительных материалов на основе техногенного сырья / Е.И. Евтушенко, В.С. Лесовик // Изв. Вузов «Строительство». – 2002. – № 12. – С. 40–44.
6. Защита строительных конструкций от коррозии. Свод правил: СП 28.13330.2012. Введен в действие 01.01.2013. – 127 с. – URL: [http://mmtk-msk.ru/sites/default/files/gost\\_files/snir-2.03.11-85.pdf](http://mmtk-msk.ru/sites/default/files/gost_files/snir-2.03.11-85.pdf) (дата обращения: 17.01.2013).
7. Крешков А.П. Основы аналитической химии. Книга вторая. – М.: Химия, 1971. – 456 с.
8. Литвинов М.А. Определитель микроскопических почвенных грибов. – Л.: Наука, 1967. – 304 с.
9. Определитель бактерий Берджи / под ред. Дж. Хоулта, Н. Крига, П. Снита и др. – 9-е изд. – В 2-х т. – М.: Наука, 1997.
10. Розенталь Н.К. Коррозия и защита бетонных и железобетонных конструкций сооружений очистки сточных вод // Бетон и железобетон. Оборудование, материалы, технология. – 2011. – № 1. – С. 96–103.
11. Руководство к практическим занятиям по микробиологии / под ред. Н.С.Егорова. – 3-е изд. – М.: Дрофа, 1997. – 224 с.
12. Ферронская А.В. Долговечность конструкций из бетона и железобетона: учебное пособие. – М.: Изд-во АСТ, 2006. – 336 с.

**References**

1. Vasilenko M.I., Zaika Ju.I. Nauchnye vedomosti BelGU, Estestvennye nauki – Scientific sheets of the NRU – BSU, 2011, Vol. 14, no. 3(98), pp. 42–47.

2. Vasser S.P., Kondrat'eva N.V. and oth. Vodorosli. Spravochnik. [Algas. Directory]. Kiev, Publ. house «Nauk. dumka», 1989, p. 608.
3. Goncharova E.N., Jurchenko V.A., Brigada E.V., Chaplina Ju.V. Jekologija i promyshlennost' Rossii – Ecology and industry of Russia, 2003, no. 3, pp. 22–24.
4. Evtushenko E.I., Lesovik V.S. Vestnik otdelenija stroitel'nyh nauk – The Messenger of office of construction sciences, 2005, no. 9, pp. 267–271.
5. Evtushenko E.I., Lesovik V.S. Izv. Vuzov «Stroitel'stvo» – The News of higher education institutions. «Construction», 2002, no. 12, pp. 40–44.
6. Zashhita stroitel'nyh konstrukcij ot korrozii. Svod pravil. [Protection of construction designs against corrosion. Set of rules]. SP 28.13330.2012. Data vvedeniya. 2013-01-01, p. 127.
7. Kreshkov A.P. Osnovy analiticheskoy himii. Kniga vtoraja. [The Bases of analytical chemistry. Book the second]. Moscow, Publ. house «Chemistry», 1971, p. 456.
8. Litvinov M.A. Opredelitel' mikroskopicheskikh pochvennyh gribov. [The Determinant of microscopic soil mushrooms]. Leningrad, Publ. house «Nauka», 1967, p. 304.
9. Opredelitel' bakterij Berdzhii. [The Determinant of bacteria of Berdzhii]. Under ed. Dzh. Hoult, N. Kriga, P.Snita and oth. In 2 volumes. Moscow, Publ. house «Nauka», 1997.
10. Rozental' N.K. Beton i zhelezobeton. Oborudovanie, materialy, tehnologija – The Concrete and reinforced concrete. The Equipment, materials, technology, 2011, no. 1, pp. 96–103.
11. Rukovodstvo k prakticheskim zanjatijam po mikrobiologii. [The management to a practical training on microbiology]. Under ed. N.S.Egorova. 3 ed., Moscow, Publ. house «Drofa», 1997, p. 224.
12. Ferronskaja A.V. Dolgovechnost' konstrukcij iz betona i zhelezobetona. Uchebnoe posobie. [Durability of designs from concrete and reinforced concrete. Manual]. Moscow, Publ. house «AST», 2006, p. 336.

**Рецензенты:**

Присный А.В., д.б.н., доцент, профессор кафедры биоценологии и экологической генетики Белгородского государственного национального исследовательского университета, г. Белгород;  
 Евтушенко Е.И., д.т.н., профессор, проректор по научной работе, ФГБОУ БГТУ им. В.Г. Шухова, г. Белгород.  
 Работа поступила в редакцию 22.02.2013.