

Academia. Архитектура и строительство, № 3, стр. 117–131.

Academia. Architecture and Construction, № 3, стр. 117–131.

Исследования и теория

Научная статья

УДК 69.04

doi: 10.22337/2077-9038-2022-3-117-131

Смирнов Владимир Александрович (Москва). Кандидат технических наук. Лаборатория динамики сооружений Научно-исследовательского института экспериментальной механики и кафедра строительной и теоретической механики Национального исследовательского Московского государственного строительного университета (129337, Москва, Ярославское шоссе, 26. НИУ МГСУ); Научно-исследовательский институт строительной физики Российской академии архитектуры и строительных наук (127283, Россия, Москва, Локомотивный проезд, 21. НИИСФ РААСН). Эл.почта: belohvost@list.ru.

Smirnov Vladimir A. (Moscow). Candidate of Technical Sciences. The Department of Building and Theoretical Mechanics and Scientific and Research Institute of Experimental Mechanics of the National Research Moscow State University of Civil Engineering (129337, 26, Yaroslavskoye Shosse, Moscow. NRU MGSU); The Scientific-Research Institute of Building Physics of the Russian Academy of Architecture and Construction Sciences (21 Lokomotivny proezd, Moscow, 127238. NIISF RAACS). E-mail: belohvost@list.ru.

Сравнительные динамические характеристики конструкционных материалов

Аннотация. Работа посвящена изучению динамических характеристик конструкционных материалов, используемых в элементах пролётных строений мостов. Исследуется влияние плотности составов, наличия и типа полых заполнителей, а также наличие фибры на показатели коэффициента механических потерь и динамического модуля упругости. Испытания проводят на стандартных образцах методом экспериментального модального анализа, по результатам которого определяют частоты и формы собственных колебаний и величину коэффициента потерь, соответствующего каждой из собственных форм. Определены величины динамического модуля упругости с использованием аналитического выражения для частоты собственных колебаний шарнирно закреплённой балки.

Ключевые слова: коэффициент потерь, модуль упругости, демпфирование, пролётное строение, динамика, подвижная нагрузка

Финансирование. Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (Проект: Теоретико-экспериментальное конструирование новых композитных материалов для обеспечения безопасности при эксплуатации зданий и сооружений в условиях техногенных и биогенных угроз. Шифр научной темы FSWG-2020-0007). Работы выполнены на оборудовании Головного регионального центра коллективного пользова-

ния научным оборудованием и установками НИУ МГСУ при финансовой поддержке Минобрнауки России (соглашение № 075-15-2021-686).

Comparative Dynamic Characteristics of Structural Materials

Abstract. The work is devoted to the study of the dynamic characteristics of structural materials used in the elements of span structures of bridges. The influence of the composition density, the presence and type of hollow fillers, as well as the presence of fiber on the indicators of the mechanical loss coefficient and the dynamic modulus of elasticity is investigated. Tests are carried out on standard samples by the method of experimental modal analysis, the results of which determine the frequencies and forms of natural oscillations, and the value of the loss coefficient corresponding to each of the natural forms. Using an analytical expression for the frequency of natural oscillations of a hinged beam, the values of the dynamic modulus of elasticity are determined.

Keywords: loss factor, modulus of elasticity, damping, span structure, dynamics, moving load

Funding. The study was carried out with the financial support of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (Project: Theoretical and experimental design of new composite materials to ensure safety in the operation of buildings and structures in conditions of technogenic and

biogenic threats. The scientific topic code is FSWG-2020-0007). The works were carried out on the equipment of the Head Regional Center for the Collective Use of Scientific Equipment and Installations of the NRU MGSU with the financial support of the Ministry of Education and Science of the Russian Federation (Agreement No. 075-15-2021-686).

Строительство современных мостов с длинными пролётами требует особого внимания к ветровым нагрузкам и аэроупругим колебаниям пролётных строений [1; 2]. В инженерном анализе часто возникает проблема прогнозирования динамического поведения конструкции в результате воздействия на неё подвижных нагрузок и, в частности, изучения вызванных ими колебаний в мостах [3]. Исследования показывают, что поперечные прогибы и напряжения от движущихся нагрузок значительно выше, чем при стационарных нагрузках [4–6].

Примерами неучёта указанных эффектов могут служить разрушение Такомского моста в 1940 году, колебания пролётного строения в Барнауле в 1993 году, разрушение авангардной части строения на стадии надвигки под Витебском в 2006 году, инцидент с колебаниями пролётного строения моста в Волгограде в 2010 году [7; 8].

Экспериментальные данные, полученные по результатам наблюдений за мостом «Золотые ворота», показали, что различные колебательные режимы характеризуются разными коэффициентами затухания, а порядок малости этих коэффициентов говорит о низкой демпфирующей способности висячих комбинированных систем, что приводит к длительной перекачке энергии из одной подсистемы в другую. Детальное описание данного явления представлено в работах [9; 10].

Новая редакция Национального стандарта «Надёжность строительных конструкций и оснований»¹ отмечает необходимость учёта не только ветровых нагрузок, но и аэроупругих эффектов при взаимодействии ветра с гибкими сооружениями. Для достоверных расчётов ветровых нагрузок и предотвращения аэроупругих колебаний пролётных строений необходимы данные по аэродинамическим характеристикам как конкретных проектируемых мостов, так и типовых сечений пролётных строений.

Известно, что коэффициент демпфирования имеет сильную корреляцию с возникновением вихревой вибрации в мостах с большими пролётами [11; 12]. Для оценки коэффициентов демпфирования большепролётных мостов зачастую прибегают к использованию методов операционного модального анализа (ОМА) вместо методов экспериментального модального анализа с применением тяжёлых вибровозбудителей, которые требуют временного приостановления эксплуатации моста на время измерений. Одним из важных допущений ОМА является то, что структурная

система должна находиться в условиях стационарной внешней вибрации. Однако нестационарные нагрузки, такие как землетрясения, сильные ветры и дорожное движение, являются основными источниками возбуждения в гражданской инфраструктуре, и эти нагрузки вызывают нестационарные отклики [13–15]. Таким образом, нарушение условий возбуждения основного предположения классического ОМА могло быть одной из причин плохой оценки коэффициентов затухания.

Как показано в работе [16], мостовые конструкции, как и любые реальные механические колебательные системы, обладают свойством диссипации энергии вследствие необратимых процессов, происходящих в материале упругого элемента (рассеяние энергии в материале), в узлах соединений (конструкционное демпфирование), а также в результате потерь энергии колебаний в окружающую среду. Соотношение между этими видами энергетических потерь для различных типов конструктивного исполнения мостов неодинаково и зависит от материала, конструктивных форм моста, а также от условий его работы. Неупругие сопротивления различной природы играют важную роль при колебаниях мостов, так как от них зависят величины амплитуд колебаний пролётных строений, особенно в резонансном режиме.

В настоящей статье представлены результаты исследований демпфирующих характеристик строительных материалов (составов бетона) пролётных строений для повышения качественных характеристик конструкций в целом.

Для пролётных конструкций мостов одним из опасных факторов является возникновение ветрового резонанса, при котором частота собственных колебаний пролётного строения совпадает с частотой внешнего аэродинамического воздействия. В монографии [17] описано множество реализаций указанных расчётных сценариев, которые в итоге привели к аварийному разрушению элементов пролётных строений. Известно, что амплитуда резонансных колебаний может быть в том числе ограничена повышением величины

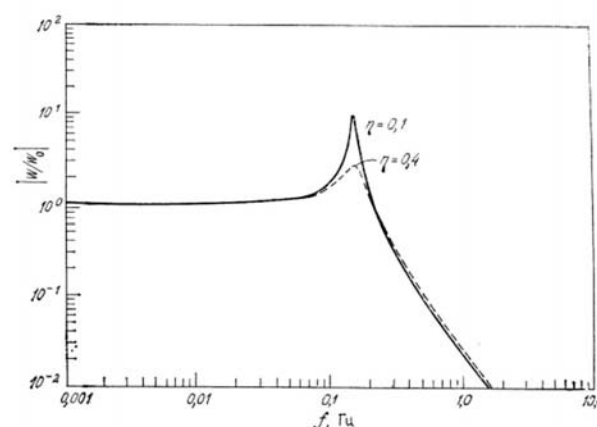


Рис. 1. Влияние изменения коэффициента потерь на амплитуду резонансных колебаний

¹ ГОСТ 27751-2014 Надёжность строительных конструкций и оснований. Основные положения (Переиздание) / Дата введения 2015-07-01 (<https://docs.cntd.ru/document/1200115736>).

неупругого сопротивления (демпфирования) в материале конструкции или узлах сопряжения (опорные элементы), как показано на рисунке 1 для двух величин коэффициента потерь: 0,1 и 0,4.

Одним из наиболее сложных моментов при проектировании дополнительных демпферов является определение необходимого уровня вносимого демпфирования. Этот вопрос нельзя решить до тех пор, пока не известно, какое демпфирование присутствует в самой конструкции изначально.

Для пояснения сказанного рассмотрим различие между реакциями так называемых «составных» конструкций и конструкций сварных (или цельных), то есть не имеющих соединений. Составными являются конструкции, имеющие механические средства крепежа, такие как заклёпки, болты и винты. К подобным конструкциям относят пролётные строения мостов, содержащие балочные элементы, элементы дорожного полотна и покрытия, а также ограждения, фонарные столбы и т.д. (рис. 2 а, в).

Примерами цельных (или сварных) конструкций являются конструкции мостов, представленные на рисунке 2 б. Цельные конструкции обычно имеют высокое начальное демпфирование, при котором коэффициент потерь может достигать значения 0,05. Это значение намного превышает то, которое можно получить в сварных или цельных конструкциях, потому что демпфирование за счёт соединений будет минимальным, и измерения дают значение коэффициента конструкционных потерь, сопоставимое с потерями в самом материале, то есть около $10^{-4} \dots 10^{-5}$ для стальных или алюминиевых конструкций. Поэтому увеличение коэффициента демпфирования, скажем, в десять раз для сборных конструкций является гораздо более сложной задачей, чем для цельной или сварной конструкции. Различным случаям применения должны соответствовать различные способы обработки материалов и конструктивные приёмы, повышающие демпфирующую способность, что зависит от демпфирующих свойств исходной конструкции.

Очевидно, скорость затухания колебаний демпфированных конструкций может, вообще говоря, служить характеристикой демпфирования. Обычно характеристикой затухания

указанного типа является логарифмический декремент Δ , то есть отношение амплитуд n - и $(n + N)$ -цикла:

$$\delta = \frac{1}{N} \ln \frac{W_n}{W_{n+N}}, \quad (1)$$

где W_n – амплитуда n -цикла; W_{n+N} – амплитуда $(n + N)$ -цикла.

Нетрудно видеть, что подобное определение демпфирования даёт однозначный результат лишь в том случае, когда огибающая затухающих колебаний имеет форму экспоненты $W_e(t)e^{-\delta t}$. Все это относится к случаю вязкого демпфирования, а также гистерезисного демпфирования, описываемого комплексным модулем, что можно рассматривать по крайней мере как некое приближение. Легко также установить тот факт, что затухание влияет на амплитуду установившихся колебаний конструкции, на которую действует гармоническая возбуждающая сила (вынужденные колебания). Если в момент времени $t = 0$ прикладывается периодически изменяющаяся сила, то динамические перемещения будут быстро возрастать до тех пор, пока система не достигнет динамического равновесия. Для частот много больших или много меньших резонансной влияние демпфирования будет не слишком большим. При низких частотах восстанавливающая сила будет в основном обеспечиваться жёсткостью, тогда как при высоких частотах восстанавливающая сила определяется инерцией, а между ними в зависимости от конкретных значений массы и жёсткости будет иметь место резонанс. Если отсутствует демпфирование, то именно при таком резонансе невозможно состояние динамического равновесия, и в системе будут возникать колебания с постоянно увеличивающейся амплитудой. В действительности же некоторое затухание всегда имеется, и оно приводит систему в динамическое равновесие при амплитудах, значения которых зависят от величины демпфирующих сил.

Функции, характеризующие динамические перемещения для системы с одной степенью свободы и вязким и гистерезисным демпфированием, показаны соответственно на рисунках 3 а, б.

Можно видеть, что максимум функции $|W/F|$ при вязком демпфировании достигается при частоте более низкой, чем собственная частота недемпфированных колебаний, а в случае гистерезисного демпфирования резонансный пик всегда соответствует собственной частоте недемпфированных

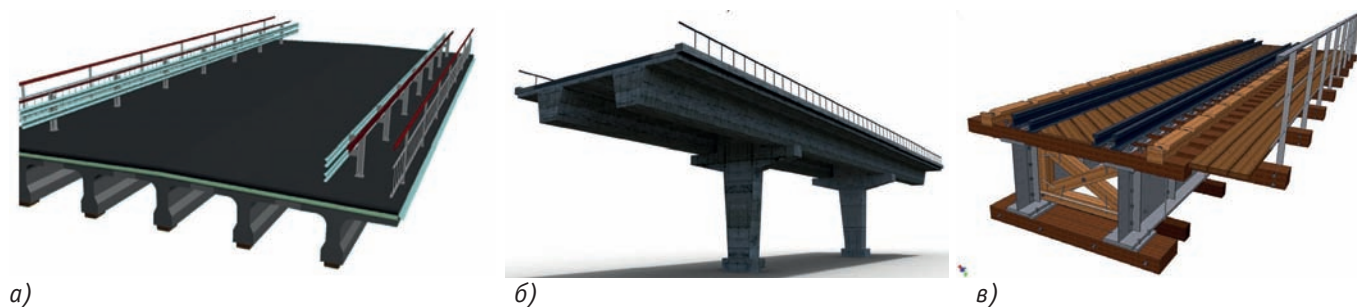


Рис. 2. Конструкции пролётных строений мостов: а) с применением сборных железобетонных элементов; б) с применением монолитных железобетонных элементов; в) составной мост.

колебаний. Энергию, поглощаемую за один цикл вследствие вязкого демпфирования, можно найти, вычисляя работу силы на интервале, равном одному циклу колебаний:

$$D_S = \oint F d\omega = \int_0^{2\pi/\omega} F \dot{w} dt = F \int_0^{2\pi/\omega} \cos \omega t [-A_1 \omega \sin(\omega t - \varepsilon)] dt = \pi C \omega A_1^2. \quad (2)$$

При гистерезисном демпфировании имеем:

$$D_S = F \int_0^{2\pi/\omega} \cos \omega t \operatorname{Re} [B_1 i \omega e^{i(\omega t - \varepsilon)}] dt = \pi k \eta B_1^2. \quad (3)$$

Различие между вязким и гистерезисным демпфированием для системы с одной степенью свободы, на которую действует возбуждающая сила, показано в таблице 1.

В рамках данной работы исследовались динамические характеристики различных составов конструкционных материалов, планируемых к применению в пролётных строениях мостов. Состав разработан в [18–20]. На основе разработанного вяжущего изготовлены высокопрочные лёгкие бетоны, которые представляют собой композиционный материал на минеральной основе, наполненный полыми стеклянными или керамическими микросферами. Приготовление бетона заключается в совмещении вяжущего вещества, минеральных добавок (микрокремнезёма и муки кварцевого песка) и за-

полнителя – фракционированного кварцевого песка, в соотношении согласно [20] (таблица 2), обеспечивающем достижение требуемой плотности материала. Исследование выполнено на составах высокопрочного лёгкого бетона (ВПЛБ) с варьируемой средней плотностью 1500, 1700 и 1900 кг/м³, которое обеспечивалось требуемым содержанием полых микросфер. В качестве контрольного состава использовался состав тяжёлого мелкозернистого бетона без полого наполнителя (ТБ) средней плотностью 2400 кг/м³. Изготавливались две серии образцов на полых стеклянных («с») и керамических («к») микросферах. Дополнительно в качестве модифицирующего компонента применялась полипропиленовая фибра («ф»).

Механические свойства высокопрочных лёгких бетонов зависят от плотности композита, варьируемой содержанием полых микросфер. Составы на полых стеклянных микросферах обладают большей прочностью при изгибе и сжатии, чем на

Таблица 2. Результаты испытаний

Наименование материала	Среднее значение параметра		
	η	ζ	Модуль упругости, Па
1500к	0.042139	0.021069	1.69E+10
1500к-ф	0.027929	0.013964	1.88E+10
1500с	0.133222	0.066611	1.02E+10
1500с-ф	0.170933	0.085466	9.93E+09
1700к	0.050769	0.025385	1.98E+10
1700к-ф	0.037689	0.018845	2.19E+10
1700с	0.090603	0.045302	1.51E+10
1700с-ф	0.108577	0.054288	1.61E+10
1900к	0.069843	0.034921	2.56E+10
1900к-ф	0.07098	0.03549	2.73E+10
1900с	0.034394	0.017197	2.09E+10
1900с-ф	0.02504	0.01252	2.01E+10
ТБ	0.019951	0.009976	3.74E+10
ТБ-ф	0.016878	0.008439	3.95E+10

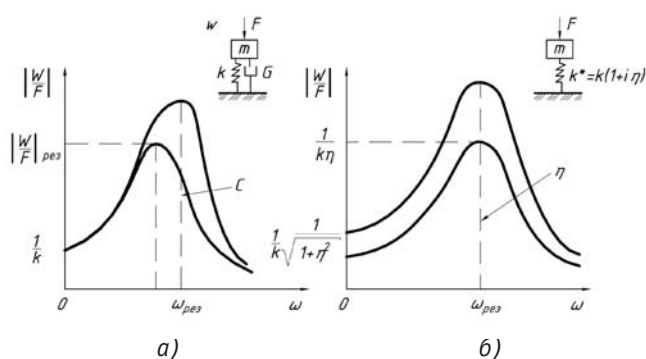


Рис. 3. Динамические перемещения при колебаниях с демпфированием: а) вязким; б) гистерезисным

Таблица 1. Сравнение вынужденных колебаний систем с одной степенью свободы и вязким и гистерезисным демпфированием

Характеристики	Вязкое демпфирование	Гистерезисное демпфирование
Дифференциальное уравнение	$m\ddot{w} + C\dot{w} + kw = F \cos \omega t$	$m\ddot{w} + k(1 + i\eta)w = \operatorname{Re}[Fe^{i\omega t}]$
Частное решение (установившееся поведение при вынужденных колебаниях)	$W = A_1 \cos(\omega t - \varepsilon)$ $A_1 = \frac{F}{\sqrt{(k - m\omega^2)^2 + \omega^2 C^2}}$	$W = B_1 \cos(\omega t - \varepsilon)$ $B_1 = \frac{F}{\sqrt{(k - m\omega^2)^2 + k^2 \eta^2}}$
Энергия, поглощаемая за один цикл	$D = \pi C \omega A_1^2$	$D = \pi k \eta B_1^2$
Резонансная частота	Уменьшается с ростом параметра C	Не зависит от коэффициента η
Статическое перемещение при $\omega = 0$	F/k	Зависит от параметра η
Резонансная амплитуда	Зависит от всех параметров уравнения	Не зависит от массы



Рис. 4. Общий вид проведения испытаний

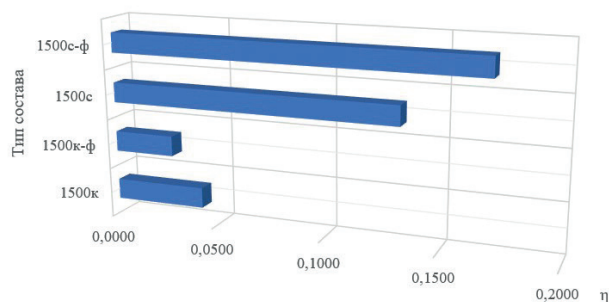


Рис. 5. Зависимость коэффициента потерь η от составов плотностью 1500 кг/м^3

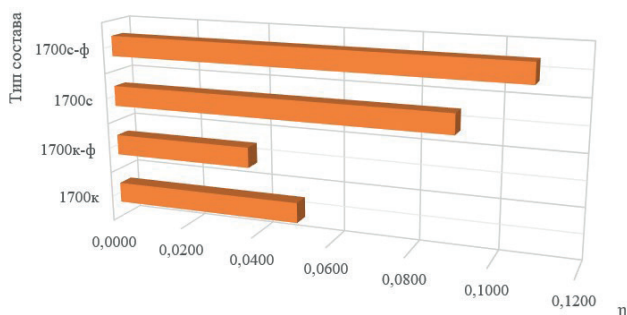


Рис. 6. Зависимость коэффициента потерь η от составов плотностью 1700 кг/м^3

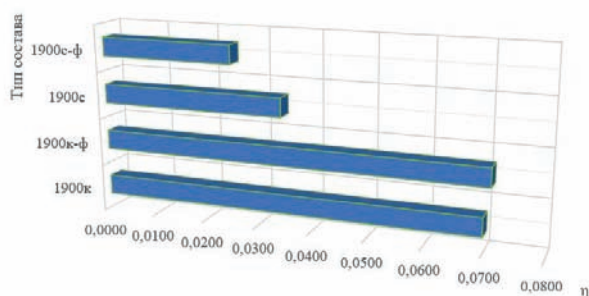


Рис. 7. Зависимость коэффициента потерь η от составов плотностью 1900 кг/м^3

полых керамических микросферах. При средней плотности бетона $1500...1900 \text{ кг/м}^3$ прочность при изгибе составляет – $3,0...4,9 \text{ МПа}$; при сжатии – $45,5...65,5 \text{ МПа}$. Введение фибры в составы высокопрочного лёгкого бетона указанных плотностей позволяет увеличить показатели до $4,0...5,5 \text{ МПа}$ и $50,5...70,0 \text{ МПа}$ соответственно.

Динамические испытания проводили по методике ГОСТ ИСО 7626-5-99² на призматических образцах размерами $160 \times 40 \times 40 \text{ мм}$. Возмущение создавали, возбуждая ударным молотком типа Bruel&Kjaer 8202 (с датчиком силы Bruel&Kjaer 8200) колебания бетонной призмы, шарнирно закреплённой на опорах. Отклик регистрировали в нескольких точках синхронно с приложенной нагрузкой с помощью зарядовых акселерометров типа Bruel&Kjaer 4375. Общее фото проведения испытаний представлено на рисунке 4.

Сигналы с датчиков силы и вибрации после каждого удара поступают на фильтры нижних частот (ФНЧ), позволяющие избежать переноса высокочастотных составляющих в диапазон частот измерений при дискретизации, после чего производится их аналого-цифровое преобразование (АЦП) для формирования выборки. Каждая цифровая запись соответствует одному ударному воздействию. Для каждой записи вычисляют ДПФ. Для улучшения оценки может быть применено усреднение по частотной области нескольких реализаций частотной характеристики, полученных для одних и тех же точек измерения и возбуждения.

На основании определения стабильной частоты колебаний, соответствующей изгибной форме, при которой максимум действительной части формы колебаний соответствует пучности в датчике, расположенном в середине пролёта тестового образца, а сдвиг фаз (мнимая часть вектора формы колебаний) между датчиками, расположенными в середине и в третях пролёта образца, отличается на $\pi/2$, определены коэффициент потерь η и коэффициент относительного демпфирования ζ . Сводные результаты испытаний приведены в таблице 2.

Зависимость коэффициент потерь η от типа состава представлена на рисунке 5 для состава плотностью 1500 кг/м^3 .

Как видно из графика, для составов плотностью 1500 кг/м^3 , наличие стеклянных микросфер повышает величину коэффициента потерь в четыре раза относительно составов с керамическими микросферами.

Зависимость коэффициент потерь η от типа состава представлена на рисунке 6 для состава плотностью 1700 кг/м^3 .

Для составов плотностью 1700 кг/м^3 наблюдаются схожие зависимости, как и для составов плотностью 1500 кг/м^3 . При этом наличие стеклянных микросфер повышает величину коэффициента потерь в среднем в 2–2,5 раза относительно составов с керамическими микросферами.

Зависимость коэффициент потерь η от типа состава представлена на рисунке 7 для состава плотностью 1900 кг/м^3 .

² ГОСТ ИСО 7626-5-99. Вибрация и удар. Экспериментальное определение механической подвижности. Часть 5. Измерения, использующие ударное возбуждение возбудителем, не прикрепляемым к конструкции (<http://vsegest.com/Catalog/28/28460.shtml>).

Для данного состава наблюдается обратная зависимость, чем для составов плотностью 1500 и 1700 кг/м³: коэффициент потерь для составов со стеклянными микросферами в среднем в 2,5 – 2,8 раза ниже, чем для керамических микросфер.

Зависимость коэффициента потерь от плотности состава для различного типа добавки (фибра) и типа микросфер (керамические или стеклянные) показаны на рисунке 8.

Как видно из графика, представленного на рисунке 8, введение керамических микросфер повышает коэффициент потерь при повышении плотности состава с 1500 до 1900 кг/м³. Напротив, введение сферических микросфер снижает величину коэффициента потерь в девять раз при повышении плотности составов с 1500 до 1900 кг/м³.

Введение фибры в составы с керамическими сферами приводит к пропорциональному понижению коэффициента потерь относительно составов без фибры при увеличении плотности состава. Напротив, введение фибры в составы с стеклянными микросферами повышает коэффициент потерь относительно составов без фибры.

В таблице 3 представлены аппроксимационные зависимости коэффициента потерь η от плотности образца ρ для каждого из вида заполнителей, полученные по результатам анализа графиков, показанных на рисунке 8.

Зависимость модуля упругости от плотности состава для различного типа добавки (фибра) и типа

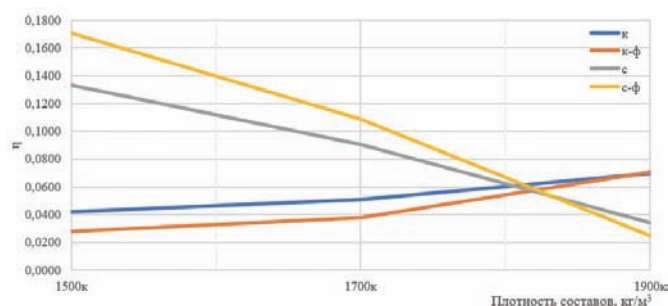


Рис. 8. Зависимость коэффициента потерь η от плотности состава для различных типов добавок.

Таблица 3. Зависимости коэффициента потерь от плотности образца

№ п/п	Тип добавки	Формула
1	керамические микросферы	$\eta = 1,305 \cdot 10^{-7} \rho^2 - 0,0003746 \rho + 0,3103$
2	керамические микросферы с фиброй	$\eta = 2,941 \cdot 10^{-7} \rho^2 - 0,0008924 \rho + 0,7048$
3	стеклянные микросферы	$\eta = -1,699 \cdot 10^{-7} \rho^2 + 0,0003305 \rho + 0,01965$
4	стеклянные микросферы с фиброй	$\eta = -2,647 \cdot 10^{-7} \rho^2 + 0,0005354 \rho - 0,03651$

микросфер (керамические или стеклянные) показана на рисунке 9.

Динамический модуль упругости возрастает у всех составов при увеличении плотности образца. При этом у составов с керамическими микросферами динамический модуль упругости на 30–40% выше, чем у составов со стеклянными микросферами. Введение фибры в составы со стеклянными микросферами весьма мало влияет на изменение их модуля упругости. Введение фибры в составы с керамическими микросферами на 11% увеличивает их модуль упругости по сравнению с составами без фибры.

Для базового состава из тяжёлого бетона (маркировка «ТБ») наличие фибры снижает среднее значение коэффициента потерь с 0,02 до 0,017 (снижение на 34%). При этом величина модуля упругости увеличивается на 12%.

В таблице 4 представлены аппроксимационные зависимости коэффициента потерь от плотности образца для каждого из вида заполнителей, полученные по результатам анализа графиков, показанных на рисунке 9.

По результатам исследований, выполненных с применением методов экспериментального модального анализа, определены величины коэффициентов потерь и динамического модуля упругости различных составов конструкционных материалов, планируемых к применению в пролётных строениях мостов. Определены зависимости коэффициента потерь от плотности

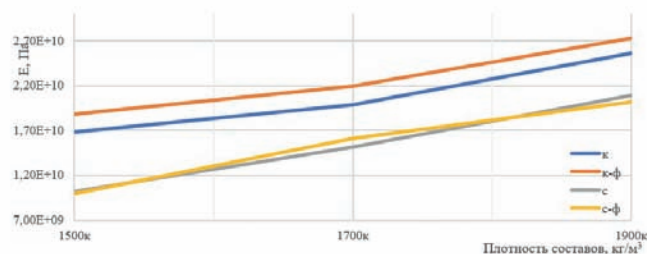


Рис. 9. Зависимость модуля упругости от плотности состава для различных типов добавок

Таблица 4. Зависимости коэффициента потерь от плотности образца

№ п/п	Тип добавки	Формула
1	керамические микросферы	$E = 3,477 \cdot 10^4 \rho^2 - 9,629 \cdot 10^7 \rho + 8,305 \cdot 10^{10}$
2	керамические микросферы с фиброй	$E = 2,827 \cdot 10^4 \rho^2 - 7,49 \cdot 10^7 \rho + 6,755 \cdot 10^{10}$
3	стеклянные микросферы	$E = 1,032 \cdot 10^4 \rho^2 - 8,247 \cdot 10^6 \rho - 6,738 \cdot 10^8$
4	стеклянные микросферы с фиброй	$E = -2,605 \cdot 10^4 \rho^2 + 1,141 \cdot 10^8 \rho - 1,027 \cdot 10^{11}$

образца, вида полого заполнителя и наличия микрофибры. Результаты исследований в дальнейшем могут быть использованы для моделирования динамического поведения указанных конструкций при действии ветровой, подвижной и иной нестационарной нагрузки, при которых ключевым значением являются амплитуды динамических деформаций в конструкции строения. С практической точки зрения, результаты работы могут быть использованы для корректировки составов бетонов применяемых в пролётных строениях для получения заданных характеристик динамической податливости.

Список источников

1. Гостеев Ю.А. Влияние формы на аэродинамические характеристики балочных мостов / Ю.А. Гостеев, А.Д. Обуховский, С.Д. Саленко. – Текст: электронный // Magazine of Civil Engineering. – 2014. – № 5 (49). – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/vliyanie-formy-na-aerodinamicheskie-harakteristiki-balochnyh-mostov> (дата обращения: 23.06.2022).
2. Vezza, M. Application of a discrete vortex method for the analysis of suspension bridge deck sections / M. Vezza, I. Taylor // Journal of Wind and Structure. – 2001. – Vol. 4. – Pp. 333–352.
3. Szynal, D. (2019). Vibration damping in road bridges – two case studies of full-scale experiments / Szynal Daniel & Janas Lucjan // MATEC Web of Conferences. – 2019. – Vol. 298. – URL: 285.00019.10.1051/mateconf/201928500019 (дата обращения: 23.06.2022). DOI: <https://doi.org/10.1051/mateconf/201928500019>.
4. Sunjoong, Kim. Damping Identification of Bridges Under Nonstationary Ambient Vibration / Sunjoong Kim, Ho-Kyung Kim / Engineering. – 2017. – Vol. 3, Iss. 6. – P. 839–844. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.eng.2017.11.002>.
5. Hoang Trong Lam. Investigation of Turbulence Effects on the Aeroelastic Properties of a Truss Bridge Deck Section / Hoang Trong Lam, Hiroshi Katsuchi, Hitoshi Yamada // Engineering. 2017. – Vol. 3, Iss. 6. – P. 845–853. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.eng.2017.10.001>.
6. Andersson, A. Vibration Mitigation of Railway Bridges using Adaptive Damping Control / Andersson, Andreas & Karoumi, Raid & O'Connor, Alan // IABSE Symposium Report. – 2013. – 99. 10.2749/222137813806520947. DOI: 10.2749/222137813806520947
7. Овчинников, И.И. Танцующий мост в Волгограде: причины, аналогии, мероприятия. Часть 2. Аналогии, мероприятия / И.И. Овчинников, И.Г. Овчинников, В.О. Филиппова. – Текст: электронный // Вестник евразийской науки. – 2015. – Том 7, № 6 (31). – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/tantsuyuschiy-most-v-volgograd-prichiny-analogii-meropriyatiya-chast-2-analogii-meropriyatiya> (дата обращения: 23.06.2022).
8. ОДМ 218.2.040-2014. Методические рекомендации по оценке аэродинамических характеристик сечений пролетных строений мостов / Текст: непосредственный. – М. : Информавтодор, 2014.
9. Rossikhin, Yu.A Nonlinear dynamic response of a thin plate embedded in a fractional viscoelastic medium under combinational internal resonances / Yu.A Rossikhin, M.V. Shitikova // Appl Mech Mat. – 2014. – № 595. – P. 105–110. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.595.105/.
10. Rossikhin Yu.A., Shitikova M.V. (1998) Application of fractional calculus for analysis of nonlinear damped vibrations of suspension bridges / Yu.A Rossikhin, M.V. Shitikova // // ASCE J Eng Mech. – 1998. – № 124. – P. 1029–1036.
11. Operational field monitoring of interactive vortex-induced vibrations between two parallel cable-stayed bridges / S.J. Kim, H.K. Kim, R. Calmer [et al.] // J Wind Eng Ind Aerodyn. – 2013. – № 123 (Pt A). – P. 143–154.
12. Kim, S. Damping identification and serviceability assessment of a cable-stayed bridge based on operational monitoring data / S. Kim, J. Park, H.K. Kim // J Bridge Eng. – 2016. – № 22 (3). – P. 04016123.
13. Long-term structural performance monitoring of bridges: Phase II: Development of baseline model and methodology for health monitoring and damage assessment / M.Q. Feng, Y. Fukuda, Y.B. Chen [et al.] // Final report California Department of Transportation. – Sacramento, 2006, Oct. – Report No.: CA07-0245. Contract No.: RTA59A0311.
14. Performance evaluation of Canton Tower under winds based on full-scale data / Y.L. Guo, A. Kareem, Y.Q. Ni, W.Y. Liao // J Wind Eng Ind Aerodyn. – 2012. – № 104–106. – P. 116–128.
15. Lin, C.S. Modal identification from nonstationary ambient response data using extended random decrement algorithm / C.S. Lin, D.Y. Chiang // Comput Struct. – 2013. – № 119. – P. 104–114.
16. Загора А.Л. Гашение колебаний мостовых конструкций / А.Л. Загора. – Текст: электронный // Наука и прогресс транспорта. Вестник Днепропетровского национального университета железнодорожного транспорта. – 2005. – № 6. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/gashenie-kolebaniy-mostovykh-konstruktsiy> (дата обращения: 10.10.2021).
17. Аварии транспортных сооружений и их предупреждение: учебное пособие для магистрантов направлению 08.04.01 «Строительство». Прикладная программа «Искусственные сооружения на транспорте, способы возведения и эксплуатации» / И. И. Овчинников, Ш. Н. Валиев, И. Г. Овчинников, И. С. Шатилов. – Текст: непосредственный. – Чебоксары : Среда, 2020. – 216 с.
18. Possibilities and limitations of high-strength lightweight fiber-reinforced concrete structures / T.Q. Duong, N.T. Vu, A.S. Inozemtcev, E.V. Korolev // Journal of Physics : Conference Series. – 2020. – № 1425 (1)ю – P. 012067
19. Иноземцев, А.С. Сравнительный анализ влияния наномодифицирования и микродисперсного армирования на процесс и параметры разрушения высокопрочных лёгких бетонов / А.С. Иноземцев, Е.В. Королев. – Текст: непосредственный // Строительные материалы. – 2017. – № 7. – С. 11–15.
20. Королев Е.В., Иноземцев А.С. Высокопрочный легкий бетон: патент на изобретение RU 2515450 С1. Опубликовано 10.05.2014; бюлл. № 13.

References

1. Gosteev Y.A., Obukhovskii A.D., Salenko S.D. Vliyanie formy na aerodinamicheskie kharakteristiki balochnykh mostov [Influence of the Shape on Aerodynamic Characteristics of Girder Bridges]. In: *Inzhenerno-stroitel'nyi zhurnal [Magazine of Civil Engineering]*, 2014, no. 5 (49). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/vliyanie-formy-na-aerodinamicheskie-kharakteristiki-balochnykh-mostov> (Accessed 06/23/2022). (In Russ., abstr. in Engl.)
2. Vezza M., Taylor I. Application of a discrete vortex method for the analysis of suspension bridge deck sections. In: *Journal of Wind and Structure*, 2001, Vol. 4, pp. 333–352. (In Engl.)
3. Szydal Daniel & Janas Lucjan. (2019). Vibration damping in road bridges – two case studies of full-scale experiments. In: *MATEC Web of Conferences*, 2019, no. 285, pp. 00019. URL: [10.1051/mateconf/201928500019](https://doi.org/10.1051/mateconf/201928500019). (In Engl.)
4. Sunjoong Kim, Ho-Kyung Kim. Damping Identification of Bridges Under Nonstationary Ambient Vibration. In: *Engineering*, 2017, Volume 3, Issue 6, pp. 839–844. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.eng.2017.11.002>. (In Engl.)
5. Hoang Trong Lam, Hiroshi Katsuchi, Hitoshi Yamada, Investigation of Turbulence Effects on the Aeroelastic Properties of a Truss Bridge Deck Section, *Engineering*, Vol. 3, Iss. 6, 2017, pp. 845–853, <https://doi.org/10.1016/j.eng.2017.10.001>. (In Engl.)
6. Andersson, Andreas & Karoumi, Raid & O'Connor, Alan. (2013). Vibration Mitigation of Railway Bridges using Adaptive Damping Control. IABSE Symposium Report. 99. 10.2749/222137813806520947. (In Engl.)
7. Ovchinnikov I.I., Ovchinnikov I.G., Filippova V.O. Tantsuyushchii most v Volgogradе: prichiny, analogii, meropriyatiya. Chast' 2. Analogii, meropriyatiya. In: *Vestnik evraziiskoi nauki [Bulletin of Eurasian Science]*. 2015. №6 (31). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/tantsuyushchii-most-v-volgogradе-prichiny-analogii-meropriyatiya-chast-2-analogii-meropriyatiya> (Accessed 06/23/2022). (In Russ., abstr. in Engl.)
8. ODM 218.2.040-2014. Metodicheskie rekomendatsii po otsenke aerodinamicheskikh kharakteristik sechenii proletrykh stroenii mostov [Methodological recommendations for assessing the aerodynamic characteristics of the sections of spans of bridges]. Moscow, Informavtodor, 2014. (In Russ.)
9. Rossikhin Yu.A., Shitikova M.V. (2014b) Nonlinear dynamic response of a thin plate embedded in a fractional viscoelastic medium under combinational internal resonances. In: *Appl Mech Mat*, 2014, 595: 105–110. (In Engl.)
10. Rossikhin Yu.A., Shitikova M.V. (1998) Application of fractional calculus for analysis of nonlinear damped vibrations of suspension bridges. In: *ASCE J Eng Mech* 124:1029–1036. (In Engl.)
11. S.J. Kim, H.K. Kim, R. Calmer, J. Park, G.S. Kim, D.K. Lee Operational field monitoring of interactive vortex-induced vibrations between two parallel cable-stayed bridges. In: *J Wind Eng Ind Aerodyn*, 123 (Pt A) (2013), pp. 143–154. (In Engl.)
12. S. Kim, J. Park, H.K. Kim Damping identification and serviceability assessment of a cable-stayed bridge based on operational monitoring data. In: *J Bridge Eng*, 22 (3) (2016), p. 04016123. (In Engl.)
13. M.Q. Feng, Y. Fukuda, Y.B. Chen, S. Soyoz, S. Lee Long-term structural performance monitoring of bridges: Phase II: Development of baseline model and methodology for health monitoring and damage assessment. In: *Final report California Department of Transportation*, Sacramento (2006) Oct. Report No.: CA07-0245. Contract No.: RTA59A0311. (In Engl.)
14. Y.L. Guo, A. Kareem, Y.Q. Ni, W.Y. Liao Performance evaluation of Canton Tower under winds based on full-scale data. In: *J Wind Eng Ind Aerodyn*, 104–106 (2012), pp. 116–128. (In Engl.)
15. C.S. Lin, D.Y. Chiang. Modal identification from nonstationary ambient response data using extended random decrement algorithm. In: *Comput Struct*, 119 (2013), pp. 104–114. (In Engl.)
16. Zakora A.L. Gashenie kolebaniy mostovykh konstrukttsii [The Damping of Bridge Structures]. In: *Nauka i progress transporta. Vestnik Dnepropetrovskogo natsional'nogo universiteta zheleznodorozhnogo transporta [Science and progress of transport. Bulletin of the Dnepropetrovsk National University of Railway Transport]*. 2005, no. 6. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/gashenie-kolebaniy-mostovykh-konstrukttsiy> (data obrashcheniya: 10.10.2021). (In Russ., abstr. in Engl., Ukr.)
17. Ovchinnikov I.I., Valiev Sh. N., Ovchinnikov I.G., Shatilov I.S. Avarii transportnykh sooruzhenii i ikh preduprezhdenie: uchebnoe posobie dlya magistrantov napravleniyu 08.04.01 «Stroitel'stvo». Prikladnaya programma «Iskusstvennye sooruzheniya na transporte, sposoby vozvedeniya i ekspluatatsii» [Accidents of transport facilities and their prevention: a textbook for undergraduates in the direction 08.04.01 "Construction". Application program "Artificial structures in transport, methods of construction and operation"]. Cheboksary, Sreda Publ., 2020, 216 p. (In Russ.)
18. Duong, T.Q., Vu, N.T., Inozemtsev, A.S., Korolev, E.V. Possibilities and limitations of high-strength lightweight fiber-reinforced concrete structures. In: *Journal of Physics: Conference Series*, 2020, no. 1425 (1), pp. 012067. (In Engl.)
19. Inozemtsev A.S., Korolev E.V. Sravnitel'nyi analiz vliyaniya nanomodifitsirovaniya i mikrodispersnogo armirovaniya na protsess i parametry razrusheniya vysokoprochnykh legkikh betonov [Comparative Analysis of Influence of Nanomodification and Micro-Dispersed Reinforcement on the Process and Parameters of Destruction of High-Strength Lightweight Concrete]. In: *Stroitel'nye materialy (Construction Materials)*, 2017, no. 7, pp. 11–15. (In Russ., abstr. in Engl.)
20. Korolev E.V., Inozemtsev A.S. Vysokoprochnyy legkii beton : Patent RU 2515450 C1 [High-strength lightweight concrete: patent RU 2515450 C1] (published 10.05.2014; bul. no. 13).

Academia. Архитектура и строительство, № 3, стр. 125–131.

Academia. Architecture and Construction, № 3, стр. 125–131.

Исследования и теория

Научная статья

УДК 692.2

doi: 10.22337/2077-9038-2022-3-125-131

Покровская Елена Николаевна (Москва). Доктор технических наук. Кафедра комплексной безопасности в строительстве Национального исследовательского Московского государственного строительного университета (129337, Москва, Ярославское шоссе, 26. НИУ МГСУ). Эл. почта: elenapokrovskaya@bk.ru.

Полтаруха Олег Павлович (Москва). Кандидат биологических наук. Лаборатория тропических технологий Института проблем экологии и эволюции им. А.Н. Северцова РАН (119071, Москва, Ленинский просп., 33. ИПЭЭ РАН). Эл. почта: poltarukha@rambler.ru.

Pokrovskaya Elena N. (Moscow). Doctor of Technical Sciences. Department of Integrated Safety in Construction of the National Research Moscow State University of Civil Engineering (129337, 26, Yaroslavskoye Shosse, Moscow. NRU MGSU). E-mail: elenapokrovskaya@bk.ru.

Poltarukha Oleg P. (Moscow). Candidate of Biological Sciences. Senior Researcher, Laboratory of Tropical Technologies Institute of Problems of Ecology and Evolution. A.N. Severtsov RAS (33, Leninsky prosp., Moscow, 119071. IEE RAS). E-mail: poltarukha@rambler.ru.

Биокоррозия фресок баптистерия храма преподобных Зосимы и Савватия Соловецких Свято-Троицкой Сергиевой Лавры

Аннотация. В статье обсуждается разрушение фресок баптистерия храма преподобных Зосимы и Савватия Соловецких Свято-Троицкой Сергиевой Лавры. Через некоторое время после росписи стен подклета храма фресками было обнаружено их разрушение под действием микроорганизмов, а также увеличение влажности стен. Выполненное исследование показало, что причинами этого было неправильное устройство гидроизоляции крыши храма, а также его фундамента. После проведённого в 2014 году частичного ремонта кровли и фундамента, а также установки в помещениях баптистерия осушителей воздуха состояние внутренних помещений баптистерия значительно улучшилось.

Тем не менее, как показал осмотр (февраль, 2022), поступление значительного количества влаги через стены во внутренние помещения баптистерия продолжается. При этом продолжается разрушение фресок, причём развитие биокоррозии усиливается из-за высолов. В тех помещениях, где влияние работы осушителей воздуха снижено, выявляются сырые участки поверхностей стен.

На основании проведённых исследований и наблюдений были даны рекомендации по предотвращению биологических повреждений росписи стен баптистерия, которые могут быть

использованы для фресок храмов, стены которых подвержены увлажнению.

Ключевые слова: Свято-Троицкая Сергиева Лавра, биокоррозия, защита памятников архитектуры от биоразрушения

Благодарность. Авторы благодарят ризничего Свято-Троицкой Сергиевой Лавры иеромонаха Сильвестра за постоянное внимание к нашей работе и помощь в её проведении.

Biocorrosion of Frescoes in the Baptistry of the Church of the Saint Zosima and Savvatiy of Solovetsky of the Holy Trinity Sergius Lavra

Abstract. The article discusses the destruction of the frescoes in the baptistry of the church of the Monk Zosima and Savatiy Solovetsky of the Holy Trinity Sergius Lavra. Some time after the walls of the basement of the temple were painted with frescoes, their destruction under the action of microorganisms, as well as an increase in the humidity of the walls, were discovered. The study showed that the reasons for this were due to the improper waterproofing of the roof of the temple, as well as its foundation. After the partial repair of the roof and foundation, carried out in 2014, as well as the installation of dehumidifiers in the baptistry, the condition of the interior of the baptistry has improved significantly.

However, as shown by the inspection conducted in February 2022, the flow of a significant amount of moisture through the walls into the interior of the baptistery continues. At the same time, the destruction of frescoes continues, and the development of biological damage is intensified due to efflorescence. In those rooms where the influence of the operation of air dehumidifiers is reduced, areas are identified where the wall surfaces are damp.

Based on the research and observations carried out, recommendations were given to prevent biological damage to the wall paintings of the baptistery, which can be used for the frescoes of temples, the walls of which are subject to moisture.

Keywords: Holy Trinity Sergius Lavra, biocorrosion, protection of architectural monuments from biodestruction

Acknowledgments. The authors would like to thank the sacristan of the Holy Trinity Sergius Lavra, Hieromonk Sylvester, for his constant attention to our work and assistance.

Храм преподобных Зосимы и Савватия Соловецких (далее храм прпп. Зосимы и Савватия) Свято-Троицкой Сергиевой Лавры был построен в 1635–1637 годы, имеет богатую историю [1; 2] и представляет большую историческую, культурную и художественную ценность (рис. 1). Как показали результаты исследований [3; 4], в настоящее время многие памятники архитектуры Свято-Троицкой Сергиевой Лавры в той или иной степени подвергаются биоповреждениям, вызванным, главным образом, микроорганизмами. К сожалению, храм Зосимы и Савватия не стал исключением.

В 2002 году в подклете храма прпп. Зосимы и Савватия был устроен баптистерий. В помещении установили крестильную ванну, а стены были расписаны фресками А.Н. Солдатовым. С целью защиты от биокоррозии стены подклета были обработаны составом «Мипор» на основе фосфорорганических соединений. Биозащитная эффективность препаратов на основе фосфорорганических соединений была ранее подтверждена результатами многочисленных работ [5; 6]. Состав «Мипор» в течение более чем двадцати лет широко использовался для биоцидной обработки зданий и сооружений Свято-Троицкой Сергиевой Лавры, в частности, Троицкого собора, надвратного храма в честь Рождества Иоанна Предтечи, церкви во имя Смоленской иконы Божьей Матери, Покровского собора в Московской духовной Академии, библиотеки и других зданий Академии, Больничных и Казначейских палат [3; 4]. При этом было определено, что препарат нейтрален к поверхностям, покрытым живописными материалами, не вызывает никаких изменений колорита, тона, фактуры и т.д. Взятые вскоре после обработки микологические анализы показали отсутствие мицелия и спор плесневых грибов.

Со временем было обнаружено увеличение влажности стен справа и слева от входа в алтарную часть баптистерия, а также разрушение фресок (рис. 2 а). Микробиологическое обследование (рис. 2 б) выявило наличие следующих видов



а)



б)

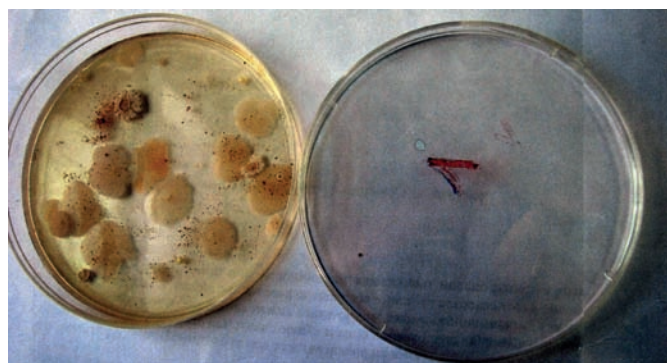
Рис. 1. Храм прпп Зосимы и Савватия Троице-Сергиевой Лавры¹: а) общий вид; б) интерьер баптистерия с крестильной ванной

¹ Статья проиллюстрирована фото, выполненными авторами статьи в храме прпп. Зосимы и Савватия.

биоразрушителей – плесневых грибов родов *Alternaria*, *Aspergillus*, *Cladosporium*, *Mucor*, *Paecilomyces*, *Penicillium*, *Trichoderma*, дрожжевых грибов родов *Candida*, *Lipomices*, бактерий рода *Pseudomonas*, актиномицетов рода *Actinomyces*. Поскольку в настоящей работе не использовались селективные среды для выявления бактерий, вызывающих биоразрушение, мы не можем утверждать, что они играют важную роль в этом процессе. Тем не менее мы отмечаем их наличие в исследованных пробах. Определение микроорганизмов проводилось в соответствии с рекомендациями и с использованием литературы, указанной в ГОСТ Р ИСО 16000-17-2012².



а)



б)

Рис. 2. Биокоррозия фрески баптистерия в храме прпп. Зосимы и Савватия Троице-Сергиевой Лавры: а) фрагмент фрески; б) чашка Петри с колониями микроорганизмов, выросшими из образцов штукатурки, взятых в баптистерии. Фото 2021 года

Результаты исследования приведены в таблице 1. Следует подчеркнуть, что некоторые из найденных видов, в первую очередь, представители рода *Paecilomyces*, могут представлять опасность для человека, вызывая глубокие системные микозы [7–10]. Были выявлены высокие концентрации жизнеспособных спор плесневых грибов на исследованных поверхностях.

Также методом седиментации, как это указано в ГОСТ Р ИСО 16000-17-2012, измерялась концентрация жизнеспособных спор микроорганизмов в воздухе внутренних помещений. Для этого открытые чашки Петри с питательной средой помещали в разные места помещения и выдерживали в течение получаса, после чего накрывали их крышками и выдерживали в благоприятных для микроорганизмов условиях. Результаты исследования, приведённые в таблице 2, показали высокие концентрации в воздухе спор видов биоразрушителей. Это позволило дополнить данные, полученные при анализе поражённых поверхностей.

Даже в ходе визуального осмотра внутренних помещений храма отмечалась повышенная влажность в баптистерии, несущая стена которого была постоянно мокрой. Измерения подтвердили данные осмотра и показали, что влажность стен баптистерия в три-четыре раза выше, чем в других помещениях. Карта увлажнения (рис. 3) демонстрирует, что увлажнение стен имеет неравномерный характер и увеличивается в три раза в направлении сверху вниз, достигая максимума

² ГОСТ Р ИСО 16000-17-2012. Национальный стандарт Российской Федерации «Воздух замкнутых помещений». Часть 17. Обнаружение и подсчёт плесневых грибов. Метод культивирования (<http://vse gost.com/Catalog/98/984.shtml>).

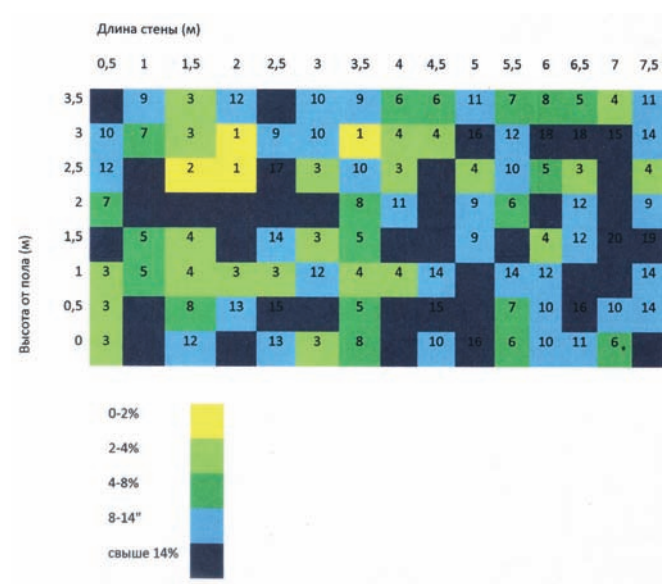


Рис. 3. Карта увлажнения стены, расположенной справа от алтарной части баптистерия. 2012 год

на уровне пола. В некоторых местах влажность превышает допустимые нормы в шесть и более раз.

Проведённое исследование показало, что основной причиной повышенной влажности являются регулярные протечки с крыши смотровой площадки (гульбища), находящейся над баптистерием. Эти протечки связаны с неправильно обустроенной кровлей, в первую очередь в области её примыкания к несущим стенам и водосточным трубам. Другой причиной повышенной влажности является неправильно обустроенная или отсутствующая гидроизоляция фундамента, из-за чего происходит капиллярный подсос дождевых и талых вод в области примыкания к почве несущих конструкций. Также определённую роль играет высокая проницаемость стен для воды, связанная с возможными пустотами в связующем растворе и трещинами в кладке, а также с неоднородностью кирпичной кладки из-за использования при сооружении и ремонте храма разноразмерного кирпича. Теоретическим вопросам биокоррозии различных строительных материалов посвящены многочисленные работы. Среди них в первую очередь можно назвать [11–15]. Указанные обстоятельства создают благоприятную среду для роста плесневых грибов

и бактерий, которые не только способствуют разрушению внутренней росписи подклета, но и могут представлять опасность для несущих конструкций, а также для здоровья людей, посещающих баптистерий. При обильном увлажнении стен происходит частичная диффузия биоцидного препарата «Мипор» во влажную плёнку на поверхности фресок, что может снижать его эффективность.

В 2014 году был произведён частичный ремонт кровли гульбища, а также гидроизоляции фундамента храма. В баптистерии были установлены осушители воздуха, которые продолжают работать практически в непрерывном режиме по настоящее время. Это привело к значительному улучшению состояния баптистерия.

Осмотр внутренних помещений баптистерия, проходивший в феврале 2022 года, показал, что поступление значительного количества влаги через его стены во внутренние помещения продолжается. Однако из-за работы осушителей воздуха влажность стен во внутренних помещениях уменьшилась, что способствовало снижению скорости разрушения фресок. Косвенно о продолжающемся увлажнении стен свидетельствует то, что в алтарной части баптистерия, частично отделённой от его

Таблица 1. Результаты микологического анализа проб штукатурки со стен баптистерия храма прпп. Зосимы и Савватия

№ №	Место отбора пробы, характер повреждения	Микроорганизмы, обнаруженные в пробе		Количество жизнеспособных спор на 1 см ²	Число микроорганизмов в 1 г пробы, КОЕ
		Сусло-агар	Картофельный агар		
1	Низ левого угла алтаря	<i>Aspergillus niger</i> , <i>Trichoderma koningii</i> , <i>Penicillium chrysogenum</i> , <i>Mucor pusillus</i>	<i>Penicillium</i> sp., <i>Candida</i> sp., <i>Lypomices</i> sp., Грамположительных бактерий нет	>200	6·10 ⁶
2	Коридор	<i>Trichoderma koningii</i> , <i>Trichoderma viride</i> , <i>Aspergillus niger</i>	<i>Penicillium</i> sp., <i>Candida</i> sp.	198	5·10 ⁶
3	Коридор у входа в баптистерий	<i>Alternaria lternate</i> , <i>Trichoderma koningii</i> , <i>Trichoderma viride</i> , <i>Aspergillus niger</i>	<i>Penicillium</i> sp., <i>Aspergillus</i> sp., <i>Candida</i> sp., <i>Pseudomonas</i> sp.	>200	2·10 ⁷
4	Около вытяжки	<i>Aspergillus niger</i> , <i>Aspergillus glaucus</i> , <i>Trichoderma koningii</i> , <i>Penicillium chrysogenum</i>	<i>Penicillium</i> sp., <i>Candida</i> sp., <i>Pseudomonas</i> sp.	182	3·10 ⁶
5	С правой разрушенной стены рядом с входом в пом. 4	<i>Cladosporium</i> sp., <i>Paecilomyces variotii</i> , <i>Actinomyces</i> sp.	<i>Candida</i> sp., <i>Pseudomonas</i> sp.	116	3·10 ⁶
6	Из просверленного отверстия в стене справа от алтаря (Под фреской апо- стола Павла)	<i>Cladosporium</i> sp., <i>Paecilomyces variotii</i> , <i>Actinomyces</i> sp.	<i>Candida</i> sp., <i>Pseudomonas</i> sp.	108	3·10 ⁶
7	Левый угол алтаря	<i>Cladosporium</i> sp., <i>Paecilomyces variotii</i> , <i>Actinomyces</i> sp.	<i>Candida</i> sp., <i>Pseudomonas</i> sp.	128	3·10 ⁶
8	Под фреской апостола Иакова	<i>Alternaria alternata</i> , <i>Aspergillus glaucus</i> , <i>Penicillium chrysogenum</i>	<i>Penicillium</i> sp., <i>Candida</i> sp., <i>Lypomices</i> sp., <i>Pseudomonas</i> sp.	136	3·10 ⁶

основной части и испытывающей значительно меньшее воздействие осушителей воздуха, выявлены участки, на которых поверхности стен сырые. Фрески на этих участках начинают

Таблица 2. Результаты микологического анализа проб воздуха из помещений храма Зосима и Саватия

№ №	Место отбора пробы	Микроорганизмы, обнаруженные в пробе		Кол-во жизнеспособных спор на чашке Петри	Концентрация микроорганизмов в 1 м³ пробы, КОЕ
		Сусло-агар	Картофельный агар		
1	Вход в помещение 4, коридор	<i>Aspergillus flavus</i> , <i>Cladosporium</i> sp., <i>Penicillium bifforme</i> , <i>Penicillium chrysogenum</i>	<i>Penicillium</i> sp., <i>Candida</i> sp., Грамположительных бактерий нет	25	$1,2 \cdot 10^2$
2	Бортик ванны слева от алтаря напротив входа	<i>Aspergillus flavus</i> , <i>Penicillium bifforme</i> , <i>Penicillium chrysogenum</i>	<i>Penicillium</i> sp., <i>Lipomyces</i> sp., <i>Bacterium</i> sp.	34	$1,5 \cdot 10^2$
3	В центре алтаря на полу	<i>Cladosporium</i> sp., <i>Penicillium bifforme</i> , <i>Penicillium chrysogenum</i>	<i>Rhodotorula</i> sp., <i>Pseudomonas</i> sp.	33	$1,4 \cdot 10^2$
4	Бортик ванны справа от алтаря	<i>Aspergillus flavus</i> , <i>Penicillium bifforme</i> , <i>Fusarium</i> sp.	<i>Lipomyces</i> sp.	21	$2,8 \cdot 10$

разрушаться (рис. 4). Также продолжается разрушение фресок и в основной части баптистерия, причём развитие биокоррозии усиливается из-за высолов (рис. 5). Развитию этих высолов способствует, очевидно, сочетание интенсивного осушения воздуха во внутренних помещениях баптистерия и регулярного увлажнения его стен. Это приводит к тому, что дождевые и почвенные воды, проникающие в стены церкви, просачиваются в поверхностные слои внутренних частей стен и, испаряясь, оставляют на поверхности стен отложения минеральных солей, разрушающих штукатурку, а также красочный слой фресок. Определение солей в разрушенных частях фресок показало высокое содержание в составе высолов хлоридов и сульфатов.

При наружном осмотре храма прпп Зосимы и Савватия легко выявляются такие признаки регулярного и длительного увлажнения стен, как развитие водорослей. Наряду с указанными выше еще одной причиной этого может быть неправильное устройство ливневого водостока. Длительное увлажнение приводит к разрушению каменной кладки в нижней части стен, очевидно, из-за воды, которая, замерзая в щелях, постепенно раскалывает их (рис. 5).

С учётом вышеизложенного для предотвращения дальнейших биологических повреждений росписи стен баптистерия храма прпп. Зосимы и Савватия необходимо:

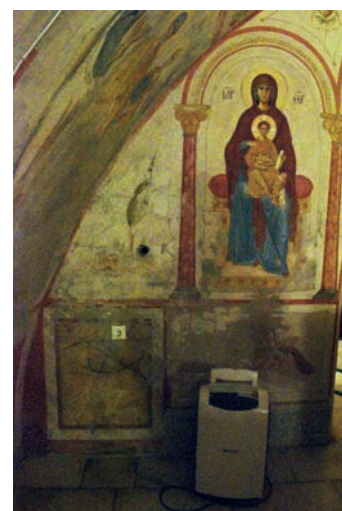
- 1) регулярно контролировать состояние и, при необходимости, осуществлять ремонт гидроизоляции крыши и фундамента церкви;
- 2) продолжать использование осушителей воздуха для поддержания низкой влажности в баптистерии и прилегающих к нему помещениях;
- 3) сразу после стабилизации влажностного режима в баптистерии и в прилегающих к нему помещениях провести антисептическую обработку биоцидными препаратами, прошедшими длительную успешную апробацию на объектах Свято-Троицкой Сергиевой Лавры.



а)



б)



в)

Рис. 4. Биокоррозия фресок: а) в алтарной части баптистерия; б) на стене слева от алтаря. Видны два осушителя воздуха; в) на стене слева от входа в алтарную часть. Виден осушитель воздуха. Февраль 2022 года



Рис. 5. Фрагмент разрушающейся каменной кладки в основании стены. Февраль 2022 года

На основании проведённых исследований и наблюдений можно сделать следующие выводы по защите исторических памятников архитектуры от биологического разрушения.

1. В ходе реставрационных работ могут возникать внешне незначительные изменения, приводящие к существенному повышению влажности стен. Эти изменения со временем активизируют процессы биологической коррозии, усиливаемые повышением концентрации солей в поверхностном слое.

2. Достаточно частое периодическое осушение воздуха в помещениях храмов приводит к значительному снижению риска биологических повреждений, но не исключает необходимости проведения периодических обследований и антисептических обработок эффективными биозащитными составами.

Список источников

1. Трофимов, И.В. Памятники архитектуры Троице-Сергиевой лавры. Исследования и реставрация / И.В. Трофимов. Текст: непосредственный. – М. : Госстройиздат, 1961. – 246 с.
2. Балдин, В.И. Троице-Сергиева лавра. Архитектурный ансамбль и художественные коллекции древнерусского искусства XIV–XVII вв. / В.И. Балдин. – Текст: непосредственный. – М. : Наука, 1996. – 549 с.
3. Покровская, Е.Н. Биозащита исторически застроенных территорий на примере Свято-Троицкой Сергиевой лавры / Е.Н. Покровская, В.В. Дмитриев, Ю.Л. Ковальчук. – Текст: непосредственный // Строительные материалы. Оборудование, технологии XXI века. – 2006. – № 11. – С. 28–29.
4. Покровская, Е.Н. Биокоррозия, сохранение памятников истории и архитектуры / Е.Н. Покровская, Ю.Л. Ковальчук. – Текст: непосредственный. – М. : МГСУ, 2013. – 212 с. ISBN 978-5-7264-0750-0.
5. Биологическое сопротивление материалов / В.И. Соломатов, В.Т. Ерофеев, В.Ф. Смирнов [и др.]. – Текст: непосредственный. – Саранск : МГУ им. Н.С. Огарёва, 2001 – 194 с. ISBN 5-7103-0539-1.

6. Покровская, Е.Н. Химико-микологические исследования и улучшение экологии внутри зданий / Е.Н. Покровская, Ю.Л. Ковальчук. – Текст: непосредственный // Вестник МГСУ. – 2012. – № 8. – С. 181–187. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/himiko-mikologicheskie-issledovaniya-i-uluchshenie-ekologii-vnutri-zdaniy-1> (дата обращения 01.08.2022)

7. Богомолова, Е.В. Потенциально опасные микромицеты жилых помещений / Е.В. Богомолова, И.Ю. Карцидели, Е.А. Миненко. – Текст: непосредственный // Микология и фитопатология. – 2009. – Т. 43 (6). – С. 506–513.

8. Стреляева, А.В. Диагностика и лечение пециломикоза легких / А.В. Стреляева, А.А. Свистунов, Р. Аль Джомма [и др.]. – Текст: непосредственный // Терапевтический архив. – 2015. – № 3 (87). – С. 53–58. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/diagnostika-i-lechenie-petsilomikoz-a-legkih> (дата обращения 17.03.2022).

9. Биоповреждение больничных зданий и их влияние на здоровье человека / В.Б. Антонов, Н.А. Беляков, Н.В. Васильева [и др.]. – Текст: непосредственный. – СПб : СПбМАПО, 2008. – 232 с. ISBN 978-5-89588-30-2.

10. Антонов, В.Б. Микогенные аллергии в городской экосистеме: эпидемиология, клиника, лечение / В.Б. Антонов. – Текст: непосредственный // Вестник Санкт-Петербургской медицинской академии последипломного образования. – 2010. – Т. 2 (4). – С. 77–81. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/mikogennye-allergii-v-gorodskoy-ekosisteme-epidemiologiya-klinika-lechenie> (дата обращения 01.08.2022)

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

12. Старцев, С.А. Проблемы обследования строительных конструкций, имеющих признаки биоповреждения / С.А. Старцев. – Текст: непосредственный // Инженерно-строительный журнал. – 2010. – № 7. – С. 41–46

13. Микодеструкция строительных и отделочных материалов внутри помещений / Д.Ю. Власов, Ю.И. Рябушева, Е.В. Сафронова [и др.]. – Текст: непосредственный // Проблемы медицинской микологии. – 2006. – Т. 8 (2). – С. 26–27.

14. Старцев, С.А. Проблемы биоповреждения памятников истории и архитектуры / С.А. Старцев. – Текст: непосредственный // Региональный семинар «Сохранение культурного наследия России. Стратегии. Технологии. Подготовка кадров в области охраны культурного наследия. – СПб – 2005. – Т. 1. – С. 20.

15. Крыленков, В.А. Биоразрушение среды обитания человека в городе – основная угроза безопасности его жизнедеятельности / В.А. Крыленков, С.А. Старцев. – Текст: непосредственный // Гидроизоляционные материалы – XXI век «AquaSTOP» : Сборник докладов 1-ой Международной научно-технической конференции. – СПб. – 2001 – С. 47.

References

1. Trofimov I.V. Pamyatniki arkhitektury Troitse-Sergievoi lavry. Issledovaniya i restavratsiya [Monuments of architecture of the Trinity-Sergius Lavra. Research and restoration]. Moscow, Gosstroizdat Publ., 1961, 246 p. (In Russ.)
2. Baldin V.I. Troitse-Sergievalavra. Arkhitekturnyi ansambl' i khudozhestvennye kollektsii drevnerusskogo iskusstva XIV–XVII vv. [Trinity-Sergius Lavra. Architectural Ensemble and Art Collections of Old Russian Art of the 14th–17th Centuries]. Moscow, Nauka, 1996, 549 p. (In Russ.)
3. Pokrovskaya E.N., Dmitriev V.V., Koval'chuk Yu.L. Biozashchita istoricheski zastroennykh territorii na primere Svyato-Troitskoi Sergievoi lavry [Biosecurity of historically built-up areas on the example of the Holy Trinity St. Sergius Lavra]. In: *Building materials. Equipment, technologies of the XXI century* [Building materials. Equipment, technologies of the XXI century], 2006, no. 11, pp. 28–29. (In Russ., abstr. in Engl.)
4. Pokrovskaya E.N., Koval'chuk Yu.L. Biokorroziya, sokhranenie pamyatnikov istorii i arkhitektury [Biocorrosion, preservation of monuments of history and architecture]. Moscow, MGSU Publ., 2013, 212 p. ISBN 978-5-7264-0750-0. (In Russ.)
5. Solomatov V.I., Erofeev V.T., Smirnov V.F., Semicheva A.S., Morozov E.A. Biologicheskoe soprotivlenie materialov [Biological resistance of materials]. Saransk, MRSU Publ., 2001, 194 p. ISBN 5-7103-0539-1. (In Russ.)
6. E.N. Pokrovskaya, Yu.L. Koval'chuk Khimiko-mikologicheskie issledovaniya i uluchshenie ekologii vnutri zdaniy [Chemical and mycological research and improvement of ecology inside buildings] In: *Vestnik MGSU [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]*, 2012, no 8, pp. 181–187. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/himiko-mikologicheskie-issledovaniya-i-uluchshenie-ekologii-vnutri-zdaniy-1> (Accessed 01/08/2022). (In Russ.)
7. Bogomolova E.V., Kartsideli V. I.Yu., Minenko E.A. Potentsial'no opasnye mikromitsety zhilykh pomeshchenii [Potentially dangerous micromycetes of residential premises]. In: *Mikologiya i fitopatologiya [Mycology and Phytopathology]*, 2009, Vol. 43 (6), pp. 506–513. (In Russ., abstr. in Engl.)
8. Strelyaeva A.V., Svistunov A.A., Dzhomaa R.A., Sapozhnikov S.A., Chebyshev N.V., Ashurov A.A., Maksimov M.L., Lazareva N.B., Gabchenko A.K., Sadykov V.M. Diagnostika i lechenie petsilomikozalegkikh [Diagnosis and treatment of pecilomycosis of the lungs]. In: *Terapevticheskii arkhiv [Therapeutic archive]*, 2015, no. 3 (87), pp. 53–58. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/diagnostika-i-lechenie-petsilomikoza-legkih> (Accessed 03/17/2022). (In Russ., abstr. in Engl.)
9. Antonov V.B., Belyakov N.A., Vasilyeva N.V., Elinov N.P., Startsev S.A., Khurtsilava O.G., Shcherbo A.P. Biopovrezhdenie bol'nichnykh zdaniy i ikh vliyanie na zdorov'e cheloveka [Bio-damage of hospital buildings and their impact on human health]. Saint-Petersburg, SPbMAPO Publ., 2008, 232 p. ISBN 978-5-89588-30-2 (In Russ., abstr. In Engl.)
10. Antonov V.B. Mikogennye allergii v gorodskoi ekosisteme: epidemiologiya, klinika, lechenie [Mycogenic allergies in the urban ecosystem: epidemiology, clinic, treatment]. In: *Vestnik Sankt-Petersburgskoy medicinskoi akademii poslediplomnogo obrazovaniya [Bulletin of the St. Petersburg Medical Academy of Postgraduate Education]*, 2010, V. 2 (4), pp. 77–81. <https://cyberleninka.ru/article/n/mikogennye-allergii-v-gorodskoy-ekosisteme-epidemiologiya-klinika-lechenie> (Accessed 01/08/2022) (In Russ., abstr. in Engl.)
11. Erofeev V.T., Fedortsov A.P., Bogatov A.D., Fedortsov V.A. Biokorroziya tsementnykh betonov, osobennosti ee razvitiya, otsenki i prognozirovaniya [Biocorrosion of cement concrete, features of its development, evaluation and forecasting]. In: *Fundamental'nye issledovaniya [Fundamental research]*, 2014, no 12 (4), pp. 708–716. (In Russ.)
12. Startsev S.A. Problemy obsledovaniya stroitel'nykh konstruktsii, imeyushchikh priznaki biopovrezhdeniya [Problems of inspection of building structures with signs of bio-damage]. In: *Inzhenerno-stroitel'nyi zhurnal [Magazine of Civil Engineering]*, 2010, no 7, pp. 41–46. (In Russ., abstr. in Engl.)
13. Vlasov D.Yu., Ryabusheva Yu.I., Safronova E.V., Startsev S.A., Krylenkov V.A. Mikodestruktsiya stroitel'nykh i otdelochnykh materialov vnutri pomeshchenii [Myco-destruction of building and finishing materials indoors]. In: *Problemy medicinskoi mikologii [Problems in medical mycology]*, 2006, V. 8 (2), pp. 26–27. (In Russ., abstr. In Engl.)
14. Startsev S.A. Problemy biopovrezhdeniya pamyatnikov istorii i arkhitektury [Problems of bio-damage of historical and architectural monuments]. In: *Regional'nyj seminar «Sokhranenie kul'turnogo naslediya Rossii. Strategii. Tekhnologii. Podgotovka kadrov v oblasti okhrany kul'turnogo naslediya» [Regional seminar «Preservation of the cultural heritage of Russia. Strategies. Technologies. Training of personnel in the field of cultural heritage protection»]*. Saint-Petersburg, 2005, V. 1, p. 20. (In Russ.)
15. Krylenkov V.A., Startsev S.A. Biorazrushenie sredy obitaniya cheloveka v gorode – osnovnaya ugroza bezopasnosti ego zhiznedeyatel'nosti [The biodegradation of the human habitat in the city is the main threat to the safety of his life]. In: *Gidroizolyatsionnye materialy – XXI vek «AquaSTOP»: Sbornik dokladov. 1-oj Mezhdunarodnoi nauchno-tekhnikeskoi konferentsii [Waterproofing materials – XXI century «AquaSTOP»: Collection of reports 1st International Scientific and Technical Conference]*. Saint-Petersburg, 2001, p. 47. (In Russ.)