



УДК: 961.54:613.9

ОСОБЕННОСТИ БИОДЕГРАДАЦИИ ГИДРОТЕХНИЧЕСКИХ БЕТОНОВ

С.В. Федосов^{1,2}, В.Е. Румянцева³, С.А. Логинова³

Сергей Викторович Федосов^{1,2}
E-mail: FedosovSV@tgsu.ru

*Кафедра технологии вяжущих веществ и бетонов, НИУ Московский государственный строительный университет, Ярославское шоссе, 26, Москва, Российская Федерация, 129337;
Поволжский государственный технологический университет, пл. Ленина, 3, г. Йошкар-Ола, Республика Марий Эл, 424000*

Варвара Евгеньевна Румянцева³
E-mail: varryut@gmail.com

Кафедра естественных наук и техносферной безопасности, Ивановский государственный политехнический университет, пр. Шереметевский, 21, Иваново, Российская Федерация, 153000

Светлана Андреевна Логинова³
E-mail: sl79066171227@yandex.ru



Решение задач в области повышения стойкости бетонов к воздействию биологически агрессивных сред не теряют своей актуальности, поскольку видовое разнообразие биодеструкторов неуклонно растет. В целях разработки новых эффективных методов биозащиты бетона необходимо проведение комплексных исследований процессов коррозии в биологически агрессивных средах. В статье изложено современное представление о механизмах разрушения бетона в результате действия коррозионных процессов. Установлена зависимость степени биоповреждений от физико-механических свойств бетона, от степени агрессивности биодеструкторов, а также ряда сопутствующих этому взаимодействию факторов. В качестве объектов исследования использовались образцы цементного бетона, подверженные биообращению. Сформулированы основные положения, на основе которых целесообразно построение математической теории процессов биологической коррозии. Обосновано условие общности методологического подхода к моделированию процессов массопереноса при биокоррозии и жидкостной коррозии строительных материалов.

Ключевые слова: бетон, биокоррозия, биодеструкторы, микроорганизмы, математическое моделирование, массоперенос

Для цитирования:

Федосов С.В., Румянцева В.Е., Логинова С.А. Особенности биодеградации гидротехнических бетонов. Умные композиты в строительстве. 2020. Т. 1. Вып. 1. С. 45-55 URL: http://comincon.ru/index.php/tor/V1N1_2020

DOI: 10.52957/27821919_2020_1_45



UDC 961.54:613.9

BIODEGRADATION OF HYDROTECHNICAL CONCRETE

S.V. Fedosov^{1,2}, V.E. Rumyantseva³, S.A. Loginova³

Sergey Viktorovich Fedosov^{1,2}
E-mail: FedosovSV@mgsu.ru

Department of Binder and Concrete Technology, NRU Moscow State University of Civil Engineering, 26, Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russia;
Volga State Technological University, 3, pl. Lenina, Yoshkar-Ola, 424000, Russia

Varvara Evgenyevna Rumyantseva³
E-mail: varrym@gmail.com

Department of Natural Sciences and Technosphere Safety, Ivanovo State Polytechnic University, 21, Sheremetevsky Prosp., Ivanovo, 153000, Russia

Svetlana Andreevna Loginova³
E-mail: sl79066171227@yandex.ru



It is increasingly important to solve problems of increasing resistance of concrete to biologically aggressive media, since the species diversity of biodestructors is growing steadily. To develop new effective methods of concrete bioprotection, it is necessary to conduct complex research of corrosion processes in biologically aggressive media. The paper presents a modern view on mechanisms of concrete destruction as a result of corrosion. The study determined the dependence of biological damage on the physical and mechanical properties of concrete, on the aggressiveness of biodegraders, as well as a number of factors accompanying this interaction. Cement concrete samples subjected to biofouling were used as objects of study. The study includes the main provisions which can be used to formulate the mathematical theory of biological corrosion. Finally, the study substantiates the condition of generality of the methodological approach to the modeling of mass transfer processes at biocorrosion and liquid corrosion of building materials.

Key words: concrete, biocorrosion, biodestructors, microorganisms, mathematic simulation, mass transfer

For citation:

Fedosov S.V., Rumyantseva V.E., Loginova S.A. Biodegradation of hydrotechnical concrete. *Smart Composite in Construction*. 2020. V. 1. N 1. P. 45-55 URL: http://comincon.ru/index.php/tor/V1N1_2020

DOI: 10.52957/27821919_2020_1_45



Биоповреждение строительных материалов несет серьезную угрозу как для самих конструкций зданий и сооружений, так и для человеческой жизни [1]. Подтверждением является трагическое событие, произошедшее 10 июня 1999 г. в Санкт-Петербурге [2], – обрушение козырька вестибюля станции метро «Сенная площадь». Трагедия унесла жизни 7 чел. Независимой экспертной комиссией одной из причин обрушения было признано биологическое повреждение бетона [2]. Под влиянием внешних факторов на козырьке вестибюля появились коррозионные трещины, раскрытие которых ускорилось в результате воздействия на бетон кислот, солей и щелочей органического происхождения.

В то же время, согласно статистическим данным, экономический ущерб от биоповреждений различных сооружений по всему миру достигает десятков млрд. дол. в год [3]. Наиболее часто биоповреждения проявляются в виде высолов, отслоения, разрушения защитных слоев бетонных конструкций и т.д. [4]. Необходимость поиска все более эффективных методов борьбы с биоповреждениями очевидна.

Сложность исследования состояния эксплуатируемых строительных конструкций, подверженных биоповреждениям, состоит в том, что невозможно однозначно утверждать, что имеющиеся изменения являются результатом только непосредственного воздействия микроорганизмов. Коррозионные изменения чаще всего являются следствием воздействия не только микроорганизмов, но и воздействию совокупности сопутствующих факторов: температуры, света, механических нагрузок и т.п.

При биологической коррозии на границах бетонной конструкции возникают условия, отличающиеся от условий, вызывающих коррозию I, II и III видов. Кроме того, исходная система определяющих уравнений должна быть совместимой с уравнениями моделей сопутствующих процессов (непрерывное зарождение, рост, гибель микроорганизмов).

Основными биодеструкторами являются бактерии и грибы. Бактерии представляют собой одноклеточные колониальные микроорганизмы, которым свойственны разные виды обмена веществ. Грибы представлены одноклеточными или многоклеточными гетеротрофными микроорганизмами. Наиболее часто одноклеточные грибы развиваются в среде, обогащенной органическим углеродом [5]. Продуктами метаболизма многоклеточных грибов являются соединения химически агрессивные по отношению к строительным материалам, в особенности к бетону (например, широкий спектр органических кислот и т.д.) [5]. Нередко бактерии и грибы образуют биопленки на поверхности строительных материалов, которые локально генерируют высокие концентрации агрессивных метаболитов. В то же время биопленки обычно замедляют процессы взаимодействия цементного камня с основными агрессивными компонентами окружающей среды, причем их кольматирующая способность напрямую зависит от структурной пористости материала.

Подвижность и большое разнообразие ферментных систем позволяют микромицетам использовать в качестве источников питания материалы различного происхождения, в том числе и бетон. Исследования в области микробного воздействия на бетон [6, 7] показали, что к грибам, наиболее часто участвующим в биоразрушении бетона, относятся грибы родов: *Penicillium* (*P. ochrochloron*, *P.*

purpurogenum, *P. funiculosum*, *P. citrinum*) и *Aspergillus* (*A. niger*, *A. fumigatus*, *A. terreus*, *A. flavus*), *Trichoderma* (*T. viride*, *T. sp.*) (рис. 1).

Грибы рода *Penicillium* выделяют, главным образом, лимонную и глюконовую кислоты, *Aspergillus* – лимонную, глюконовую и щавелевую. Нередко один и тот же вид гриба способен синтезировать разнообразные родственные кислоты. Род *Aspergillus* [6] представлен одноклеточными, неразветвленными конидиеносцами, верхушки которых вздуты и несут на своей поверхности цепочки конидий, имеющих округлую форму и различную окраску (зеленую, желтую, коричневую). Род *Penicillium* [8] – конидиеносцы многоклеточные, ветвящиеся; на концах разветвлений конидиеносца располагаются стеригмы с цепочками конидий, которые бывают зеленой, голубой, серо-зеленой окраски или бесцветные. Верхняя часть конидиеносца имеет вид кисточки разной степени сложности.

Установлено, что микотоксины, продуцируемые грибами рода *Aspergillus* и *Penicillium*, обладают повышенной канцерогенной активностью [9]. Результатом роста грибов на поверхности бетона является снижение его физико-механических и эксплуатационных характеристик, а также ухудшение его внешнего вида. Крайним проявлением биоповреждающего действия в отношении бетонных элементов является их частичное или полное обрушение. Прямая биомеханическая деградация происходит путем проникновения грибных гифов в тело бетона. Грибные гифы могут воздействовать со значительной механической силой, которая возникает в результате тургорного давления в гифе [10].

Максимальное продуцирование кислот культурами грибов происходит при высоких температурах и низких значениях pH. Изменения в pH внутренней и внешней среды оказывают заметное влияние на рост микроорганизмов, изменяя активность и синтез белков, связанный с различными клеточными процессами. Установлено, что степень агрессивного биологического воздействия среды на бетон будет максимальной при значении pH = 7,2-7,6 [10].

Исследования цементного камня на биостойкость проводились над образцами -кубами с гранью 3 см, изготовленных из портландцемента марки ПЦ 500-Д0 с водоцементным отношением В/Ц = 0,3 [11]. Далее проводилось заражение образцов цементного камня микромицетами *Aspergillus* (рис. 2). Согласно СП 1.3.2322-08 все штаммы родов *Aspergillus* формально отнесены к патогенам IV группы. Средой для переноса штамма служили: мальт экстракт – 30 г/л, пептон - 1 г/л, агар – 20 г/л, вода (дистил.) – 1 л. На 28-е сутки проведения эксперимента был отчетливо виден хорошо развитый черновато-коричневого цвета мицелий гриба рода *Aspergillus niger*. Культивирование микроорганизмов проводилось на агаризованных питательных средах в чашках Петри. Некоторые ученые склонны выделять биокоррозию как самостоятельный, особый вид коррозии [12]. В водных средах адгезия микроорганизмов, выделение метаболитов и образование биопленок на поверхности бетона меняют химические условия на границе раздела «бетона – жидкость», вызывающие или ускоряющие общий коррозионный процесс в бетоне. Биопленка, возникающая после адсорбции органических и неорганических молекул на поверхности материала, изменяет существующую кинетику реакций [14]. В биопленках микробные



популяции проявляют функциональную взаимозависимость и коллективно способствуют биодеструкции бетона.

должны быть положены точные экспериментально подтвержденные представления о физической картине процессов при биологической коррозии цементных бетонов в

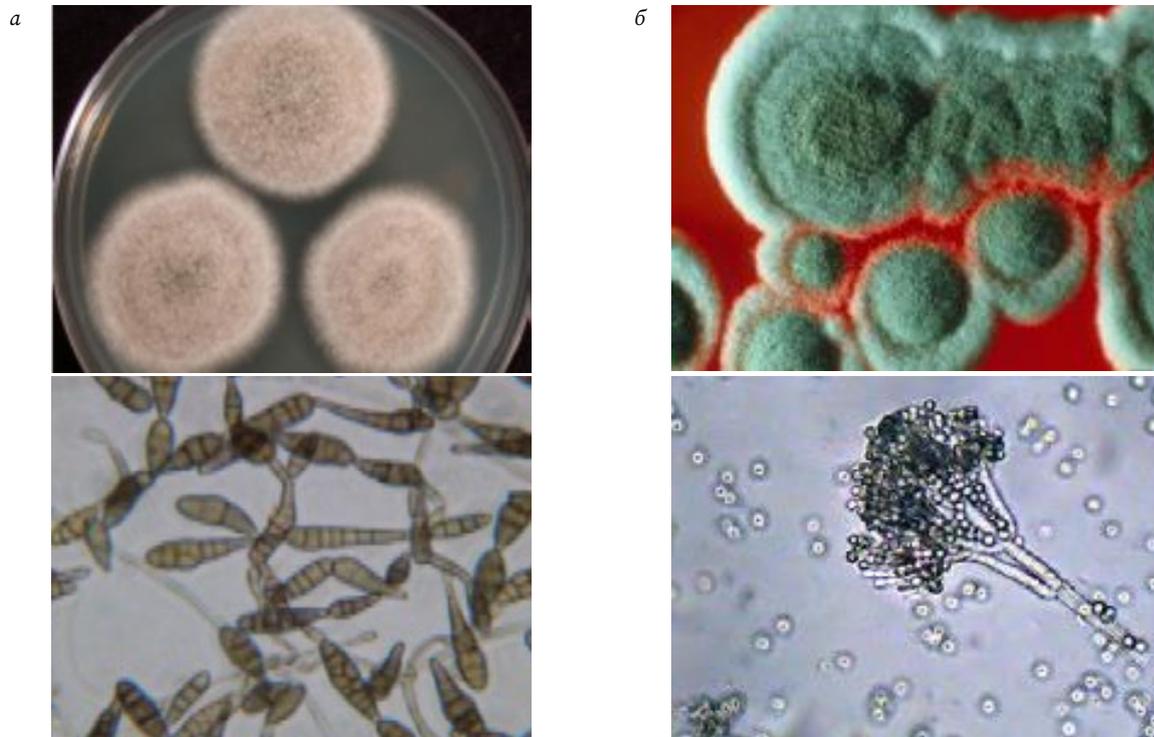


Рис. 1. Колонии грибов: а - под *Aspergillus*; б - под *Penicillium*
Fig. 1. Colonies of fungi: a – genus *Aspergillus*; b – the genus *Penicillium*

Даже изначально грибостойкий бетон под воздействием совокупности абиотических и биотических факторов среды начинает разрушаться и использоваться в качестве источника энергии определёнными видами микроорганизмов, располагающими подходящим комплексом метаболитов.

Поскольку старение бетона является кумулятивным процессом, то повторяющиеся изменения внешних факторов (например, повышение или понижение температуры среды), часто отражается в скачкообразном протекании процесса разрушения. В это же время, когда температура среды обитания становится неблагоприятной для развития микроорганизмов (ниже $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$) [10], скорость биологического разрушения бетона значительно падает. Стоит отметить тот факт, что ряд микроорганизмов может длительное время сохранять жизнеспособность в анабиотическом состоянии в условиях отрицательных температур [10]. При установлении оптимальной температуры ($>0\text{ }^{\circ}\text{C}$) происходит быстрый переход микроорганизмов в активную фазу [10].

Установлено, что процесс проникновения биологической среды в структуру бетона изменяет его физико-химические показатели. В основу математического моделирования

агрессивных средах. Создание прогностической математической модели биоразрушения бетона затруднительно из-за взаимного влияния микроорганизмов, входящих в биоценозы.

Анализ литературных источников [14-20] показал, что на сегодняшний день накоплен большой объем научных данных о коррозионных процессах в бетоне в материаловедении строительных материалов: установлены и исследованы основные схемы химических реакций; дано математическое описание некоторых процессов коррозии; создана система нормативных документов по антикоррозионной защите. Однако биологическое разрушение бетона остается малоизученной проблемой как в России, так и за рубежом [14-20].

Биообрастание опор мостов и нефтедобывающих платформ, пирсов, а также других гидротехнических сооружений приводит к увеличению волновых нагрузок, к ускорению коррозионных процессов и т.д.

Образование биопленок на вертикальных поверхностях, как правило, происходит в областях малых давлений жидкости, т.е. в местах срыва потока. Критерием существования того или иного режима движения жидко

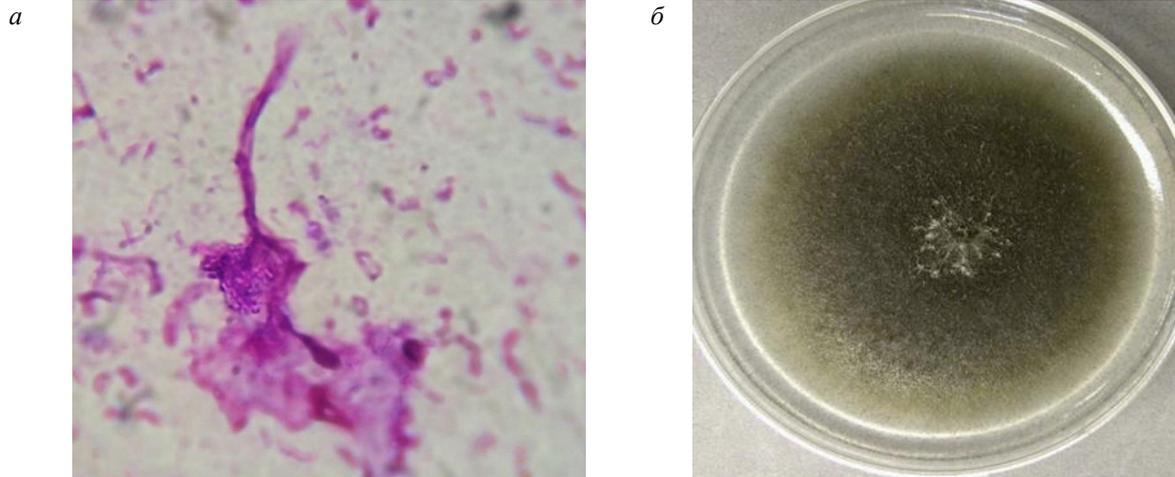


Рис. 2:

а – окраска по Граму; б – внешний вид колоний *Aspergillus niger* на седьмые сутки культивирования

Fig. 2:

a – Gram stain; b – the appearance of *Aspergillus niger* colonies on the 7th day of cultivation

сти является число Рейнольдса (Re), представляющее собой отношение сил инерции к силам трения, возникающим в движущейся жидкости:

$$Re = \frac{\rho \cdot d \cdot v}{\mu} = \frac{d \cdot v}{\nu}, \quad (1)$$

где v – средняя скорость движения жидкости, м/с; d – величина, характеризующая линейные размеры тела, обтекаемого жидкостью, м; μ – динамический коэффициент вязкости жидкости, Па·с; ρ – плотность жидкости, кг/м³, ν – коэффициент кинематической вязкости воды, м²/с.

При средней скорости течения рек $\approx 1,8-2$ км/час расчетное значение числа Рейнольдса составляет $1,9-2 \cdot 10^5$ [21]. Для горных рек, скорость течения которых может достигать 6-10 м/с, расчетные значения числа Рейнольдса обычно находятся в диапазоне $4,3-5,8 \cdot 10^5$ [21].

Вблизи обтекаемой поверхности скорость течения намного меньше, чем в основной части потока, а в месте контакта поверхности и жидкости равна нулю. Согласно теории пограничного слоя на обтекаемых поверхностях существует две зоны: зона натекания и зона установившегося размера турбулентного пограничного слоя [21]. В случае обтекания шероховатой поверхности, подверженной биообрастанию, турбулентность в пограничном слое возникает значительно раньше, чем при обтекании гладких поверхностей. Толщина пограничного слоя не может обладать четко выраженной границей в связи с природной неравномерностью биообрастания поверхности [21].

$$\rho \frac{dW}{dt} = R - \text{grad}p + \mu \Delta W + \frac{1}{3} \mu \text{grad}(\text{div}W), \quad (2)$$

Схема обтекания одиночной опоры моста потоком жидкости при малых числах Рейнольдса представлена на рис. 3.

Решения уравнений Навье-Стокса обладают большим значением в гидродинамике. При течении жидкости с малыми числами Рейнольдса нелинейность уравнений не проявляется.

В векторной форме уравнения Навье-Стокса сводятся к уравнению вида [22]:

$$\frac{\partial C(\vec{r}, \tau)}{\partial \tau} + \vec{w} \cdot \text{grad}[C(\vec{r}, \tau)] = \quad (3)$$

$$= \text{div}\{D(\vec{r}, \tau) \cdot \text{grad}[C(\vec{r}, \tau)]\}; \quad (4)$$

$$\vec{r} = \{x, y, z\}; \quad (4)$$

$$\vec{w} = 0; \quad (5)$$

где R – вектор напряжения объемной силы.

Дифференциальное уравнение конвективной диффузии имеет вид [23]:

Тогда при низкой скорости движения жидкости:

$$\frac{\partial C(x, y, z, \tau)}{\partial \tau} = D \cdot \text{div}\{\text{grad}[C(x, y, z, \tau)]\}. \quad (6)$$

При биообрастании рост и генерация биомассы представлены непрерывными во времени процессами, поэтому биопленка имеет разную толщину по всей площади поверхности конструкции. Скорость накопления биомассы в первую очередь определяется скоростью тока воды, от которой зависит возможность оседания и удержания организмов на субстрате, снабжения их питательными веществами и кислородом и др. Непрерывные процессы роста, размножения и гибели популяций микроорганизмов затрудняет решение поставленных задач.

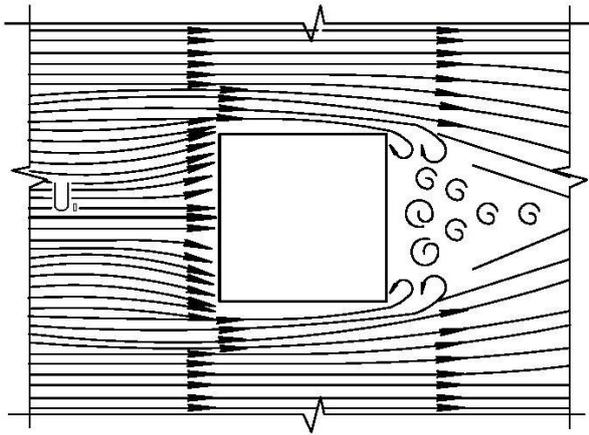


Рис. 3. Схема обтекания опоры моста потоком жидкости при малых числах Рейнольдса

Fig. 3. Scheme of the flow around the bridge support fluid flow at low Reynolds numbers

В [23] авторами предложена физико-математическая модель диффузионных процессов в системе «цементный бетон – биоупленка – жидкость», учитывающая кинетику процессов роста, размножения и гибели микроорганизмов.

Физико-математическая модель массопереноса в неограниченной двухслойной пластине может быть представлена в виде системы дифференциальных уравнений параболического типа в частных производных с граничными условиями второго рода на границе бетона с жидкостью и четвертого рода на границе между бетоном и биоупленкой [23]:

$$\frac{\partial C_1(x, \tau)}{\partial \tau} = k_1 \cdot \frac{\partial^2 C_1(x, \tau)}{\partial x^2}, \quad \tau > 0, \quad -\delta_1 \leq x \leq 0, \quad (7)$$

$$\frac{\partial C_2(x, \tau)}{\partial \tau} = k_2 \cdot \frac{\partial^2 C_2(x, \tau)}{\partial x^2}, \quad \tau > 0, \quad 0 \leq x \leq \delta_2, \quad (8)$$

где $C_1(x, \tau)$ – концентрация «свободного» гидроксида кальция в перерасчете на СаО в бетоне в момент времени τ в произвольной точке с координатой x , (кг СаО/кг бетона); $C_2(x, \tau)$ – концентрация «свободного» гидроксида кальция в перерасчете на СаО в биоупленке в момент времени τ в произвольной точке с координатой x , (кг СаО/кг биомассы); $k_{1,2}$ – коэффициенты массопроводности, м²/с; δ_1 – толщина бетонной конструкции, м; δ_2 – толщина биоупленки, м.

Начальные условия:

$$C_1(x, \tau)|_{\tau=0} = C_1(x, 0) = C_{1,0}, \quad (9)$$

$$C_2(x, \tau)|_{\tau=0} = C_2(x, 0) = C_{2,0}, \quad (10)$$

где $C_{1,0}$ – начальная концентрация «свободного» СаО, кг СаО/кг бетона;

$C_{2,0}$ – начальная концентрация «свободного» СаО, кг СаО/кг биомассы.

Граничные условия:

$$\left. \frac{\partial C_1(x, \tau)}{\partial x} \right|_{x=-\delta_1} = 0. \quad (11)$$

В месте контакта бетона и биоупленки. Равновесие в системе подчиняется закону Генри:

$$C_1(x, \tau)|_{x=0} = m \cdot C_2(x, \tau)|_{x=0}, \quad (12)$$

где m – константа равновесия Генри, кг биоупленки/кг бетона.

$$-\rho_{бет} \cdot k_1 \cdot \left. \frac{\partial C_1(x, \tau)}{\partial x} \right|_{x=0} = -\rho_{биом} \cdot k_2 \cdot \left. \frac{\partial C_2(x, \tau)}{\partial x} \right|_{x=0}, \quad (13)$$

где $\rho_{бет}$, $\rho_{биом}$ – плотности бетона и биомассы, кг/м³.

$$-k_2 \cdot \left. \frac{\partial C_2(x, \tau)}{\partial x} \right|_{x=\frac{\delta_2}{\delta_1}} = q_n(\tau). \quad (14)$$

где $q_n(\tau)$ – плотность потока массы, уходящей от биоупленки в поток жидкости.

Общее решение системы (7) – (14) имеет вид:

$$Z_1(\bar{x}, Fo_m) = \frac{1}{1 + NK_k K_\delta} \left\{ 1 - NK_\delta + NK_i^* \left[Fo_m + \frac{(1-\bar{x})^2}{2} + \varphi(K_k, N, K_\delta) \right] \right\} + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{\mu_n^2 \nu_n^2} (\mu_n \sin \mu_n \cos(\mu_n \bar{x}) \cos(\mu_n \sqrt{K_k} K_\delta) - \sqrt{K_k} K_\delta \sin(\mu_n \bar{x}) \sin(\mu_n \sqrt{K_k} K_\delta)) - \frac{N}{\sqrt{K_k}} \cos(\mu_n (1 + \bar{x})) \exp(-\mu_n^2 Fo_m). \quad (15)$$

$$Z_2(\bar{x}, Fo_m) = \frac{1}{1 + NK_k K_\delta} (1 - NK_\delta + Ki_H^* [\bar{x} - Fo_m K_k K_\delta] + NK_i^* (\varphi(K_k, N, K_\delta) - \frac{1 + K_k \bar{x}^2}{2} - 2 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{J}{\mu_n^2 \nu_n^2} (\mu_n \sin \mu_n \cos(\mu_n \sqrt{K_k} (K_\delta - \bar{x})) - \frac{\mu_n}{\sqrt{K_k}} \sin(\mu_n \sqrt{K_k} K_\delta) \cos(\mu_n \sqrt{K_k} \bar{x}) + \frac{1}{\sqrt{K_k}} \sin \mu_n \sin(\mu_n \sqrt{K_k} \bar{x})) + Ki_H^* [N \cos \mu_n \cos(\mu_n \sqrt{K_k} \bar{x}) + \frac{1}{\sqrt{K_k}} \sin \mu_n \sin(\mu_n \sqrt{K_k} \bar{x})] \exp(-\mu_n^2 K_k Fo_m). \quad (16)$$

$$\varphi(K_k, N, K_\delta) = \frac{1 + K_k K_\delta (3K_\delta + 3N + NK_k K_\delta^2)}{6(1 + NK_k K_\delta)}, \quad J = \int_0^1 Z_{1,0}(\xi) \cos(\mu_n (1 - \xi)) d\xi, \quad (17)$$

$$tg \mu_m = N \sqrt{K_k} tg(\mu_m \sqrt{K_k} K_\delta).$$

Здесь $Z_1(\bar{x}, Fo_m)$ – безразмерная концентрация переносимого компонента по толщине бетона; $Z_2(\bar{x}, Fo_m)$ – безразмерная концентрация переносимого компонента по толщине биоупленки; $\bar{x} = x/\delta_1$ – безразмерная координата; коэффициент $K_k = k_2/k_1$; коэффициент $K_\delta = \delta_2/\delta_1$; q_n – плотность потока массы, уходящей от биоупленки в поток жидкости; $N = (\rho_{биом} \cdot k_2)/(\rho_{бет} \cdot k_1 \cdot m)$ – коэффициент, учитывающий характеристики фаз; $Fo_m = (k_1 \cdot \tau)/\delta_1^2$ – критерий Фурье; $Ki_H^* = q_n \cdot R/k_2 \cdot C$ – массообменный критерий Кирпичева.

Сложный механизм роста, размножения и гибели микроорганизмов удается учесть введением коэффициента N , учитывающего изменения плотности биомассы.

Согласно В.Т. Ерофееву [4, 12, 19], уравнение, учитывающее рост, размножение и гибель микроорганизмов с учетом естественной смертности, стохастический характер этих процессов, может быть представлено в виде:

$$X = \bar{X}(\mu_X - A_X). \quad (18)$$

где \bar{X} – предельная критическая биомасса; μ_X – удельная скорость роста биомассы; A_X – удельная скорость отмирания клеток.

Полученные выражения (15) – (17) позволяют определять значения концентраций «свободного» гидроксида кальция по толщине бетонной конструкции и биоупленки в любой момент, а также дают возможность расчета кинетики процесса в жидкой фазе, что, в конечном итоге, позволяет с минимальной погрешностью прогнозировать долговеч-



ность бетонных конструкций, эксплуатируемых в биологически агрессивных средах. Некоторые результаты расчетов по полученным выражениям (15) – (17) приведены на рис. 4, 5.

Полученные представления о гидродинамических процессах, имеющих место при биообрастании бетонных конструкций на границе раздела фаз, позволяют исследовать процессы массопереноса в неподвижном потоке воды, а также в перспективе рассчитать коэффициенты массопереноса для различных скоростей потока.

Понимание причин и механизмов биоповреждения строительных конструкций позволит дать разумные рекомендации по ликвидации последствий биопоражения и по предупреждению этого негативного явления в будущем. Мониторинг технического состояния конструкций, прогнозирование их долговечности и надежности возможны только на основе соответствующих методов расчета, позволяющих выполнять соответствующие количественные оценки с надлежащей точностью.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Videla H.A.** Manual of Biocorrosion. CRC Press: Boca Raton, FL. 1996. P. 272.
2. **Крыленков В.А., Антонов В.Б., Иванов С.Ю., Крогиус М.Э., Малышев В.В., Старцев С.А., Челибанов В.П.** Основные итоги биологической экспертизы при расследовании причин обрушения козырька наземного вестибюля станции Петербургского метрополитена «Сенная площадь». Сб. мат. Всеросс. науч.-практ. конф.: Экологические проблемы биодеградации промышленных, строительных материалов и отходов производств. Пенза: 2000. С.57.
3. **Огарков Б.Н., Огаркова Г.Р., Самусенок Л.В.** Проблема микробной биодеструкции строительных материалов, зданий и сооружений. Изв. Иркутского гос. ун-та. 2013. № 3. С. 113-115.
4. **Ерофеев В.Т., Богатов А.Д., Богатова С.Н., Смирнов В.Ф., Захарова Е.А.** Исследование биостойкости строительных материалов с учетом их старения. Вестник Волгоградского гос. арх.-строит. ун-та. 2011. № 22 (41). С. 73-78.
5. **Сухаревич В.И., Кузикова И.Л., Медведева Н.Г.** Защита от биоповреждений, вызываемых грибами. Санкт-Петербург: ЭЛБИ-СПБ. 2009. 207 с.
6. **Смирнов В.Ф., Семичева А.С., Смирнова О.Н., Захарова Е.А.** Агрессивные метаболиты грибов и их роль в процессе деградации материалов различного химического состава. Сб. матер.конф.: Пробл. экологического материаловедения. Пенза, 1995. С. 82-86.
7. **Кноп М.** Все о грибах. М.: БММ АО. 2000. 256 с.
8. **Михайлова Р.В., Сапунова Л.И., Колесникова С.С.** Зависимость ферментативной активности грибов рода *Penicillium* от источника питания. Контроль и управление биотехнол. процессами. Горький, 1985. С. 68.
9. **Антонов В.Б.** Антропогенно-очаговые болезни жителей большого города. Журн. инфектологии. 2009. Т. 1. № 2/3. С. 7-12.
10. **Кондратьев Т.А., Коваль Э.З., Рой А.А.** Поражение микромицетами различных конструкционных материалов. Микробиол. журн. 1986. Т. 48. № 5. С. 57-60.
11. **Fedosov S.V., Roumyantseva V.E., Kopovalova V.S., Logipova S.A.** Mathematical modeling of diffusion processes of mass transfer of «free calcium hydroxide» during corrosion of cement concretes. Int. J. Comp. Civ. Struct. Eng. 2018. V. 14. N 3. P. 161-168.
12. **Ерофеев В.Т., Федорцов А.П., Богатов А.Д., Федорцов В.А.** Основы математического моделирования биокоррозии полимербетонов. Фунд. исследования. 2014. № 12-4. С. 701-707.
13. **Levandovskiy A.N., Melnikov B.E., Shamkin A.A.** Modeling of porous material fracture. Mag. Civ. Eng. 2017. 69(1). P. 3-22. DOI:10.18720/MCE.69.1.
14. **Travush V.I., Karpenko N.I., Erofeev V.T., Rodin A.I.,**

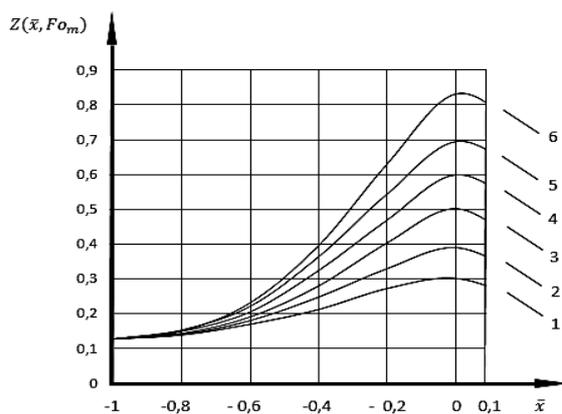


Рис. 4. Профили безразмерных концентраций по толщине бетона и биопленки при $K_k = 1; K_\delta = 0,1; N = 1; Fo_m = 1$, Ki_H^* : 1 - 0,5; 2 - 1; 3 - 1,5; 4 - 2; 5 - 2,5; 6 - 3.

Fig. 4. Profiles of dimensionless concentrations over the thickness of concrete and biofilm at $K_k = 1; K_\delta = 0,1; N = 1; Fo_m = 1$, Ki_H^* : 1 - 0,5; 2 - 1; 3 - 1,5; 4 - 2; 5 - 2,5; 6 - 3.

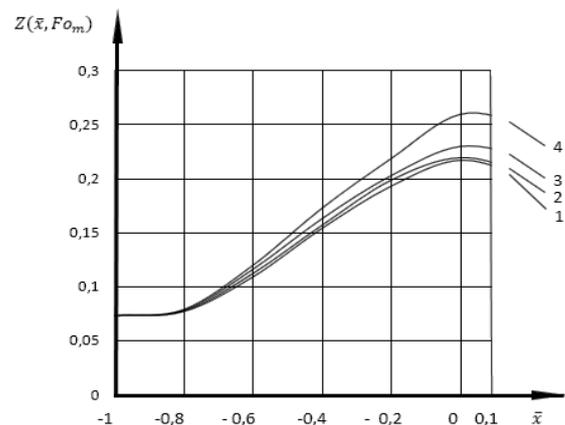


Рис. 5. Профили безразмерных концентраций по толщине бетона и биопленки при $K_k = 1; K_\delta = 0,1; Fo_m = 1, Ki_H^* = 0,5; N$: 1 - 0,01; 2 - 0,05; 3 - 0,1; 4 - 0,5.

Fig. 5. Profiles of dimensionless concentrations over the thickness of concrete and biofilm at $K_k = 1; K_\delta = 0,1; Fo_m = 1, Ki_H^* = 0,5; N$: 1 - 0,01; 2 - 0,05; 3 - 0,1; 4 - 0,5.



- Smirnov V.F., Rodina N.G.** Development of Biocidal Cements for Buildings and Structures with Biologically Active Environments. *Power Technol. and Eng.* 2017. 4(51). P. 377-384. DOI:10.1007/s10749-017-0842-8.
15. **Newale R., Sartape Y., Ramane A., Telrandhe S., Vairal S., Girish J.** Structural Audit, Repair and Rehabilitation of Building. *Int. J. Innov. Res. Sci.* 2017. 6(3). P. 4679-4693. DOI:10.15680/IJIRSET.2017.0603255.
16. **Selyaev V.P., Neverov V.A., Selyaev P. V., Sorokin E.V., Yudina O.A.** Predicting the durability of concrete structures, including sulfate corrosion of concrete. *Mag. Civ. Eng.* 2014. 1(45). P. 41-52. DOI:10.5862/MCE.45.5.
17. **Pepe O., Sannino L., Palomba S., Anastasio M., Blaiotta G., Villani F., Moschetti G.** Heterotrophic microorganisms in deteriorated medieval wall paintings in southern Italian churches. *Microbiol. Res.* 2010. 165 (1). P. 21-32.
18. **Han F., Zhang Z.** Hydration, mechanical properties and durability of high-strength concrete under different curing conditions. *J. Therm. Anal. and Calor.* 2018. 132. P. 823-834. DOI:10.1007/s10973-018-7007-3.
19. **Erofeev V., Rodin A., Rodina N., Kalashnikov V., Irina E.** Biocidal Binders for the Concretes of Unerground Constructions. *Procedia Eng.* 2016. 165. P. 1448-1454. DOI: 10.1016/j.proeng.2016.11.878
20. **Шлихтинг Г.Т.** Теория пограничного слоя. М.: Наука. 1974. 714 с.
21. **Лаврентьев М.А., Шабат Б.В.** Проблемы гидродинамики и их математические модели. М.: Наука. 1977. 408 с.
22. **Рудобахта С.П., Карташов Э.М.** Диффузия в химико-технологических процессах. М.: КолосС. 2010. 478 с.
23. **Fedosov S.V., Loginova S.A.** Mathematical model of concrete biological corrosion. *Mag. Civ. Eng.* 2020. N 7. P. 130-138
5. **Sukharevich V.I., Kuzikova I.L., Medvedeva N.G.** Protection against bio-damage caused by fungi. *St. Petersburg: ELBI-SPB.* 2009. 207 p. (in Russian).
6. **Smirnov V.F., Semicheva A.S., Smirnova O.N., Zakharova E.A.** Aggressive metabolites of fungi and their role in the degradation of materials of different chemical composition. *Sat. mater. Conf. : Probl. of Env. Mat. Sci. Penza, 1995. S. 82-86* (in Russian).
7. **Knop M.** All about mushrooms. Moscow: BMM AO. 2000. 256 p. (in Russian).
8. **Mikhailova R.V., Sapunova L.I., Kolesnikova S.S.** Dependence of the enzymatic activity of fungi of the genus *Penicillium* on the food source. *Control and manag. of biotechnol. proc. Gorky.* 1985. P. 68. (in Russian).
9. **Antonov V.B.** Anthropogenic focal diseases of residents of a large city. *J. of Infectology.* 2009. V. 1. N. 2/3. S. 7-12 (in Russian).
10. **Kondratyuk T.A., Koval E.Z., Roy A.A.** The defeat of various structural materials by micromycetes. *Microbiol. J.* 1986, V. 48. N 5. S. 57-60 (in Russian).
11. **Fedosov S.V., Roumyantseva V.E., Konovalova V.S., Loginova S.A.** Mathematical modeling of diffusion processes of mass transfer of "free calcium hydroxide" during corrosion of cement concretes. *Int. J. for Comput. Civ. and Struct. Eng.* 2018. V. 14. N 3. P. 161-168.
12. **Erofeev V.T., Fedortsov A.P., Bogatov A.D., Fedortsov V.A.** Fundamentals of mathematical modeling of polymer concrete biocorrosion. *Basic res.* 2014. N 12-4. P. 701-707 (in Russian).
13. **Levandovskiy A.N., Melnikov B.E., Shamkin A.A.** Modeling of porous material fracture. *Mag. of Civ. Eng.* 2017. 69 (1). P. 3-22. DOI:10.18720/MCE.69.1.
14. **Travush V.I., Karpenko N.I., Erofeev V.T., Rodin A.I., Smirnov V.F., Rodina N.G.** Development of Biocidal Cements for Buildings and Structures with Biologically Active Environments. *Power Techn. and Eng.* 2017. 4(51). P. 377-384. DOI:10.1007/s10749-017-0842-8.

Поступила в редакцию 25.09.2020

Принята к опубликованию 26.10.2020

REFERENCES

1. **Videla H.A.** Manual of Biocorrosion. CRC Press: Boca Raton, FL. 1996, P. 272.
2. **Krylenkov V.A., Antonov V.B., Ivanov S.Yu., Krogus M.E., Malyshev V.V., Startsev S.A., Chelibanov V.P.** The main results of the biological examination in the investigation of the causes of the collapse of the canopy of the ground entrance hall of the St. Petersburg metro station "Sennaya Ploshad". *Sat. mater. III All-Russian. Sci. - pract. Conf. : Env. probl. of biodegrad. of industr., building mat. and industr. waste. Penza: 2000. P. 57* (in Russian).
3. **Ogarkov B.N., Ogarkova G.R., Samusenok L.V.** The problem of microbial biodegradation of building materials, buildings and structures. *Irkutsk State Univer. Bul.* 2013. N 3. S. 113-115 (in Russian).
4. **Erofeev V.T., Bogatov A.D., Bogatova S.N., Smirnov V.F., Zakharova E.A.** Investigation of the biostability of building materials taking into account their aging. *Bul. of the Volgograd State Univer. of Arch. and Civ. Eng.* 2011. N 22 (41). S. 73-78 (in Russian).
15. **Newale R., Sartape Y., Ramane A., Telrandhe S., Vairal S., Girish J.** Structural Audit, Repair and Rehabilitation of Building. *Int. J. Innov. Res. Sci.* 2017. 6(3). P. 4679-4693. DOI:10.15680/IJIRSET.2017.0603255.
16. **Selyaev V.P., Neverov V.A., Selyaev P. V., Sorokin E.V., Yudina O.A.** Predicting the durability of concrete structures, including sulfate corrosion of concrete. *Mag. Civ. Eng.* 2014. 1(45). P. 41-52. DOI:10.5862/MCE.45.5.
17. **Pepe O., Sannino L., Palomba S., Anastasio M., Blaiotta G., Villani F., Moschetti G.** Heterotrophic microorganisms in deteriorated medieval wall paintings in southern Italian churches. *Microbiol. Res.* 2010. 165 (1). P. 21-32.
18. **Han F., Zhang Z.** Hydration, mechanical properties and durability of high-strength concrete under different curing conditions. *J. Therm. Anal. And Calor.* 2018. 132. P. 823-834. DOI:10.1007/s10973-018-7007-3.
19. **Erofeev V., Rodin A., Rodina N., Kalashnikov V., Irina E.** Biocidal Binders for the Concretes of Unerground Constructions. *Procedia Eng.* 2016. 165. P. 1448-1454. DOI: 10.1016/j.proeng.2016.11.878
20. **Schlichting G.** Theory of the boundary layer. М.: Наука. 1974. 714 p. (in Russian).



21. **Lavrent'ev M.A., Shabat B.V.** *Problems of hydrodynamics and their mathematical models.* M.: Nauka. 1977. 408 p. (in Russian).
22. **Rudobashta S.P., Kartashov E.M.** *Diffusion in chemical engineering processes.* M.: KolosS. 2010. 478 p. (in Russian).
23. **Fedosov S.V., Loginova S.A.** *Mathematical model of concrete biological corrosion.* *Mag. Civ. Eng.* 2020. N 7. P. 130-138.

Received 15.09.2020

Accepted 16.10.2020