

УДК 620.197.4

[https://doi.org/10.37538/2224-9494-2022-1\(32\)-115-127](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2022-1(32)-115-127)

К ВОПРОСУ О ПОВЫШЕНИИ БИОСТОЙКОСТИ БЕТОННЫХ И ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ МОСТОВЫХ ОПОР

С.А. ЛОГИНОВА^{1✉}, канд. техн. наук
И.Н. ГОГЛЕВ²

¹ФГБОУ ВО «Ярославский государственный технический университет», Московский пр., д. 88, Ярославль, 150023, Российская Федерация

²ФГБОУ ВО «Ивановский государственный политехнический университет», Шереметевский пр., д. 21, Иваново, 150300, Российская Федерация

Аннотация

Введение. В статье рассматриваются аспекты влияния биологической коррозии бетона на долговечность бетонных и железобетонных конструкций транспортных сооружений. Рассмотрены примеры реальных объектов, на которых выявлены участки совместного влияния биокоррозии и других видов коррозии бетона.

Цель. Изучение процессов формирования биообрастания на мостовых опорах и механизмов образования биомассы на поверхности бетона в зависимости от режима движения жидкости в речном потоке.

Материалы и методы. Рассмотрена зависимость числа Рейнольдса от температуры и коэффициента кинематической вязкости воды в реке. Разработана и рассчитана физико-математическая модель процесса массопереноса при биокоррозии, происходящего в условиях обтекания двурядной системы опоры моста потоком жидкости при малых числах Рейнольдса.

Результаты. Благодаря разработанной физико-математической модели можно рассчитывать срок службы железобетонных опор мостовых сооружений и определять «остаточную» долговечность, а также предложить сроки очистки поверхности бетона от биоотложений.

Выводы. Таким образом, по результатам проведенных исследований выявлена зависимость влияния биокоррозии бетона от процесса биообрастания поверхности бетонных/железобетонных опор. Также в статье произведен расчет экономической эффективности от проведения мероприятий по очистке бетона от биообрастания, по результатам которого годовой экономический эффект составил 9 % от стоимости сметных работ. В случае если планомерно-предупредительные мероприятия по очистке от биообрастания проводятся не менее чем 1 раз в 5 лет, срок проведения межремонтных работ по устранению дефектов бетонных и железобетонных строительных конструкций можно увеличить в 1,5 раза. Благодаря проведенному расчету даны рекомендации по повышению долговечности и сроку эффективной эксплуатации мостовых конструкций.

Ключевые слова: мост, опора, бетон, железобетон, коррозия, массоперенос, математическая модель, диффузия

Для цитирования: Логинова С.А., Гоглев И.Н. К вопросу о повышении биостойкости бетонных и железобетонных мостовых опор // Вестник НИЦ «Строительство». 2022. Т. 32. № 1. С. 115–127. doi: [https://doi.org/10.37538/2224-9494-2022-1\(32\)-115-127](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2022-1(32)-115-127)

Вклад авторов

Логинова С.А. – получение данных для анализа; математическое моделирование; формулировка выводов; интерпретация результатов; написание текста рукописи.

Гоглев И.Н. – обзор публикаций по теме статьи; анализ и систематизация экспериментальных данных; оформление рукописи; работа с графическим материалом; редактирование и переработка рукописи.

Финансирование

Исследование не имело спонсорской поддержки.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

IMPROVING THE BIOSTABILITY OF CONCRETE AND REINFORCED CONCRETE BRIDGE SUPPORTS

S.A. LOGINOVA^{1✉}, Cand. Sci. (Engineering)

I.N. GOGLEV²

¹*Yaroslavl State Technical University, Moskovsky ave., 88, Yaroslavl, 150023, Russian Federation*

²*Ivanovo State Politechnical University, Sheremetevsky ave., 21, Ivanovo, 150300, Russian Federation*

Abstract

Introduction. The article considers the aspects of the effect caused by the concrete biological corrosion on the durability of concrete and reinforced concrete structures of transport infrastructure facilities. Examples of real objects with identified areas of the combined effect of bio- and other types of the concrete corrosion are considered.

Aim. The study aims at investigating the processes of biofouling on the surface of bridge supports and mechanisms of biomass formation on the concrete surface depending on the mode of the fluid movement in the river flow.

Methods and materials. The dependence of the Reynolds number on the temperature and the coefficient of the river water kinematic viscosity is considered. A physical and mathematical model of the biocorrosion mass transfer, occurring during the flowover of a two-row bridge support system by a liquid flow under small Reynolds numbers, was developed and calculated.

Results. Due to the developed physical and mathematical model, the service life of the reinforced concrete bridge supports can be calculated, the “residual” durability can be determined, as well as the possible time of cleaning the concrete surface from biodeposits can be obtained.

Conclusions. According to the results of the conducted research, the dependence of the concrete biocorrosion effect on the process of the surface biofouling of concrete/reinforced concrete supports is revealed. In addition, the article provides the calculation of economic efficiency of the measures for cleaning concrete from biofouling. According to the calculation, the annual economic effect amounted to 9% of the budgeted cost of the performed works. In the case of performing scheduled preventive measures for cleaning from biofouling at least once every 5 years, the period for carrying out inter-repair work for eliminating defects in concrete and reinforced concrete building structures can be increased by 1.5 times. On the basis of the performed calculation, the recommendations on the increase in the durability and the period of the effective operation of bridge structures are provided.

Keywords: bridge, support, concrete, reinforced concrete, corrosion, mass transfer, mathematical model, diffusion

For citation: Loginova S.A., Goglev I.N. Improving the biostability of concrete and reinforced concrete bridge supports. Bulletin of Science and Research Center of Construction. 2022. Vol. 32. No. 1. P. 115–127 (In Russ.). doi: [https://doi.org/10.37538/2224-9494-2022-1\(32\)-115-127](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2022-1(32)-115-127)

Author contribution statements

Loginova S.A. – obtaining data for analysis; mathematical modeling; formulation of conclusions; interpretation of results; writing the text of the manuscript.

Goglev I.N. – literature review; analysis and systematization of experimental data; manuscript design; work with graphic material; editing and revision of the manuscript.

Funding

No funding support was obtained for the research.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Введение

В настоящее время предотвращение обрушений мостовых сооружений остается одним из ключевых направлений научных исследований в отрасли транспортного строительства. Мостовые опоры должны обладать достаточной прочностью и устойчивостью [1, 2]. Одной из причин обрушения мостовых сооружений является коррозионное разрушение строительных конструкций. Например, в 2009 г. произошло разрушение опоры низководного железобетонного автодорожного моста через ручей в селе Лоева Ивано-Франковской области. Мост представлял собой железобетонную балочную конструкцию длиной 6 м, шириной 12 м. Разрушение железобетонной опоры моста привело к последующему обрушению железобетонной плиты проезжей части. К счастью, человеческих жертв удалось избежать [1].

Деградация бетонных и железобетонных строительных конструкций является следствием коррозионных процессов, происходящих в цементном камне. Наиболее часто в зонах разрушения бетона действует одновременно несколько видов коррозии, например

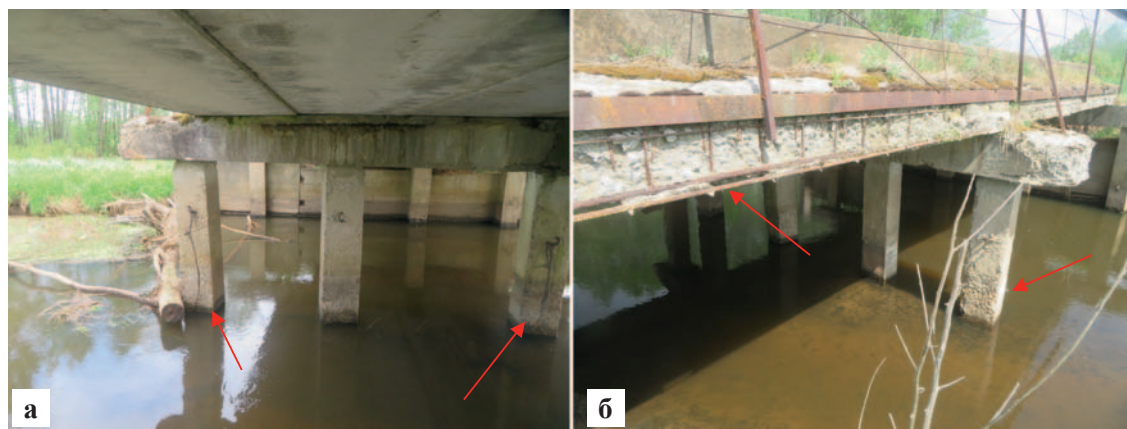


Рис. 1. Коррозионные повреждения железобетонных конструкций моста в Ивановской области:
а – биокоррозия и карбонизация бетона мостовых опор;
б – оголение и коррозия продольной арматуры плиты покрытия.

Fig. 1. Corrosive damages of the reinforced concrete structures of the bridge in the Ivanovo Oblast:
а – biocorrosion and carbonization of the bridge support concrete;
б – exposure and corrosion of the longitudinal reinforcement of the roof slab

карбонизация + хлоридная + биологическая и другие сочетания. Итогом таких совместных процессов являются обширные зоны поражения конструкций (рис. 1а, б) транспортных сооружений.

И если исследования по влиянию карбонизации и хлоридной коррозии, а также по их выявлению на полевой и лабораторной стадии обследования строительных конструкций в литературе встречаются достаточно часто [6, 7], то вот вопросы выявления и исследования биологической коррозии отражены недостаточно широко. До настоящего времени предотвращение биообрастания подводных бетонных и железобетонных сооружений проводилось в основном за счет обработки поверхностей биоцидами для уничтожения или предотвращения оседания потенциальных загрязняющих веществ. Однако экологическая безопасность ряда биоцидов против биообрастания вызывает серьезные опасения, возникает необходимость поиска альтернативных методов защиты [7].

Предмет и методы исследования

Рассмотрим частный случай коррозионного разрушения железобетонных мостовых опор в водной среде, усугубленный биообрастанием. Благоприятные условия для биообрастания складываются на задней торцевой части опоры в области низких давлений [3]. Около поверхности обтекаемого тела создается область переменных скоростей и давлений. Чаще всего биообрастание начинается с образования биопленки, состоящей из скопления органических и неорганических соединений и различных микроорганизмов, прикрепленных к поверхности мостовых опор. Толщина образующейся биопленки зависит от гидравлической нагрузки, концентрации органических веществ, от пористости материала, влияния факторов внешней среды [3, 4]. Турбулентные потоки в пограничном слое приводят к нарушению целостности биопленки. Сброс биомассы и ее рост происходят непрерывно, поэтому на практике биопленка никогда не имеет строго определенной толщины по всей поверхности конструкции. Биопленка служит субстратом для поселения водорослей, моллюсков, некоторых форм грибов и т. д., характерных для речных вод [4, 5]. Состав сообществ биообрастания сильно

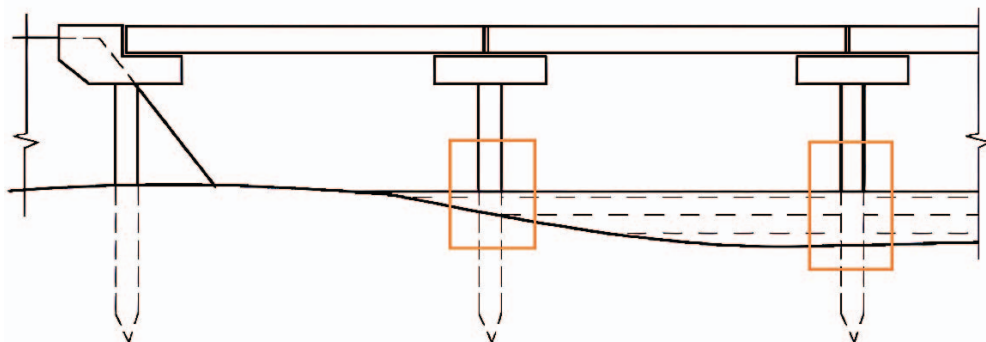


Рис. 2. Схема моста на свайном основании. Красным выделены наиболее уязвимые участки опор к биокоррозии и карбонизации

Fig. 2. Scheme of a bridge on a pile foundation. The most vulnerable to biocorrosion and carbonization support areas are highlighted in red

различается географически, сезонно и локально по глубине, также на него влияют многочисленные абиотические и биотические факторы. К абиотическим факторам относятся физико-химические характеристики воды, а именно: температура, pH, растворенный кислород и содержание органических веществ. Пресноводное обрастание обычно меньше морского и по числу видов, и по биомассе, а следовательно, и по толщине. Скорость обрастания в первую очередь зависит от скорости тока воды, которая определяет возможность оседания и удержания организмов на субстрате, снабжения их питательными веществами и кислородом и др.

Исследованию подвергался мост на свайном основании (рис. 2). Глубина реки в месте расположения моста менее 5 м. Скорость течения реки менее 2 км/ч. Свайная опора моста представлена плоской двурядной системой типовых железобетонных свай сплошного квадратного сечения $0,35 \times 0,35$ (м) с железобетонным ростверком по головам свай.

Оценка режима движения жидкости возможна с помощью числа Рейнольдса (Re):

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

где ρ – плотность жидкости, кг/м³;

d – величина, характеризующая линейные размеры тела, обтекаемого жидкостью, м;

v – средняя скорость движения жидкости, м/с;

μ – динамический коэффициент вязкости жидкости, мПа·с;

ϑ – коэффициент кинематической вязкости воды, м²/с.

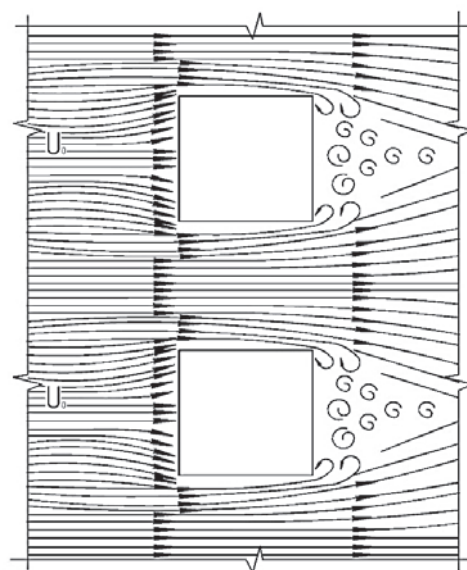


Рис. 3. Схема обтекания двурядной системы опоры моста потоком жидкости при малых числах Рейнольдса
Fig. 3. Scheme of the liquid flowing over a two-row bridge support at small Reynolds numbers

Таблица 1

Зависимость числа Рейнольдса от температуры и коэффициента кинематической вязкости воды

Table 1

Dependence of the Reynolds number on the temperature and the coefficient of the water kinematic viscosity

$t, ^\circ\text{C}$	0	5	10	15	20
$\nu, 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$	1,79	1,52	1,31	1,15	1,01
$Re, 10^5$	1,17	1,38	1,61	1,82	2,09



Рис. 4. Биокоррозия и карбонизация на железобетонных опорах автомобильно-дорожного моста в Ивановской области

Fig. 4. Biocorrosion and carbonation on reinforced concrete supports of the road bridge in the Ivanovo region

На рис. 3 представлена схема обтекания двурядной системы опоры моста квадратного сечения потоком жидкости при малых числах Рейнольдса. В расчете расстояние между опорами принималось равным 1 м. При малых числах Рейнольдса при данном расположении опор образуется два потока скоростей для каждой опоры, которые ведут себя независимо друг от друга. Увеличение числа Рейнольдса изменит характер обтекания опор: будут возникать вихри, которые станут оказывать влияние друг на друга.

Из литературных источников [6, 8] известно, что значения коэффициента кинематической вязкости (ν) существенно уменьшаются с повышением температуры t , °С. Рассмотрим диапазон наиболее характерных температур $T = 0 \dots 20$ °С. Расчетные значения числа Рейнольдса в зависимости от температуры (T) и коэффициента кинематической вязкости воды (ν) при средней скорости течения 2 км/ч представлены в табл. 1. Согласно табл. 1 в рассматриваемом случае движение жидкости – ламинарное.

При обтекании опоры потоком жидкости вблизи его поверхности образуется тонкий пограничный слой жидкости [9]. Биообрастание поверхности опоры приводит к возникновению шероховатости, которая

влияет на сопротивление трения и способствует возникновению турбулентного движения в пограничном слое. Математическая теория пограничного слоя была дана Л. Прандтлем. Число Прандтля (Pr) взаимосвязано с числами Рейнольдса (Re) и Пекле (Pe):

$$Pe = Re \cdot Pr. \quad (2)$$

Скорость течения жидкости вблизи обтекаемой поверхности намного меньше скорости течения в основной части потока, а в месте контакта поверхности и жидкости равна нулю. В случае обтекания поверхности, подверженной биообрастанию, турбулентность в таких слоях возникает значительно раньше, чем при обтекании гладких поверхностей. Толщина пограничного слоя не может обладать четко выраженной границей в связи с природной неравномерностью биообрастания поверхности. При температуре жидкости $T = 0 \dots 20$ °С значения средней толщины турбулентного слоя составит 6,9...6,1 мм соответственно. До точки отрыва распределение скоростей в пограничном слое в непосредственной близости от поверхности аналогично распределению при взаимодействии турбулентного потока с плоской поверхностью. Далее оторвавшийся пограничный слой

образует вихревое течение. В результате контакта бетона с жидкостью концентрация растворенного $\text{Ca}(\text{OH})_2$ в порах бетона начинает уменьшаться, вызывая растворение свободных кристаллов $\text{Ca}(\text{OH})_2$. Как следствие, происходит постепенное «выщелачивание» бетона в зонах контакта с водой и карбонизация бетона в участках над водой (рис. 4).

С точки зрения теории массопереноса диффузия «свободного» $\text{Ca}(\text{OH})_2$ к границе раздела фаз может быть описана дифференциальными уравнениями (3)–(10):

$$\frac{\partial C_1(x, \tau)}{\partial \tau} = k_1 \cdot \frac{\partial^2 C_1(x, \tau)}{\partial x^2}, \quad \tau > 0, -\delta_1 \leq x \leq 0, \quad (3)$$

$$\frac{\partial C_2(x, \tau)}{\partial \tau} = k_2 \cdot \frac{\partial^2 C_2(x, \tau)}{\partial x^2}, \quad \tau > 0, 0 \leq x \leq \delta_2. \quad (4)$$

Начальные условия характеризуются уравнениями:

$$C_1(x, \tau)|_{\tau=0} = C_1(x, 0) = C_{1,0}, \quad (5)$$

$$C_2(x, \tau)|_{\tau=0} = C_2(x, 0) = C_{2,0}. \quad (6)$$

Граничные условия:

$$\left. \frac{\partial C_1(x, \tau)}{\partial x} \right|_{x=\delta_1} = 0, \quad (7)$$

$$C_1(x, \tau)|_{\tau=0} = m \cdot C_2(x, \tau)|_{\tau=0}, \quad (8)$$

$$-\rho_{\text{бет}} \cdot k_1 \cdot \left. \frac{\partial C_1(x, \tau)}{\partial x} \right|_{x=0} = -\rho_{\text{биом}} \cdot k_2 \cdot \left. \frac{\partial C_2(x, \tau)}{\partial x} \right|_{x=0}, \quad (9)$$

$$-k_2 \cdot \left. \frac{\partial C_2(x, \tau)}{\partial x} \right|_{x=\frac{\delta_2}{\delta_1}} = q_n(\tau). \quad (10)$$

Методом интегральных преобразований было получено решение уравнений (3)–(10) [10]:

$$\begin{aligned} Z_1(\bar{x}, Fo_m) = & \frac{1}{1 + NK_k K_\delta} \left\{ 1 - NK_\delta + NK i_H^* \left[Fo_m + \frac{(1 - \bar{x})^2}{2} + \Phi(K_k, N, K_\delta) \right] \right\} \\ & + 2 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{\mu_n^2 \Psi'_1(\mu_n)} (\mu_n \sin \mu_n [\cos(\mu_n \bar{x}) \cos(\mu_n \sqrt{K_k} K_\delta) \\ & - \sqrt{K_k} K_\delta \sin(\mu_n \bar{x}) \sin(\mu_n \sqrt{K_k} K_\delta)] - \frac{N}{\sqrt{K_k}} \cos(\mu_n (1 + \bar{x})) \exp(-\mu_n^2 Fo_m) \end{aligned} \quad (11)$$

$$Z_2(\bar{x}, Fo_m) = \frac{1}{1 + NK_k K_\delta} (1 - NK_\delta + Ki_H^* [\bar{x} - Fo_m K_k K_\delta] + NK_i^* (\phi(K_k, N, K_\delta) - \frac{1 + K_k \bar{x}^2}{2}) - 2 \sum_{m=1}^{\infty} \frac{J}{\mu_m^2 \psi_1(\mu_m)} (\mu_m \sin \mu_m \cos[\mu_m \sqrt{K_k} (K_\delta - \bar{x})] - \frac{\mu_m}{\sqrt{K_k}} \sin(\mu_m \sqrt{K_k} K_\delta) \left[N \cos \mu_m \cos(\mu_m \sqrt{K_k} \bar{x}) + \frac{1}{\sqrt{K_k}} \sin \mu_m^2 \sin(\mu_m \sqrt{K_k} \bar{x}) \right] + + Ki_H^* \left[N \cos \mu_m \cos(\mu_m \sqrt{K_k} \bar{x}) + \frac{1}{\sqrt{K_k}} \sin \mu_m \sin(\mu_m \sqrt{K_k} \bar{x}) \right] \exp(-\mu_m^2 K_k Fo_m)). \quad (12)$$

Здесь: $C_1(x, \tau)$ – концентрация «свободного» $\text{Ca}(\text{OH})_2$ в перерасчете на CaO в бетоне для времени τ в точке с координатой x , (кг CaO /кг бетона);

$C_2(x, \tau)$ – концентрация «свободного» гидроксида кальция в перерасчете на CaO в биопленке в момент времени τ в произвольной точке с координатой x , (кг CaO /кг биомассы);

$k_{1,2}$ – коэффициенты массопроводности, $\text{м}^2/\text{с}$;

δ_1 – толщина бетонной конструкции, м;

δ_2 – толщина биопленки, м;

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

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

m – константа равновесия Генри, кг биомассы/кг бет.;

$\rho_{\text{бет}}, \rho_{\text{биом}}$ – плотности бетона и биомассы, $\text{кг}/\text{м}^3$;

$Z_1(\bar{x}, Fo_m)$ – безразмерная концентрация переносимого компонента по толщине бетона;

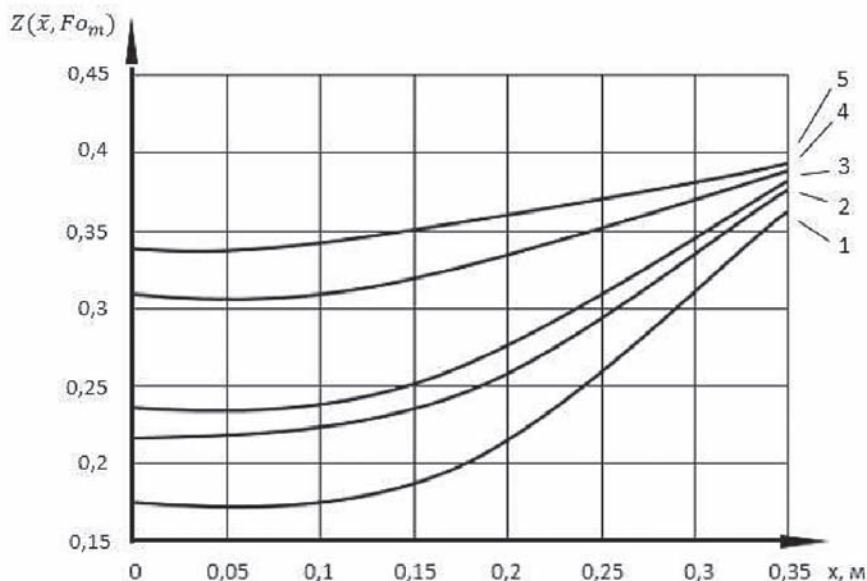


Рис. 5. Поля концентраций в бетонной мостовой опоре при критерии Фурье Fo_m равном: 1 – 0,16; 2 – 0,32; 3 – 0,4; 4 – 0,8; 5 – 1,2; что соответствует 2, 4, 5, 10 и 15 годам эксплуатации

Fig. 5. Concentration fields in the concrete bridge support at the Fourier criterion Fo_m equal to: 1 – 0,16; 2 – 0,32; 3 – 0,4; 4 – 0,8; 5 – 1,2; corresponding to 2, 4, 5, 10 and 15 years of operation, respectively

$Z_2(\bar{x}, Fo_m)$ – безразмерная концентрация переносимого компонента по толщине биопленки;

$\bar{x} = x / \delta_1$ – безразмерная координата;

$K_k = k_2 / k_1$;

$K_\delta = \delta_2 / \delta_1$;

q_H – плотность потока массы, уходящей от биопленки в поток жидкости;

$N = (\rho_{\text{биом}} \cdot k_2) / (\rho_{\text{бет}} \cdot k_1 \cdot m)$ – коэффициент, учитывающий характеристики фаз;

$Fo_m = (k_1 \cdot \tau) / \delta_1^2$ – критерий Фурье;

$Ki_H^* = \frac{q_H \cdot \rho_{\text{бет}} \cdot m \cdot K_\delta}{\delta_2 \cdot \rho_{\text{биом}} \cdot k_2 \cdot C_0}$ – массообменный критерий Кирпичева.

С целью установления срока службы бетонных опор моста в речной воде по предложенной математической модели были выполнены расчеты полей концентраций «свободного» $\text{Ca}(\text{OH})_2$ по толщине бетонной опоры через 2, 4, 5, 10 и 15 лет эксплуатации. Скорость роста биомассы во времени пропорциональна концентрации клеток. Согласно литературным источникам [10–12] среднее увеличение толщины биообрастания за год эксплуатации мостовых опор в речной воде составляет 25–30 мм. Исходя из этого были определены плотности биомассы, соответствующие заданным временным отрезкам. Результаты расчетов приведены на рис. 5. В итоге был сделан вывод, что концентрация «свободного» $\text{Ca}(\text{OH})_2$ на поверхности бетонной опоры достигнет значения, соответствующего началу разложения высокоосновных составляющих бетона, через 2,1 года.

В настоящее время ГОСТ не регламентирует сроки проведения технической очистки подводных сооружений от биообрастания. Исследования и численные эксперименты по математической модели позволили сформулировать рекомендации по проведению плановых работ по очистке бетонных и железобетонных подводных конструкций от биообрастания.

Своевременное осуществление периодических осмотров частей мостов, находящихся ниже уровня воды, позволит снизить расходы на возможные ремонтные и восстановительные работы, а проведение плановой очистки подводных сооружений каждые 5 лет позволит снизить скорость их коррозионного разрушения.

Ниже приводится расчет экономической эффективности от проведения периодических работ по очистке подводных конструкций от биообрастания.

Согласно нормативным документам [13, 14] нормативный срок службы сооружения определяется по формуле:

$$T_c = \frac{100}{N_{\text{а.п.}}}, \quad (13)$$

где $N_{\text{а.п.}}$ – процент ежегодных амортизационных отчислений на полное восстановление сооружения.

Срок службы для бетонных и железобетонных мостов составляет 100 лет, а общая норма амортизационных отчислений $N_{\text{а.п.}} = 1,3 \%$ в т. ч. на капитальный ремонт $0,3 \%$ [13, 14].

Затраты и издержки, осуществляемые в процессе эксплуатации сооружений, рассчитываются по формуле [12, 13]:

$$3_{\text{Э}} = \frac{K_{\text{Э}}}{\alpha_t} + \sum_1^{\gamma_{\text{кр}}-1} \frac{C_{\text{кр}}}{\alpha_t} + \sum_1^{T_c} \frac{C_{\text{тр}}}{\alpha_t} + \sum_1^{\gamma_{\text{зк}}-1} \frac{C_{\text{зк}}}{\alpha_t}, \gamma_{\text{кр}} - 1 = \frac{T_c}{T_{\text{кр}}} - 1, \gamma_{\text{зк}} - 1 = \frac{T_c}{T_{\text{зк}}} - 1, \quad (14)$$

где $K_{\text{Э}}$ – удельные капитальные вложения в ремонтную базу или стоимость основных производственных фондов, используемых при производстве ремонтно-строительных работ;

$C_{\text{кр}}$ – затраты на один капитальный ремонт;

$C_{\text{тр}}$ – затраты на один среднегодовой текущий ремонт;

$C_{\text{зк}}$ – затраты, связанные с восстановлением и поддержанием качества и долговечности конструкций, а также с проведением технического обслуживания сооружений, не учтенного в составе капитальных и текущих ремонтов;

t – годы проведения капитальных ремонтов или затрат по восстановлению и поддержанию качества и долговечности строительных конструкций в процессе эксплуатации сооружений;

$T_{\text{кр}}$ – периодичность капитальных ремонтов конструкций;

$T_{\text{зк}}$ – периодичность проведения затрат по восстановлению и поддержанию качества и долговечности строительных конструкций.

Значение коэффициента $1/\alpha_t$ при различных сроках осуществления затрат и нормативе приведения $E = 0,1$ является табличными величинами, где t – время в годах между моментом производства затрат и началом эксплуатации сооружений.

В то же время стоимость ежегодных текущих ремонтов определяется по формуле:

$$C_{\text{тр}} = \frac{(C_{\text{Д}} - C_{\text{зк}})}{T_{\text{кр}}}, \quad (15)$$

где q – коэффициент, зависящий от модуля поверхности конструкции M_n , равного отношению площади внешней поверхности конструкций (м^2) к ее объему (м^3). Для массивных конструкций модуль поверхности $M_n \approx 5$, а коэффициент $q = 0,04$.

Годовой экономический эффект от использования мероприятия рассчитывается по формуле [13, 15]:

$$\text{Э}_r = (3_1 - 3_2) \cdot A_2, \quad (16)$$

где 3_1 – приведенные затраты, определяемые как $3 = (3_n - 3_3)$ для строительной конструкции с исходным уровнем качества и долговечности (аналог);

3_n – приведенные затраты, осуществляемые до начала эксплуатации сооружений;

3_3 – приведенные затраты, осуществляемые в процессе эксплуатации зданий или сооружений за срок службы T_c ;

3_2 – то же, для конструкции повышенного качества и долговечности;

A_2 – годовой объем внедрения предлагаемого мероприятия по повышению качества и долговечности.

Согласно нормативным документам [13–16] восстановление первоначальных транспортно-эксплуатационных качеств сооружения необходимо проводить каждые 15–30 лет.

При периодичности капитальных ремонтов в 20 лет коэффициент $\mu_{\text{кр}} = 0,174$; в 30 лет, $\mu_{\text{тр}} = 0,1$. Тогда при $t = 20$ лет $1/\alpha_t = 0,513$; при $t = 30$ лет $1/\alpha_t = 0,035$; при $t = 40$ лет $1/\alpha_t = 0,022$; при $t = 60$ лет $1/\alpha_t = 0,003$; при $t = 80$ лет $1/\alpha_t = 0,001$; при $t = 90$ лет $1/\alpha_t = 0,001$; при $t = 100$ лет $1/\alpha_t = 0,001$.

Приведенные затраты на 100 м² бетонной поверхности равны:

$$З_1 = З_{н1} + З_{з1} = 58164,19 + 41067,12 = 99231,31 \text{ руб.}$$

$$З_2 = З_{н2} + З_{з2} = 58164,19 + 30121,05 = 88285,24 \text{ руб.}$$

Годовой экономический эффект составит $\mathcal{E}_r = (З_1 - З_2) \cdot A_2 = 99231,31 - 88285,24) \cdot 0,08 \approx 9 \%$

Ожидаемый экономический эффект в текущих ценах для Ивановской области от проведения своевременных плановых-предупредительных работ против биообрастания составил 9 % от стоимости сметных работ [10, 17].

В результате исследования было установлено, что проведение очистительных от биообрастания работ с периодичностью каждые 5 лет в совокупности с иными мероприятиями плановых-предупредительных работ позволит увеличить срок межремонтных работ в 1,5 раза.

Список литературы

1. Аварии и разрушения мостовых сооружений, анализ их причин. Часть 2 / И.Г. Овчинников, И.И. Овчинников, И.Ю. Майстренко, А.В. Кокодеев // Интернет-журнал «Транспортные сооружения». – 2017. – Том 4, № 4. – URL: <https://t-s.today/PDF/14TS417.pdf>. <https://doi.org/10.15862/14TS417>
2. Анализ и систематизация причин разрушения мостовых сооружений / А.А. Карамышева, Д.А. Строев, М.А. Колотиенко, А.И. Коник // Инженерный вестник Дона. – 2019. – № 3 (54). – С. 34.
3. Шумейко В.И. Архитектурное конструирование зданий и сооружений / В.И. Шумейко, Е.В. Пименова, А.И. Евтушенко. – Ростов-на-Дону: ДГТУ, 2017. – С. 211–212.
4. Румянцева В.Е. Применение полевых и лабораторных методов определения карбонизации, хлоридной и сульфатной коррозии при обследовании строительных конструкций зданий и сооружений / В.Е. Румянцева, И.Н. Гоглев, С.А. Логинова // Строительство и техногенная безопасность. – 2019. – № 15 (67). – С. 51–58.
5. Еремин К.И. Методика экспериментальных исследований блоков покрытий промышленных зданий при аварийных воздействиях / К.И. Еремин, С.А. Матвеюшкин, Г.А. Арутюнян // Вестник МГСУ. – 2015. – № 12. – С. 34–46.
6. Логинова С.А. Моделирование кинетики и динамики протекания массопереноса при различных видах коррозии цементных бетонов / С.А. Логинова, И.Н. Гоглев // Вестник Череповецкого государственного университета. – 2020. – № 6 (99). – С. 22–35. <https://doi.org/10.23859/1994-0637-2020-6-99-2>
7. Способ определения долговечности железобетонных конструкций: пат. RU 2755246 C1 / Д.С. Рыбнов, И.Н. Гоглев, К.Ю. Соколов. – Оpubл. 14.09.2021.
8. Nwafor A.U. Building failures/collapses and their reputational effect on building industry in Nigeria / A.U. Nwafor // International Journal of Science and Research. – 2015. – Vol. 4, no. 6. – P. 847–853.
9. Liang M.T. Reliability analysis for the existing reinforced concrete pile corrosion of bridge substructure / M.T. Liang, J.J. Lan // Cement and Concrete Research. – 2005. – Vol. 35, no. 3. – P. 540–550. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2004.05.010>.
10. Fedosov S.V. Mathematical model of concrete biological corrosion / S.V. Fedosov, S.A. Loginova // Magazine of Civil Engineering. – 2020. – Vol. 99, no. 7. – P. 9906. <https://doi.org/10.18720/MCE.99.6>
11. Безбабичева О. О продлении срока службы балочно-консольных монолитных мостов / О. Безбабичева, С. Краснов, А. Лозицкий // Вестник ХНАДУ. – 2012. – № 58. – С. 40–45.
12. Пастухов Ю.В., Сидельникова О.П. Контроль коррозии при эксплуатации зданий и сооружений в особых условиях / Ю.В. Пастухов, О.П. Сидельникова // Вестник ВолгГАСУ. Сер.: Стр-во и архит. – 2007. – Вып. 7 (26). – С. 42–43.
13. Руководство по определению экономической эффективности повышения качества и долговечности строительных конструкций / НИИЖБ Госстроя СССР. – Москва: Стройиздат, 1981. – 56 с.
14. Инструкция по определению экономической эффективности использования в строительстве новой техники, изобретений и рационализаторских предложений (СН 509-78) / НИИЖБ Госстроя СССР. – Москва: Стройиздат, 1979. – 65 с.

15. Макаров Д.А. Экономическая эффективность и финансовые риски проектного финансирования в жилищном строительстве / Д.А. Макаров, М.Н. Юденко // Микроэкономика. – 2020. – № 2. – С. 23–28. <https://doi.org/10.33917/mic-2.91.2020.23-28>
16. Новиков А.А. Долговечность бетонных и железобетонных конструкций в современном строительстве / А.А. Новиков, Е.М. Козлова // Инновационная наука. – 2018. – № 10. – С. 16–17.
17. Овчинников И.И. Долговечность железобетонных конструкций транспортных сооружений / И.И. Овчинников // Строительные материалы. – 2011. – № 2. – С. 60–62.

References

1. Ovchinnikov I.G., Ovchinnikov I.I., Maystrenko I.Y., Kokodeev A.V. Failures and collapses of bridge constructions, analysis of their causes. Part 2. Russian journal of transport engineering [Internet]. 2017;4(4). Available from: <https://t-s.today/PDF/14TS417.pdf>. <https://doi.org/10.15862/14TS417> (in Russian).
2. Karamysheva A.A., Stroyev D.A., Kolotienko M.A., Konik A.I. Analysis and systematization of the causes of the destruction of bridge structures. Inzhenernyi vestnik Dona = Engineering Journal of Don. 2019;(3):34 (in Russian).
3. Shumeiko V.I., Pimenova E.V., Evtushenko A.I. Architectural design of buildings and structures. Rostov-on-Don: Don State Technical University; 2017, p. 211–212 (in Russian).
4. Rumyantseva V.E., Goglev I.N., Loginova S.A. Application of field and laboratory methods for determining carbonization, chloride and sulfate corrosion in the examination of building structures of buildings and structures. Stroitel'stvo i tekhnogennaya bezopasnost' = Construction and industrial safety. 2019;(15):51–58 (in Russian).
5. Eremin K.I., Matveyushkin S.A., Arutyunyan G.A. Technique of experimental research of blocks of coatings of industrial buildings under emergency impacts. Vestnik MGSU. 2015;(12):34–46 (in Russian).
6. Loginova S.A., Goglev I.N. Modeling the kinetics and dynamics of mass transfer in various types of corrosion of cement concretes. Vestnik Cherepovetskogo gosudarstvennogo universiteta = Cherepovets State University Bulletin. 2020;(6):22–35. <https://doi.org/10.23859/1994-0637-2020-6-99-2> (in Russian).
7. Rybnov D.S., Goglev I.N., Sokolov K.Y. Method for determining the durability of reinforced concrete structures. Patent RU no. 2755246 C1. (in Russian).
8. Nwafor A.U. Building failures/collapses and their reputational effect on building industry in Nigeria. International Journal of Science and Research. 2015;4(6):847–853.
9. Liang M.T., Lan J.J. Reliability analysis for the existing reinforced concrete pile corrosion of bridge substructure. Cement and Concrete Research. 2005;35(3):540–550. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2004.05.010>.
10. Fedosov S.V., Loginova S.A. Mathematical model of concrete biological corrosion. Magazine of Civil Engineering. 2020;99(7):9906. <https://doi.org/10.18720/MCE.99.6>
11. Bezbabicheva O., Krasnov S., Lozitskiy A. On the extension of the service life of beam-cantilever monolithic bridges. Vestnik KhNADU = Bulletin of Kharkiv National Automobile and Highway University. 2012;(58):40–45 (in Russian).
12. Pastukhov Yu.V., Sidelnikova O.P. Corrosion control during the operation of buildings and structures in special conditions. Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo arhitekturno-stroitel'nogo universiteta. Seriya: Stroitel'stvo i arhitektura = Bulletin of Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering. Series: Civil Engineering and Architecture. 2007;(7):42–43 (in Russian).
13. NII ZHB Gosstroy of the USSR. Guidelines for determining the economic efficiency of improving the quality and durability of building structures. Moscow: Stroyizdat Publ.; 1981. 56 p. (in Russian).
14. NII ZHB Gosstroy of the USSR. Instructions for determining the economic efficiency of using new technology, inventions and rationalization proposals in construction (SN 509-78). Moscow: Stroyizdat Publ.; 1979. 65 p. (in Russian).
15. Makarov D.A., Yudenko M.N. Economic efficiency and financial risks of project financing in housing construction. Mikroekonomika = Microeconomics. 2020;(2):23–28. <https://doi.org/10.33917/mic-2.91.2020.23-28> (in Russian).
16. Novikov A.A., Kozlova E.M. Durability of concrete and reinforced concrete structures in modern construction. Innovatsionnaya nauka = Innovation science. 2018;(10):16–17 (in Russian).
17. Ovchinnikov I.I. Durability of reinforced concrete structures of transport structures. Stroitelnye materialy = Construction Materials. 2011;(2):60–62 (in Russian).

Информация об авторах / Information about the authors

Светлана Андреевна Логинова✉, канд. техн. наук, доцент кафедры «Строительные конструкции» Ярославского государственного технического университета, Ярославль

e-mail: sl79066171227@yandex.ru

тел.: +7 (906) 617-12-27

Svetlana A. Loginova✉, Cand. Sci. (Engineering), Associate Professor of the Department of Building Structures, Yaroslavl State Technical University, Yaroslavl

e-mail: sl79066171227@yandex.ru

tel.: +7 (906) 617-12-27

Илья Николаевич Гоглев, соискатель, Ивановский государственный политехнический университет, Иваново

e-mail: azidplumbum00@mail.ru

тел.: +7 (926) 012-97-99

Ilya N. Goglev, applicant, Ivanovo State Polytechnical University, Ivanovo

e-mail: azidplumbum00@mail.ru

tel.: +7 (926) 012-97-99

✉ Автор, ответственный за переписку / Corresponding author