

**ВЕРОЯТНОСТНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ  
НЕСУЩИХ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ  
ПРЕДПРИЯТИЙ ТЕКСТИЛЬНОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ  
ПРИ СОВМЕСТНОМ ДЕЙСТВИИ НАГРУЗКИ  
И ХЛОРИДСОДЕРЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ**

**PROBABILISTIC MODELING OF REINFORCED CONCRETE  
STRUCTURES OF TEXTILE INDUSTRY ENTERPRISES  
UNDER THE LOAD AND THE CHLORIDE ATTACK**

*И.И. ОВЧИННИКОВ, ЧЭНЬ ТАО, И.Г. ОВЧИННИКОВ  
I.I. OVCHINNIKOV, CHEN TAO, I.G. OVCHINNIKOV*

(Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.,  
Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет,  
Пермский национальный исследовательский политехнический университет)  
(Yuri Gagarin State Technical University of Saratov,  
Moscow State Automobile & Road Technical University,  
Perm National Research Polytechnical University)  
E-mail: bridgeart@mail.ru; 313085767@qq; combridgesar@mail.ru

*Рассматривается задача вероятностного моделирования поведения железобетонных конструкций на предприятиях текстильной промышленности при совместном действии нагрузки и хлоридсодержащей среды. Построены модели, учитывающие вероятностный характер коррозионных процессов, разброс геометрических и прочностных характеристик изгибаемых железобетонных элементов, а также вероятностный характер нагрузки. Разработана методика расчета напряженно-деформированного состояния и долговечности изгибаемого железобетонного элемента на примере армированной балки прямоугольного сечения и проведен расчетный анализ с использованием метода статистического моделирования. Долговечность балки рассчитывалась с учетом случайных свойств нагрузки, прочности, геометрических размеров и характеристик хлоридсодержащей среды. Исследовано влияние различных случайных параметров на разброс долговечности железобетонной балки в агрессивной среде эксплуатации.*

*The problem of probabilistic simulation of the behavior of reinforced concrete structures at textile industry enterprises under the action of a load and a chloride attack is considered. The models that take into account the probabilistic nature of corrosion processes, the dispersion of the geometric and strength characteristics of the bent reinforced concrete elements, as well as the probabilistic nature of the load, are constructed. A technique for calculating the stress-strain state and the durability of a bent reinforced concrete element was developed using the example of a reinforced beam of rectangular cross section and a computational analysis was performed using the statistical modeling method. The durability of the beam was calculated taking into account the random properties of the load, strength, geometric dimensions and characteristics of the chloride-containing medium. The influence of various random parameters on the dispersion of the durability of a reinforced concrete beam in an aggressive environment is investigated.*

**Ключевые слова:** предприятия текстильной промышленности, несущие железобетонные конструкции, хлоридная коррозия, вероятностные модели, долговечность, деформационная модель.

**Keywords: enterprises of textile industry, carrying reinforced concrete structures, chloride corrosion, probabilistic models, durability, deformation model.**

Конструктивные решения зданий и сооружений предприятий текстильной промышленности предполагают широкое использование в качестве несущих элементов железобетонные конструкции. Эти железобетонные конструкции изначально имеют разброс геометрических размеров, прочностных и деформативных свойств; в процессе эксплуатации они подвергаются совместному действию нагрузок различного вида и других эксплуатационных факторов: температурных полей, влажности, рабочей агрессивной среды, которые обычно имеют случайный характер. В силу этого процесс деформирования железобетонных конструкций во времени можно считать случайным. Достаточно широко распространенной агрессивной средой для железобетонных конструкций является хлоридсодержащая среда. Проблема детерминированного прогнозирования поведения железобетонных конструкций при совместном действии нагрузок и хлоридсодержащих сред рассматривалась в отечественных [1...5] и зарубежных [6], [7] работах. Вероятностный подход к прогнозированию поведения железобетонных конструкций в агрессивных эксплуатационных средах активно развивался в работах Франгопола Д.М. с сотрудниками и учениками [8...10]. Однако в этих работах изучался случайный характер только некоторых параметров и деструкционных процессов. В настоящей работе на примере железобетонного конструктивного элемента, работающего на изгиб балки прямоугольного сечения, рассматривается учет вероятностного характера возможно большего количества факторов, влияющих на процессы деструкции железобетонных конструкций: разброс механических характеристик составляющих материалов и изменчивость размеров конструкций; вероятностный характер нагрузок и средовых воздействий; влияние временного фактора на случайные характеристики компонентов железобетона, а также случайный характер воздействия эксплуатационной среды.

Обобщенная модель деформирования железобетонного изгибаемого элемента формируется как совокупность моделей изгибаемого конструктивного элемента (балки); железобетона (складывающейся из модели деформирования бетона и модели деформирования металлической арматуры); воздействия агрессивной среды (учитывающей деструкцию бетона и коррозию арматуры); нагружения и наступления предельного состояния изгибаемой конструкции. У железобетонной балки случайными, с учетом известных экспериментальных данных, считаются размеры балки, площадь арматуры, толщина защитного слоя.

В качестве модели деформирования бетона принимаются соотношения:

$$\tilde{\sigma} = \begin{cases} \tilde{A}_p(\tilde{C})\varepsilon - \tilde{B}_p(\tilde{C})\varepsilon^3, \\ \tilde{A}_c(\tilde{C})\varepsilon - \tilde{B}_c(\tilde{C})\varepsilon^3, \end{cases} \quad (1)$$

где  $\tilde{A}_p(\tilde{C}) = \tilde{A}_{p0} - \tilde{k}_{pa}(\tilde{C})$ ,  $\tilde{B}_p(\tilde{C}) = \tilde{B}_{p0} - \tilde{k}_{pb}(\tilde{C})$ ,  $\tilde{A}_c(\tilde{C}) = \tilde{A}_{c0} - \tilde{k}_{ca}(\tilde{C})$ ,  $\tilde{B}_c(\tilde{C}) = \tilde{B}_{c0} - \tilde{k}_{cb}(\tilde{C})$ .

Здесь  $\tilde{A}_{c0}, \tilde{B}_{c0}$  и  $\tilde{A}_{p0}, \tilde{B}_{p0}$  – коэффициенты диаграммы деформирования неповрежденного бетона;  $\tilde{k}_{ca}, \tilde{k}_{cb}$  и  $\tilde{k}_{pa}, \tilde{k}_{pb}$  – коэффициенты, учитывающие деструктивное влияние хлоридов, то есть коэффициенты  $A_c, B_c, A_p, B_p$  и концентрация хлоридсодержащей среды  $C$  полагаются случайными величинами. Зависимость (1) учитывает также нелинейность деформирования и неодинаковую сопротивляемость бетона растяжению и сжатию.

Диаграмма деформирования арматуры с учетом ее случайных свойств принимается в виде:

$$\tilde{\sigma}_s = \begin{cases} \tilde{E}_s \varepsilon, & \sigma < \tilde{\sigma}_T \\ \tilde{\sigma}_T, & \sigma \geq \tilde{\sigma}_T \end{cases}, \quad (2)$$

где  $E_s$  – модуль упругости стали;  $\sigma_T$  – предел текучести;  $\sigma_s$  – напряжения;  $\varepsilon$  – деформации.

Модель воздействия хлоридсодержащей среды включает модель проникания среды в балку, зависимость механических характеристик бетона от параметров среды в объеме балки и модель коррозии арматуры. Предполагается, что хлоридсодержащая среда проникает в конструктивный элемент размытым фронтом [2] и в момент времени  $t_j$  профиль проникания хлоридов в бетон описывается случайной функцией  $\tilde{C}(\tilde{X}_1, \dots, \tilde{X}_n; t_j)$ . Арматура начинает корродировать при достижении у ее поверхности критической концентрации хлоридов  $C_{кр}$ .

Модель коррозионного износа арматуры принимается в виде:

$$\begin{cases} \delta = 0, & t < t_{inc} \\ \delta = k(t - \tilde{t}_{inc})^n, & t \geq t_{inc} \end{cases} \quad (3)$$

где  $\delta$  – глубина коррозионного поражения;  $k$ ,  $n$  – коэффициенты, которые являются случайными величинами.

Площадь поперечного сечения арматуры является функцией, зависящей от случайных параметров:

$$\tilde{F}_s(t) = f(\tilde{d}_0; \tilde{k}; \tilde{n}; \tilde{t}_{inc}; t),$$

где  $\tilde{d}_0$  – диаметр металлической арматуры до начала коррозии;  $\tilde{k}$ ,  $n$  – параметры, учитывающие вид агрессивной среды;  $\tilde{t}_{inc}$  – инкубационный период, продолжительность которого зависит от кинетики проникания хлоридсодержащей среды в бетон защитного слоя.

В качестве модели наступления предельного состояния принимается условие достижения деформациями в бетоне или арматуре своих предельных значений, то есть процессы трещинообразования в бетоне не рассматриваются.

Исследование проводили для разрезной балки, на которую действует равномерно распределенная нагрузка интенсивностью  $q$ . Размеры сечения балки и характер ее армирования показаны на рис. 1.

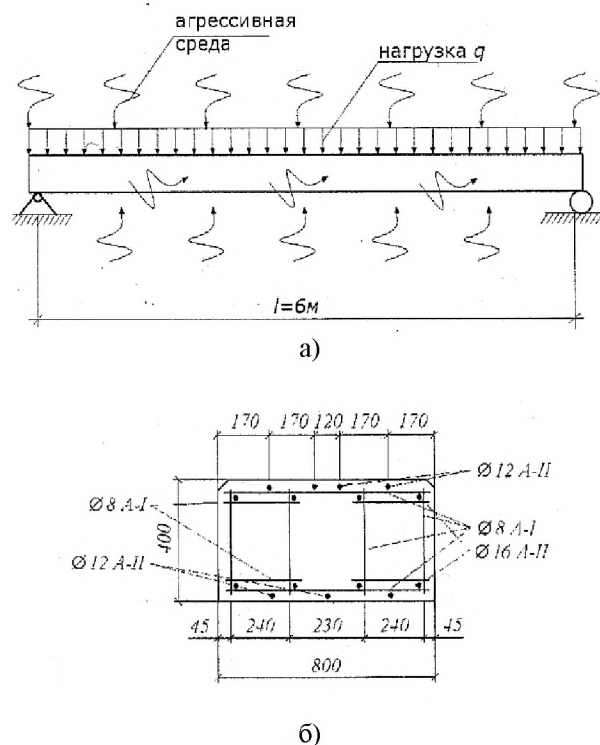


Рис. 1

Считалось, что проникание хлоридсодержащей среды в балку происходит со всех сторон и одинаково по всей длине. С использованием экспериментальных данных были определены значения коэффициентов описанных моделей (табл. 1 – характеристики расчетных случайных параметров), при этом ввиду отсутствия надежной информации принималось, что все они имеют нормальное распределение.

Предельные деформации растяжения и сжатия  $\epsilon_{np,p}^b$ ,  $\epsilon_{np,c}^b$  имеют значения  $2 \cdot 10^{-3}$  и  $0,5 \cdot 10^{-3}$  соответственно. Нагрузка  $q$ , при которой происходит разрушение не поврежденной хлоридами балки, равна 26,6 кН/м. Интегродифференциальное уравнение изгиба балки имеет вид:

$$\frac{\partial^2}{\partial x^2} \left( D \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \right) = q(x,t) + \frac{\partial^2 (GN_{сеч})}{\partial x^2}, \quad (4)$$

а изгибающий момент в сечении балки определяется выражением:

$$M(x,t) = D\chi + GN(x,t).$$

Здесь  $\chi = -\frac{\partial^2 w}{\partial x^2}$  – кривизна;  $w$  – прогиб;

$D, G$  – жесткостные характеристики;  $N_{сеч}$  –

продольное усилие. Все эти величины являются интегральными функциями прогиба и концентрации среды.

Т а б л и ц а 1

Параметры	Среднее значение	Коэффициент вариации	Закон распределения	Коэффициенты корреляции
$A_{p0}, \text{Па}$	$0,810 \cdot 10^{10}$	0,13	Н	$\rho(A_{p0}, B_{p0}) = 1$
$B_{p0}, \text{Па}$	$10,800 \cdot 10^{15}$	0,13	Н	
$A_{p1}, \text{Па}$	$0,561 \cdot 10^{10}$	0,13	Н	
$A_{p1}, \text{Па}$	$7,480 \cdot 10^{15}$	0,13	Н	$\rho(A_{p1}, B_{p1}) = 1$
$A_{c0}, \text{Па}$	$4,181 \cdot 10^{10}$	0,11	Н	$\rho(A_{c0}, B_{c0}) = 1$
$B_{p0}, \text{Па}$	$3,484 \cdot 10^{15}$	0,11	Н	
$A_{c1}, \text{Па}$	$2,855 \cdot 10^{10}$	0,11	Н	
$B_{c1}, \text{Па}$	$2,379 \cdot 10^{15}$	0,11	Н	$\rho(A_{c1}, B_{c1}) = 1$
$D, \text{м}^2/\text{год}$	$3,679 \cdot 10^{-5}$	0,07	Н	-
$C_s, \text{кг}/\text{м}^3$	10,09	0,07	Н	-
$C_{\text{крит}}, \text{кг}/\text{м}^3$	0,83	0,125	Н	-
$E, \text{Па}$	$214000 \cdot 10^6$	0,07	Н	$r(\sigma_T, E) = 1$
$\sigma_T, \text{Па}$	$450,0 \cdot 10^6$	0,07	Н	
$a_3, \text{м}$	0,045	0,10	Н	-
$k_s, \text{м}/\text{год}$	0,0003	0,15	Н	-
$h, \text{м}$	0,4	0,015	Н	-
$b, \text{м}$	0,8	0,015	Н	-
$d_0, \text{мм}$	16	0,03	Н	-
$q = 0,7q_{\text{пр}}, \text{кН}/\text{м}$	0,7·26,6	0,10	Усеченное Н	-

Моделирование поведения железобетонной балки со случайными параметрами проводили методом статистического моделирования. В начальный момент  $t=0$  концентрация хлоридов в балке  $C=0$ . Сначала определяли кривизну балки  $\chi$  и отклонение нейтральной оси балки от срединной  $z_0$ , а по ним находили поля напряжений и деформаций в арматуре и бетоне. На следующем этапе расчета устанавливали концентрацию хлоридсодержащей среды  $C=10,09 \text{ кг}/\text{м}^3$  на поверхностях балки и полагали, что дальнейшее продвижение среды внутрь балки происходит размытым фронтом. На следующем этапе рассматривали пошаговое деформирование балки с течением времени и в каждый момент времени находили распределение поля концентрации хлоридов по сечению, а по нему устанавливали распределение полей значений коэффициентов диаграммы деформирования (1) бетона, пораженного хлоридами. С использованием модели коррозионного износа на каждом шаге определяли площадь оставшегося сечения арматуры. С использованием

найденных выражений жесткостных характеристик решали уравнение (4) и находили соответствующие значения кривизны  $\chi$  и величины  $z_0$ , по которым вычисляли напряжения и деформации в заданных точках сечения. В этих заданных точках на каждом шаге расчета проверяли выполнение условий наступления предельного состояния.

Расчет выполняли с помощью специально разработанного программного комплекса методом сеток, из-за симметрии сечения балки рассматривали половину поперечного сечения. Густота сетки была принята 24 высоте и 24 по половине ширины, причем в зоне расположения арматуры сетка была более густой. Объем генерируемой последовательности случайных чисел при расчете долговечности балки при уровне значимости  $\gamma=0,9$  составил от 8 000 до 12 000.

Результаты расчета напряженно-деформированного состояния железобетонной балки, подвергающейся действию

нагрузки величиной  $q=0,7q_{пр}$  и действию хлоридсодержащей среды по всему периметру сечения, представлялись в виде эпюр концентрации хлоридов, напряжений и деформаций по сечению, степени коррозии арматуры; при этом значения параметров соответствовали их математическим ожиданиям.

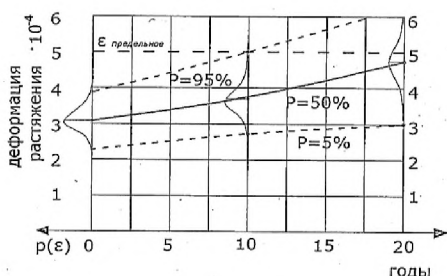


Рис. 2

На рис. 2 приведен график кинетики деформации балки в растянутой зоне с различной обеспеченностью. Кривая с обеспеченностью  $P=50\%$  соответствует кинетике деформации, рассчитанной для значений параметров, равных их математическим ожиданиям. Кривая с 5%-ной обеспеченностью соответствует наиболее благоприятному сочетанию входных параметров (наименьшей нагрузке, лучшим характеристикам прочности). Наихудшему сочетанию значений входных параметров соответствует кривая с обеспеченностью 95%.

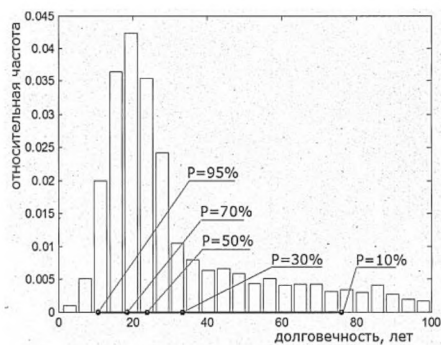


Рис. 3

На рис. 3 приведена гистограмма долговечности рассчитываемой конструкции при нагрузке  $q=0,7q_{пр} = 18,62$  кН/м с коэффициентом вариации  $V_q=0,1$  и действии хлоридсодержащей среды. Здесь точки внизу гра-

фика соответствуют долговечности с обеспеченностью  $P=95\%, 70\%, 50\%, 30\%$  и  $10\%$ , соответствующей срокам 9,7 лет; 17,5 лет; 24,6 года; 32,8 года и 65,6 лет.

Для того, чтобы оценить значимость случайных параметров процесса на разброс долговечности железобетонной балки, расчет долговечности балки проводили при отдельном учете случайных свойств каждого параметра: например, расчет долговечности производили при детерминированных значениях всех параметров, равных их математическим ожиданиям, за исключением нагрузки, которая задавалась случайной.



Рис. 4

На рис. 4 (влияние случайных параметров на долговечность балки) приведены интервалы долговечности для рассчитанных случаев. Там же приведен интервал долговечности для случая учета случайных свойств всех учитываемых параметров, который, как и должно быть, оказался самым большим.

## ВЫВОДЫ

1. Анализ данных о повреждениях железобетонных балок свидетельствует о том, что частой причиной повреждения является неравномерность толщины защитного слоя и влияние агрессивной среды. Причем деградация бетона во времени неоднородна по объему железобетонных конструкций, а процессы проникания хлоридов, деградации бетона, коррозионного поражения арматуры имеют вероятностный характер, и под влиянием хлоридсодержащей среды разброс механических характеристик бетона увеличивается. При этом может оказаться, что математическое ожидание ха-

рактических останется тем же, но увеличится именно разброс характеристик.

2. Приведенная в работе обобщенная модель деформирования с учетом вероятностного характера параметров модели применена к расчету железобетонной балки прямоугольного сечения. С помощью метода статистического моделирования проведена оценка долговечности железобетонной балки с учетом вероятностного характера различных параметров балки и агрессивной среды. Как оказалось, наиболее значительное влияние на напряженное состояние и долговечность железобетонной конструкции оказывают (в порядке убывания степени влияния): действующая нагрузка; свойства бетона, характер агрессивной среды, проявляющийся через коэффициент диффузии среды в бетоне.

3. К сожалению, вероятностный расчет несущих железобетонных конструкций предприятий текстильной промышленности во многих случаях затруднителен, что объясняется не столько сложностью выполнения статистического моделирования с использованием вероятностных моделей деформирования, сколько отсутствием достаточного количества экспериментальных данных для идентификации моделей. Поэтому возникает весьма важная задача проведения лабораторных и натурных экспериментальных исследований на предприятиях текстильной промышленности с целью получения и накопления необходимого набора экспериментальных данных.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Овчинников И.Г., Раткин В.В., Дядькин Н.С. Модель деформирования стойки из железобетона, работающей в хлоридсодержащей среде // Изв. вузов. Строительство. – 2000, № 6. С.4...10.

2. Овчинников И.Г., Раткин В.В., Землянский А.А. Моделирование поведения железобетонных элементов конструкций в условиях воздействия хлоридсодержащих сред. – Саратов: СГТУ, 2000.

3. Овчинников И.Г., Раткин В.В., Кононович В.И. Расчетная оценка влияния хлоридсодержащей среды на напряженно-деформированное состояние сжимаемых элементов мостовых конструкций // Транспортное строительство. – 2001, № 6. С.21...24.

4. Овчинников И.Г., Раткин В.В., Гарибов Р.Б. Работоспособность сталежелезобетонных элемен-

тов конструкций в условиях воздействия хлоридсодержащих сред. – Саратов: Изд-во СГУ, 2002.

5. Овчинников И.Г., Кривцов А.В., Скачков Ю.П. Влияние хлоридсодержащих сред на прочность и долговечность пластин на упругом основании. – Пенза: Изд-во ПензГАСА, 2002.

6. Thoft-Christensen P. Deterioration of concrete structures. In: Proceedings of first international conference on bridge maintenance, safety and management. – Barselona, 2002.

7. Biondini F. & Vergani M. Damage modeling and nonlinear analysis of concrete bridges under corrosion. In: Biondini & Frangopol, editors. Bridge Maintenance, Safety, Management, Resilience and Sustainability. – London. Taylor & Francis Group, 2012. P.209...210.

8. Frangopol D.M., Akiyama M., H. Matsuzaki H. Life-Cycle Reliability of RC Bridge Piers under Seismic and Airborne Chloride Hazards. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, John Wiley & Sons, Ltd. – Vol. 40, № 15, 2011. P. 1671...1687.

9. Frangopol D.M., Akiyama M., Suzuki M. Integration of the Effects of Airborne Chlorides into Reliability-Based Durability Design of R/C Structures in a Marine Environment. Structure and Infrastructure Engineering, Taylor & Francis. – Vol. 8, №2, 2012. P.125...134.

10. Frangopol D.M., Akiyama M., H. Matsuzaki H. Reliability-Based Durability Design and Service Life Assessment of Concrete Structures in an Aggressive Environment. In: Maintenance and Safety of Aging Infrastructure (Edited by D.M. Frangopol and Y. Tsompanakis), London, CRC Press / Balkema, Taylor & Francis Group. – 2014. P. 1...26.

#### REFERENCES

1. Ovchinnikov I.G., Ratkin V.V., Djad'kin N.S. Model' deformirovaniya stojki iz zhelezobetona, rabotajushhej v hloridsoderzhashhej srede // Izv. vuzov. Stroitel'stvo. – 2000, № 6. S.4...10.

2. Ovchinnikov I.G., Ratkin V.V., Zemljanskij A.A. Modelirovanie povedeniya zhelezobetonnyh jelementov konstrukcij v uslovijah vozdejstvija hloridsoderzhashhij sred. – Saratov: SGTU, 2000.

3. Ovchinnikov I.G., Ratkin V.V., Kononovich V.I. Raschetnaja ocenka vlijaniya hloridsoderzhashhej srede na naprjazhenno-deformirovanное sostojanie szhimajemyh jelementov mostovyh konstrukcij // Transportnoe stroitel'stvo. – 2001, № 6. S.21...24.

4. Ovchinnikov I.G., Ratkin V.V., Garibov R.B. Rabotosposobnost' stalezhelezobetonnyh jelementov konstrukcij v uslovijah vozdejstvija hloridsoderzhashhij sred. – Saratov: Izd-vo SGU, 2002.

5. Ovchinnikov I.G., Krivcov A.V., Skachkov Ju.P. Vlijanie hloridsoderzhashhij sred na prochnost' i dolgovechnost' plastin na uprugom osnovanii. – Penza: Izd-vo PenzGASA, 2002.

6. Thoft-Christensen P. Deterioration of concrete structures. In: Proceedings of first international conference on bridge maintenance, safety and management. – Barselona, 2002.

7. Biondini F. & Vergani M. Damage modeling and nonlinear analysis of concrete bridges under corrosion. In: Biondini & Frangopol, editors. Bridge Maintenance, Safety, Management, Resilience and Sustainability. – London. Taylor & Francis Group, 2012. P.209...210.

8. Frangopol D.M., Akiyama M., H. Matsuzaki H. Life-Cycle Reliability of RC Bridge Piers under Seismic and Airborne Chloride Hazards. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, John Wiley & Sons, Ltd. – Vol 40, № 15, 2011. P. 1671...1687.

9. Frangopol D.M., Akiyama M., Suzuki M. Integration of the Effects of Airborne Chlorides into Reliability-Based Durability Design of R/C Structures in a Marine Environment. Structure and Infrastructure Engineering, Taylor & Francis. – Vol. 8, №2, 2012. P.125...134.

10. Frangopol D.M., Akiyama M., H. Matsuzaki H. Reliability-Based Durability Design and Service Life Assessment of Concrete Structures in an Aggressive Environment. In: Maintenance and Safety of Aging Infrastructure (Edited by D.M. Frangopol and Y. Tsompanakis), London, CRC Press / Balkema, Taylor & Francis Group. – 2014. P. 1...26.

Рекомендована кафедрой транспортного строительства СГТУ имени Гагарина Ю.А. Поступила 25.09.17.

---