

ОЦЕНКА ДОЛГОВЕЧНОСТИ КОРРОЗИОННО-ПОВРЕЖДЕННЫХ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ НА БАЗЕ ДИАХРОННОЙ МОДЕЛИ ДЕФОРМИРОВАНИЯ

Никитин С.Е.¹

¹ЗАО «Гипробум-Пеуры», Санкт-Петербург, Россия (196084, Санкт-Петербург, Лиговский пр., 226), e-mail: stanislav.nikitin@povyry.com

Отмечается актуальность разработки методологически единых подходов к оценке эксплуатационных и предельных состояний железобетонных элементов при одновременном воздействии силовых нагрузок и агрессивных сред. Предлагается диахронная модель деформирования коррозионно-поврежденных изгибаемых железобетонных элементов с макротрещинами (швами). Приводятся результаты численных экспериментов. Проводится верификация предлагаемой модели с лабораторными экспериментами различных авторов. Обсуждается возможность прямой оценки проектного и остаточного ресурса элементов. Предлагается графоаналитическая методика определения проектного ресурса вновь возводимых и остаточный ресурс эксплуатируемых изгибаемых железобетонных конструкций. Рассчитан срок службы ригеля серии 1.020-1/87, работающего в агрессивной промышленной среде. Выявлено, что даже при нормативных показателях рабочей среды происходит существенное снижение несущей способности рассматриваемого ригеля – до 12,4 % за 50 лет. Приводится расширенная номенклатура наступления предельного состояния.

Ключевые слова: железобетонные конструкции, агрессивное воздействие, долговечность.

ESTIMATION OF CORROSION-DAMAGED CONCRETE CONSTRUCTION DURABILITY BASED ON DIACHRONIC DEFORMATION MODEL

Nikitin S.E.¹

¹CJSC Giprobum-Povyry, Saint-Petersburg, Russia (196084, Saint-Petersburg, Ligovskiy st., 226), e-mail: stanislav.nikitin@povyry.com

In the publication the necessity of development of methodologically equal approaches to estimation of service and limit state of reinforced concrete elements is marked with combined mixing of influence of power loadings and corrosion environment. The diachronic deformation model of the corrosion-damaged bended reinforced concrete elements with macrocracks (joint) is offered. Results of numerical experiments are shown. Verification with laboratory experiments of different authors is developed. Possibility of a direct estimation of a design residual life of elements is discussed. Graphical-analytical methodic of project or remaining durability calculation of bended concrete constructions is suggested. Durability of 1.020-1/87-series beam in industrial corrosion conditions is estimated. It is shown that even with regulatory performance work environment is significantly reduced carrying capacity of the considered latch - up to 12.4% in 50 years. An extended range of limit condition is offered.

Key words: reinforced concrete, aggressive influence, durability.

Разрушающему воздействию агрессивных атмосферных и производственных сред подвергается большинство строительных конструкций. Из-за необходимости проведения ремонтов и усиления конструкций ущерб от этих воздействий превышает 5 % общемирового валового дохода. В Российской Федерации указанные потери оцениваются в настоящее время в 20–25 млрд рублей ежегодно. Парирование этой глобальной угрозы затруднено, в том числе, и по причине неполноты соответствия современным вызовам имеющейся научно-методической базы.

Целью настоящего исследования является разработка инженерно-ориентированного метода оценки эксплуатационного состояния, несущей способности, а также проектного или остаточного ресурса коррозионно-поврежденных изгибаемых железобетонных элементов.

Диахронная модель рассматривает напряженно-деформированное состояние изгибаемого железобетонного элемента с симметричным в плоскости изгиба поперечным сечением площадью S и двойным армированием. В случае поперечного изгиба предполагается превалирующей роль изгибающего момента M и продольного усилия N при пренебрежимом влиянии перерезывающих сил. Образование и развитие системы нормальных трещин в растянутой зоне бетона происходит при достижении момента трещинообразования M_{cr} . Преимущественно трещины располагаются на примерно одинаковом расстоянии – $L_{cr} = 2L$ одна от другой, имеют почти одинаковую глубину h_{cr} и ширину раскрытия a_{cr} (Рис. 1).

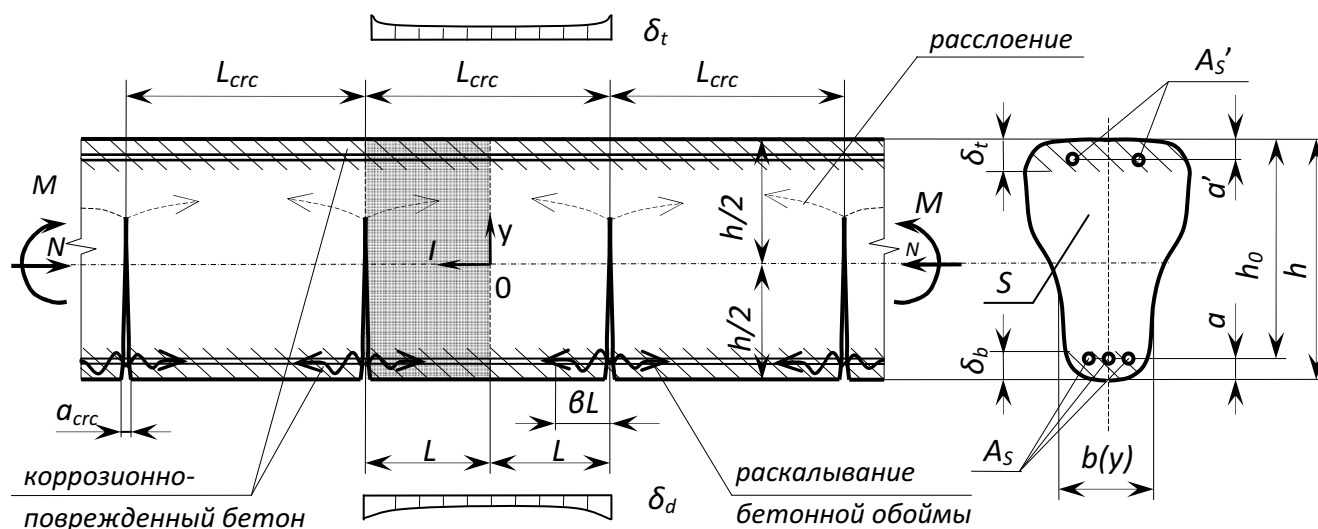


Рис. 1. Схема элемента при силовых и коррозионных воздействиях

Далее изгибаемый элемент рассматривается как детерминировано-регулярная контактная система деформируемых блоков, разделенных равноотстоящими трещинами. Блоки взаимодействуют в области сохраняющего сплошность бетона, а также посредством сжатой A'_s и растянутой A_s стержневой арматуры. При этом напряженно-деформированное состояние нетрещиностойкого элемента является циклически симметричным относительно характерных сечений двух типов: с трещинами ($l=\pm L$) и равноудаленных от смежных трещин-близнецов ($l=0$). При таком подходе проблема определения напряженно-деформированного состояния элемента сводится к решению задачи для симметричной половины $S \times L$ характерного блока [2, 3].

Основными факторами негативного влияния агрессивных воздействий на железобетонный элемент являются:

- деградация прочностных и деформационных свойств сжатого и растянутого бетона;
- коррозия арматурных стержней;
- повреждения сцепления растянутой арматуры с бетоном;

Изменение геометрических и механических параметров бетона зависит от направленности агрессивного воздействия – с боковых граней сечения δ_s , со стороны сжатой δ_t и / или растянутой зоны δ_b , а также вида и интенсивности агрессии. Изменчивость свойств бетона по глубине схематизируется трехзонной моделью:

- полностью разрушенный бетон (уменьшение начальных габаритов сечения);
- слой частично-поврежденного бетона, в пределах которого деформационные (E_b , ϵ_{bu} , ϵ_{btR}) и прочностные (R_b , R_{bt}) характеристики линейно изменяются – от нулевого (минимального) до номинального значения;
- неповрежденный бетон, сохранивший номинальные характеристики.

При отсутствии полностью разрушенного бетона пониженные характеристики краевых волокон бетона эксплуатируемых сооружений устанавливаются по результатам технического обследования. Для проектируемых сооружений аналогичные параметры определяются в соответствии с принятыми моделями деградации (например, диссипативная модель В. М. Бондаренко, степенные функции А. И. Попеско [4]).

Одновременно, за счет снижения начального модуля деформации E_b , сопротивлений R_b , R_{bt} и базовых деформаций ϵ_R и $\epsilon_{b ul}$ в пределах коррозионно-поврежденного слоя трансформируются исходные диаграммы деформирования сжатого и растянутого бетона (Рис. 2).

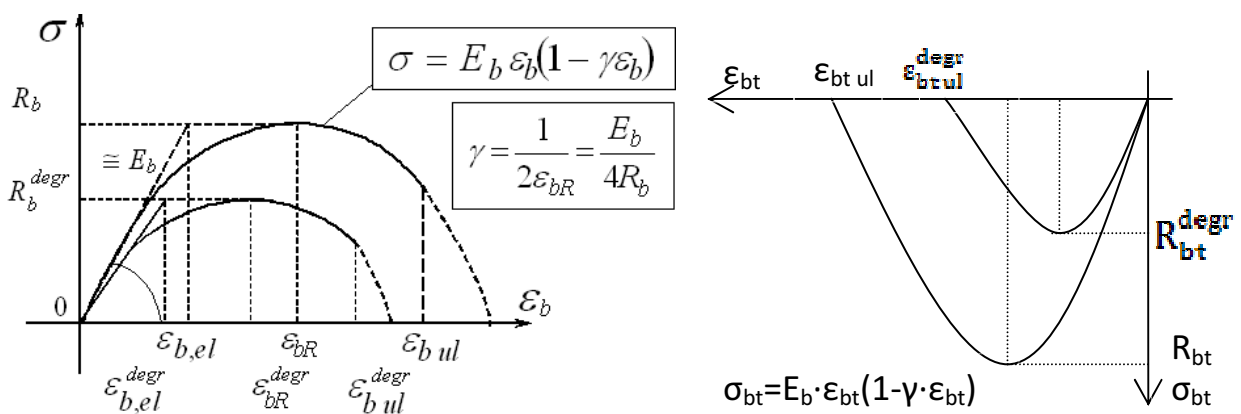


Рис. 2. Трансформация диаграмм деформирования бетона при сжатии и растяжении

Изменение модуля деформации бетона $E_{b,ar,c}$ описывается степенной функцией с коэффициентами аппроксимации, полученной методами регрессионного анализа:

$$E_{b,ar,c} = E_b \cdot a_E \cdot t^{b_E} \quad (t - \text{время воздействия, } a_E, b_E - \text{эмпирические коэффициенты}).$$

Равномерная и питтинговая коррозия металла отражается независимым либо согласованным (в зависимости от направленности и характера агрессивного воздействия) уменьшением исходных поперечных сечений растянутой A_s и сжатой A'_s арматуры, с учетом неравномерности коррозии арматуры по длине блока.

Учитывается влияние уровня напряжений и вида напряженного состояния на скорость проникновения агрессивных веществ в тело бетона. Так, усиленная деструкция бетона имеет место в сечении с трещиной. За счет прямого доступа агрессивных сред через раскрытую трещину здесь формируется и локальный максимум потери площади растянутой арматуры (Рис. 1).

Коррозионные повреждения контактной системы «арматура-бетон» обусловлены суперпозицией избыточного давления продуктов коррозии арматуры, превышающих первоначальный объем металла в 2–4 раза, и расклинивающего эффекта при выходе профилированного арматурного стержня из бетона. Сложный физический процесс моделируется путем трансформации закона сцепления « $\tau_{сц} - g$ » и снижения длины активного сцепления.

Локальный закон сцепления трансформируется в соответствии с [6] за счет введения дополнительных смещений арматуры относительно бетона $\Delta g = m \cdot \Delta r_s$, где Δr_s – глубина коррозии арматуры, m – эмпирический коэффициент. При этом исходный график функции « $\tau_{сц} - g$ » как жесткое целое смещается в отрицательную область оси абсцисс – на Δg .

При проведении практических расчетов критические распорные и касательные напряжения определялись по упрощенным зависимостям [5].

Критерием образования вторичных продольных трещин, исходящих из вершин поперечных и обуславливающих прогрессирующее расслоение элемента, принимается $\sigma_{spl} = R_{br}$. Откалывающие напряжения- σ_{spl} (Рис. 3) определяются как:

$$\sigma_{spl} = k \cdot \sigma_b, \quad k = f\left(\frac{x}{h}\right).$$

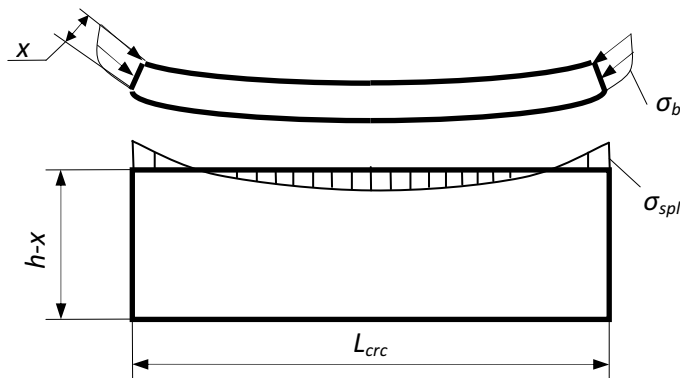


Рис. 3. Расчетная схема расслоения элемента

Ширину раскрытия пионерной трещины

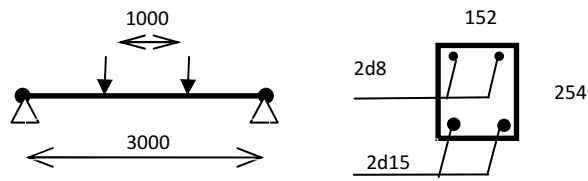
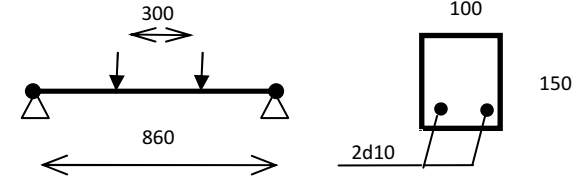
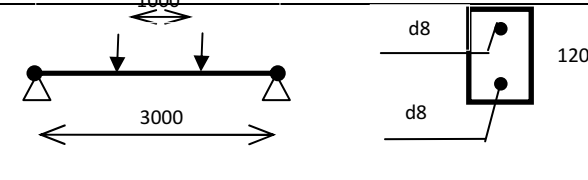
a_{crc} и шаг трещин L_{crc} определяются в соответствии с мультиплексной моделью сцепления Gambarova P. G.:

$$\alpha_{crc} = \frac{1}{2} \cdot \frac{E_s \cdot d_s \cdot \sqrt{\frac{R_s}{E_s}}}{6 \cdot \tau_{max}} \cdot \left(\sqrt{\varepsilon_s} - \frac{2 \cdot \tau_{max}}{E_s \cdot d_s \cdot \sqrt{\frac{R_s}{E_s}}} \cdot L_{crc} \right)^3 \quad (1)$$

$$L_{crc} = \frac{(\sqrt{\varepsilon_s} - \sqrt{\varepsilon_s^{lim}}) \cdot E_s \cdot d_s \cdot \sqrt{\frac{R_s}{E_s}}}{2 \cdot \tau_{max}} \quad (2)$$

Выполнена верификация предлагаемой диахронной модели с лабораторными испытаниями разных авторов: Maaddawy T. E., Mangat P. S. и Попеско А.И [4] (Таблица 1).

Таблица 1. Схемы экспериментов

Элемент	Схема эксперимента	Глубина повреждения бетона, мм	Снижение армирования	
			δ_d , мм	ΔA_s , %
Maaddawy T. E., Soudki K., Topper T.				
Контрольный		-	-	-
CS-50		-	0,75	9,7
CS-110		-	1,2	15,4
CS-210		-	1,82	22,8
CS-310		-	2,47	30,0
Включение 2,25 % хлористых солей в состав бетона, ускорение гальваническим методом				
Mangat P. S.				
Контрольный		-	-	-
В 1,25 %		10	0,25	5,0
В 2,50 %		20	0,5	9,7
В 3,75 %		30	0,75	14,5
В 5,00 %		45	1,0	19,0
В 7,50 %		60	1,5	27,8
В 10,00 %		65	2,0	36,0
Попеско А.И				
Контрольный		-	-	-
HCl 180 с		9	-	-
HCl 180 ср		9	-	-
HCl 180 в		9	-	-
HCl 360 с		14	-	-
HCl 360 ср		14	-	-
HCl 360 в		14	-	-
HCl 720 с		23	-	-
HCl 720 ср		23	-	-
HCl 720 в		23	-	-
H ₂ SO ₄ 180 в		2	-	-
H ₂ SO ₄ 360 в		4	-	-
H ₂ SO ₄ 720 в		7,1	-	-

Результаты лабораторных экспериментов и расчетов по диахронной модели сведены в Таблица 2. Отклонение результатов расчетов разрушающего изгибающего момента M_{ult} не превышают 12 %, среднеквадратическое отклонение составило 8,9 %. Отклонение результатов расчетов прогиба f находится в пределах 30 %, среднеквадратическое отклонение составило 22,4 %. Важно отметить, что фактический и прогнозируемый по диахронной модели вид разрушения совпадают. Ввиду хорошего соответствия теоретических и фактических результатов можно рекомендовать диахронную модель для применения в инженерной практике.

Таблица 2. Сравнение экспериментальных и теоретических результатов

Элемент	Экспериментальные результаты		Результаты расчетов по СП 52-101-2003		Результаты расчетов по диахронной модели		$\Delta M = \frac{[M_1] - [M_2]}{[M]}$	$\Delta f = \frac{[f_1] - [f_2]}{[f]} \cdot 100$	Вид разрушения	Длительность воздействия (с коэф. ускорения) лет
	M_{ult} , кН·м	f , мм	M_{ult} , кН·м	f , мм	M_{ult} , кН·м	f , мм				
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Maaddawy T. E., Soudki K., Topper T.										
Контроль	37,50	15,63	44,01	22,8	36,5	13,21	-2,7	-18,3	текучесть арматуры	0
CS-50	33,04	12,34	-	-	33,3	10,57	0,8	-16,7		н/д
CS-110	32,30	8,93	-	-	31,2	7,86	3,5	-13,6		
CS-210	32,09*	8,41	-	-	28,8	6,69	-11,4*	-25,7		
CS-310	28,43	7,42	-	-	26,15	6,15	8,7	-20,7		
Mangat P. S., Elgarf M. S.										
Контроль	9,1	2,1	9,35	7,82	8,95	2,96	-1,7	29,1	нет данных	0
1,25 %	8,54	2,0	-	-	8,60	2,75	0,7	27,3		0,54
2,50 %	8,12	1,9	-	-	8,15	2,53	0,4	24,9		1,08
3,75 %	7,28	1,8	-	-	7,35	2,31	1,0	22,1		1,62
5,00 %	6,58	1,7	-	-	6,45	2,18	-2,0	22,0		2,16
7,50 %	4,72	1,5	-	-	5,20	1,91	9,2	21,5		3,24
10,00 %	3,64	1,3	-	-	3,75	1,71	2,9	24,0		4,32
Попеско А. И.										
Контроль	2,818	3,64	2,89	4,14	2,74	3,6	3,6	-7,1	нет данных	0
HCl 180 с	2,713	4,74	-	-	2,71	3,36	4,7	-41,1		0,5
HCl 180 ср	2,960	3,46	-	-	2,71	3,36	3,5	-3,0		0,5
HCl 180 в	3,010	3,05	-	-	2,65	3,33	3,1	8,4		0,5
HCl 360 с	2,748	3,33	-	-	2,665	3,33	3,3	0,0		1
HCl 360 ср	2,975	2,74	-	-	2,66	3,33	2,7	17,7		1
HCl 360 в	2,844	2,67	-	-	2,6	3,30	2,7	19,1		1
HCl 720 с	2,450	3,84	-	-	2,61	3,30	3,8	-16,4		2
HCl 720 ср	2,800	2,68	-	-	2,605	3,30	2,7	18,8		2
HCl 720 в	2,713	3,17	-	-	2,52	2,75	3,2	-15,3		2
H ₂ SO ₄ 180 в	2,896	2,59	-	-	2,72	3,36	2,6	22,9		0,5
H ₂ SO ₄ 360 в	2,835	2,97	-	-	2,7	3,35	3,0	11,3		1
H ₂ SO ₄ 720 в	2,713	2,43	-	-	2,66	3,33	2,4	27,0		2

Предлагаемая диахронная модель позволяет определить ресурс железобетонных элементов работающих при совместном силовом и коррозионном воздействиях. Решение задачи ведется графо-аналитически в следующей последовательности:

1. В разрешающие уравнения вводятся принятые характеристики бетона и арматуры, габариты сечения.
2. На основании данных об агрессивной среде эксплуатации по реономным моделям деградации бетона и арматуры определяется физико-механические свойства материалов в моменты времени t_1 , t_2 , t_3 и т. д. При ожидаемом сроке службы, например, 50 лет, принимаются $t_1=0$, $t_2=25$, $t_3=50$ годам.
3. Определение напряженно-деформированного состояния элемента и предельного момента $M_{ult 1}$, $M_{ult 2}$, $M_{ult 3}$ и т.д. и всех других параметров оценки наступления предельных состояний во время соответственно – t_1 , t_2 , t_3 и т.д.

По предложенной методике определен срок службы ригеля серии 1.020-1/87, работающего в агрессивной промышленной среде. Выявлено, что даже при нормативных показателях рабочей среды (паров H_2SO_4 до 0,145 мг/л, H_2S до 0,01 мг/л и CS_2 до 0,03 мг/л при относительной влажности 80–85 %) происходит существенное снижение несущей способности рассматриваемого ригеля – до 12,4 % за 50 лет (Рис. 4). Срок службы рассматриваемого ригеля составляет 6,5 лет. Для обеспечения нормативного срока эксплуатации 50 лет рекомендовано применение вторичной защиты.

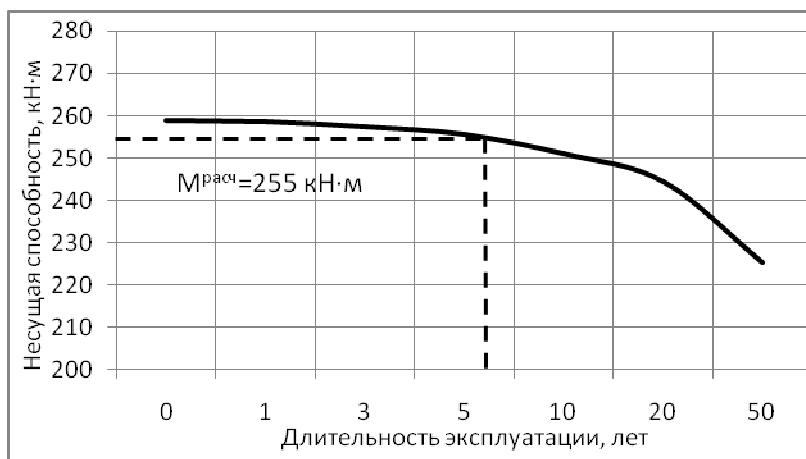


Рис. 4. Прогнозируемая несущая способность ригеля РДП 4.56-70 АШв

Предполагая неизменным характер и интенсивность деградационного воздействия окружающей среды, с помощью диахронной модели деформирования, задаваясь реономными моделями деградации бетона и арматуры, возможно прямое определение проектного ресурса вновь возводимых и остаточный ресурс эксплуатируемых изгибаемых железобетонных конструкций по наступлению следующих предельных состояний:

- достижение растянутой арматурой в трещине предела текучести по условию $\sigma_s = R_s$;

- исчерпание несущей способности сжатого бетона в сечении с трещиной по условиям $\epsilon_b = \epsilon_{bul}$ либо $\sigma_b = R_b$;
- разрушение системы сцепления из условия $\beta = 1$;
- расслоение элементов с образованием и развитием вторичных трещин, исходящих из вершин пионерных трещин, по условию $\sigma_z = R_{bt}$;
- чрезмерность раскрытия трещин $a_{crc} = a_{crc,ult}$.

Важно отметить, что применение такой методики впервые открывает возможность актуального повышения экономической эффективности проектных решений путем обеспечения однородной долговечности железобетонных конструкций с синхронизацией проектного ресурса отдельных зон, элементов и частей зданий и сооружений.

Список литературы

1. Коррозия бетона и железобетона, методы их защиты / В. М. Москвин [и др.]; под общ. ред. В. М. Москвина. – М.: Стройиздат, 1980. – 536 с., ил.
2. Никитин С. Е., Белов В. В. Верификация расчетной модели деформирования коррозионно-поврежденных железобетонных конструкций // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Серия «Наука и образование». – 2011 г. – № 4. – С. 252–258.
3. Никитин С. Е., Белов В. В. Диахронная модель деформирования коррозионно-поврежденных железобетонных элементов с трещинами // Вестник гражданских инженеров СПбГАСУ. – 2011. – № 4. – С. 18-25.
4. Попеско А. И. Работоспособность железобетонных конструкций, подверженных коррозии – СПб.: СПб гос. архит.-строит. ун-т., 1996. – 182 с.
5. Rabczuk T., Belytschko T. Application of particle methods to static fracture of reinforced concrete structures // International Journal of Fracture. – 2006. – № 137. – P. 19–49.
6. Schlune H. Bond of Corroded Reinforcement. Analytical description of the bond-slip response. Chalmers University of Technology. Master`s thesis 2006:107. – Göteborg, Sweden.: 2006. – 85 p.

Рецензенты:

- Белов В. В., д.т.н., главный специалист по железобетонным конструкциям ОАО «Санкт-Петербургский НИПКИ "Атомэнергопроект"», г. Санкт-Петербург.
- Лалин В. В., д.т.н., профессор, зав. каф. СМиТУ ФГБОУ ВПО «СПбГПУ», г. Санкт-Петербург.