

**К ВОЗНИКНОВЕНИЮ ТРЕЩИН В МОДЕЛИ  
ТОЛСТОСТЕННОГО БЕТОННОГО ЦИЛИНДРА  
ПРИ КОРРОЗИИ С УЧЕТОМ ПОРИСТОЙ ЗОНЫ  
НА ГРАНИЦЕ РАЗДЕЛА АРМАТУРЫ И БЕТОНА**

**CRACKS IN THE MODEL  
OF A THICK-WALLED CONCRETE CYLINDER  
DURING CORROSION TAKING INTO ACCOUNT THE POROUS ZONE  
AT THE SECTION BOUNDARY BETWEEN REINFORCEMENT AND CONCRETE**

*А.Г. ТАМРАЗЯН, М.С. МИНЕЕВ*

*A.G. TAMRAZYAN, M.S. MINEEV*

**(Национальный исследовательский Московский  
государственный строительный университет (НИУ МГСУ))**

**(Moscow State University of Civil Engineering (MGSU) National Research University)**

E-mail: tamrazian@mail.ru, geotechnics-eng@yandex.ru

*В работе рассматривается задача моделирования радиального давления от продуктов возникающей коррозии на окружающий арматуру слой бетона с учетом существующей пористой зоны. Для прогнозирования внутреннего радиального давления, вызванного коррозией, требуется определение толщины слоя коррозионных продуктов, диаметра арматуры, потерянной для образования ржавчины вокруг стального арматурного стержня и толщины пористой зоны.*

*Поэтому для оценки влияния коррозии требуются обнаружение коррозии, которое включает возникновение, режимы, стадии и мониторинг, а также оценка коррозионных повреждений, изменения свойств материалов.*

*Внутреннее радиальное давление, вызванное коррозией арматуры, выражено через функцию потери массы. Предполагается, что бетон растрескивается, когда растягивающие напряжения в круговом направлении на каждой части бетонного кольца достигают предела прочности бетона на растяжение. Определено радиальное давление, необходимое для образования трещин в защитном слое бетона.*

*The paper considers the problem of modeling the radial pressure from the products of emerging corrosion onto the concrete layer surrounding the reinforcement, taking into account the existing porous zone. To predict the internal radial pressure caused by corrosion, it is necessary to determine the thickness of the layer of corrosive products, the diameter of the reinforcement lost to form rust around the steel reinforcing bar, and the thickness of the porous zone.*

*Therefore, to assess the effect of corrosion, detection of corrosion is required, which includes the occurrence, modes, stages and monitoring, as well as the assessment of corrosion damage, changes in the properties of materials.*

*The internal radial pressure caused by corrosion of the reinforcement is expressed in terms of the mass loss function. Concrete is assumed to crack when tensile stresses in the circular direction on each part of the concrete ring reach the tensile strength of concrete. The radial pressure necessary for the formation of cracks in the protective layer of concrete is determined.*

**Ключевые слова: коррозия арматуры, радиальное давление, трещины, толстостенный бетонный цилиндр, пористая зона.**

**Keywords: reinforcement corrosion, radial pressure, cracks, thick-walled concrete cylinder, porous zone.**

В течение жизненного цикла железобетонной конструкции могут быть выявлены многочисленные процессы повреждения, которые значительно влияют на долговечность и, следовательно, на срок службы конструкции.

Железобетонные конструкции имеют высокие показатели надежности и долговечности, но, тем не менее, существуют деградиационные процессы, которые могут привести к их разрушению [1], [5], [11], [12], [15].

В действующих строительных нормах [8] и других работах [10] установлены требования к расчетам по прочности, деформативности и трещиностойкости железобетонных конструкций без дефектов. Однако такие повреждения, как снижение прочности материалов, местные повреждения и разрушения бетона, коррозия арматуры, нарушение сцепления арматуры с бетоном, чрезмерное раскрытие трещин, должны быть определены на основании натурных обследований и испытаний [2], [9].

Коррозия арматурной стали – одно из самых распространенных повреждений железобетонных конструкций различных перекрытий в эксплуатационный период.

Когда сталь корродирует в бетоне, поверхностный слой стали уничтожается, и по ее периметру образуется слой ржавчины. Слой ржавчины, образующийся в результате реакций, занимает больший объем, чем слой разрушенной стали. Увеличение объема создает высокие давления, которые воздействуют на окружающий бетон и приводят к растрескиванию и отколу. Это, в свою очередь, создаст больше контактных площадок для доступа кислорода, влаги и других агрессивных химических веществ, которые дополнительно способствуют коррозии. Таким образом, коррозия может привести к повреждению стали, повреждению бетона и разъединению стали и бетона.

Следовательно, для оценки влияния коррозии требуются:

– обнаружение коррозии стали в бетоне, которое включает возникновение, режимы, стадии и мониторинг;

– оценка коррозионных повреждений, основных типов повреждений, таких как потери стали и бетона, их разъединение и изменения их свойств. Наконец, определяется соответствующее состояние от повреждения, если можно оценить или спрогнозировать скорости коррозии и потери коррозии на основе доступной информации.

Был проведен ряд экспериментальных исследований для определения критического количества коррозии, необходимой для растрескивания защитного слоя бетона, для определения параметров, оказывающих существенное влияние на это количество, и для получения простых эмпирических моделей для его оценки [14]. Критическое количество коррозии с точки зрения глубины проникновения было выражено как функция только геометрических параметров.

Был проведен также ряд численных исследований коррозионного растрескивания бетона с использованием конечных элементов (МКЭ), например, [6], [13], [17]. В большинстве этих исследований использовались различные двумерные модели (плоская деформация) вместе с подходом модели размытой трещины для описания нелинейного поведения и растрескивания бетона. Однако эти модели требуют для вычисления большего расхода времени. Кроме того, в большинстве из них не учитывались такие факторы, как диффузия продуктов коррозии в бетоне и изменение скорости коррозии. В [16], пользуясь этим несоответствием численных и экспериментальных результатов, исследовали толщину пористой зоны вокруг арматурных стержней, а также количество продуктов коррозии, проникающих в трещины. Во многих чис-

ленных исследованиях расширяющее поведение продуктов коррозии моделировалось путем применения или равномерного внутреннего давления, или радиальных смещений [3]. Эти подходы не представляют правильное напряженно-деформированное состояние в бетоне вокруг корродирующего стержня.

Учитывая, что бетон вокруг стержня представляет собой толстостенный бетонный цилиндр из однородного материала, радиальное давление  $P_{кор}$  для создания смещения бетона  $\delta_c$  необходимо приспособить увеличенный объем, так как сталь превращается в ржавчину [7]:

$$\delta_c = \frac{a}{E_1} \left[ \frac{a^2 + b^2}{b^2 - a^2} + \nu \right] P_{кор}, \quad (1)$$

где  $\delta_c$  – внутреннее радиальное смещение;  $P_{кор}$  – соответствующее внутреннее радиальное давление;  $E_1$  – эффективный модуль упругости бетона;  $a$  – внутренний радиус цилиндра;  $b$  – внешний радиус цилиндра;  $\nu$  – коэффициент Пуассона бетона.

Модуль упругости при длительной нагрузке определяется формулой:

$$E_1 = \frac{E_b}{1 + \varphi_{cr}}, \quad (2)$$

где  $E_b$  – начальный модуль упругости бетона;  $\varphi_{cr}$  – коэффициент ползучести бетона.

Предполагая, что на границе раздела "сталь-бетон" имеется пористая зона, продукты коррозии должны сначала заполнить эту зону, прежде чем их расширение начнет создавать давление на окружающий бетон.

Для этого введем следующее обозначение:

$$D'_0 = D_0 + 2\delta_0,$$

где  $D_0$  – диаметр арматурного стержня;  $\delta_0$  – толщина пористой зоны;  $a = D_0/2$  и  $b = X_{zc} + D_0/2$ , где  $X_{zc}$  – толщина защитного слоя бетона.

С учетом этого уравнение (1) можно представить следующим образом:

$$\delta_c = \frac{D'_0}{2E_1} [\Psi + 1 + \nu] P_{кор}, \quad (3)$$

где

$$\Psi = \frac{D_0'^2}{2X_{zc}(X_{zc} + D_0')}.$$

Прогнозирование внутреннего радиального давления, вызванного коррозией, требует определения толщины слоя коррозионных продуктов  $\delta_r$ , диаметра арматуры, потерянной для образования ржавчины вокруг стального арматурного стержня  $\delta_l$  и толщины пористой зоны  $\delta_0$  (рис. 1 – изменение диаметра арматуры, вызванное коррозией а) – арматура, окруженная поровой зоной (до коррозии); б) – арматура, окруженная слоем ржавчины (после коррозии)).

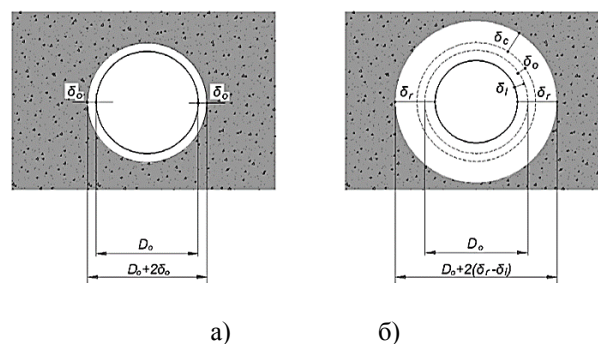


Рис. 1

Пусть  $M_{рж}$  обозначает массу ржавчины на единицу длины одного стержня, а  $M_{пот}$  – массу стали на единицу длины, потребляемую для получения  $M_{рж}$ . Как показано на рисунке, образование слоя ржавчины приводит к увеличению диаметра стержня с  $D_0$  до  $D_0 + 2(\delta_r - \delta_l)$ . Приравнявая увеличение объема на единицу длины, рассчитанное из разницы между объемом произведенной ржавчины и объемом стали, используемой на единицу длины, к изменению площади, выраженному через изменение диаметра, получаем:

$$\frac{M_{рж}}{\rho_{рж}} - \frac{M_{пот}}{\rho_{ст}} = \frac{\pi}{4} \left[ (D_0 + 2(\delta_r - \delta_l))^2 - D_0^2 \right], \quad (4)$$

где  $\rho_{рж}$  – массовая плотность ржавчины;  $\rho_{ст}$  – массовая плотность стали;  $D_0$  – исходный диаметр стального арматурного стержня.

Толщина ржавчины  $\delta_r$  может быть выражена:

$$\delta_r = \delta_1 + \delta_0 + \delta_c. \quad (5)$$

Учитывая уравнение (5), уравнение (4) можно переписать следующим образом:

$$\frac{M_{рж}}{\rho_{рж}} - \frac{M_{пот}}{\rho_{ст}} = \frac{\pi}{4} \left[ 4D_0(\delta_0 + \delta_c) + 4(\delta_0 + \delta_c)^2 \right]. \quad (6)$$

Членом  $4(\delta_0 + \delta_c)^2$  можно пренебречь в вычислениях, так как  $(\delta_0 + \delta_c)^2 \ll D_0$ , и,

$$P_{кор} = \frac{2M_{пот}E_1 \left( \frac{1}{\gamma_m \rho_{рж}} - \frac{1}{\rho_{ст}} \right)}{\pi D_0 (1 + \Psi + \nu)(D_0 + 2\delta_0)} - \frac{2\delta_0 E_1}{(1 + \Psi + \nu)(D_0 + 2\delta_0)}. \quad (9)$$

Отрицательные значения  $P_{кор}$  в уравнении (9) обозначают период, в течение которого ржавчина заполняет пустоты вокруг стержня и устанавливается равной нулю. Определить соотношение между процентом потери массы стали  $m_1$  и внутренним давлением, вызванным коррозией, необходимо выразить через отношение массовой

следовательно, уравнение (6) примет вид:

$$\frac{M_{рж}}{\rho_{рж}} - \frac{M_{пот}}{\rho_{ст}} = \pi D_0 (\delta_0 + \delta_c). \quad (7)$$

Выражая соотношения между  $M_{рж}$  и  $M_{пот}$

$$M_{пот} = \gamma_m M_{рж}, \quad (8)$$

где  $\gamma_m$  – отношение молекулярной массы стали к молекулярной массе ржавчины и объединение уравнений (2), (3), (7) и (8), радиальное давление  $P_{кор}$ , вызванный коррозией, определяется:

плотности ржавчины  $\rho_{рж}$  к массовой плотности исходной стали  $\rho_{ст}$ :

$$\rho_{рж} = \gamma_r \rho_{ст}. \quad (10)$$

Подставляя уравнение (10) в (9), внутреннее радиальное давление, вызванное коррозией, можно выразить следующим образом:

$$P_{кор} = \frac{2 \frac{M_{пот}}{\rho_{ст}} E_1 \left( \frac{1 - \gamma_m \gamma_r}{\gamma_m \gamma_r} \right)}{\pi D_0 (1 + \Psi + \nu)(D_0 + 2\delta_0)} - \frac{2\delta_0 E_1}{(1 + \Psi + \nu)(D_0 + 2\delta_0)}. \quad (11)$$

Относительное отношение объема расширяющихся продуктов коррозии к объему железа  $V_{vol}$  равно:

$$V_{vol} = \frac{1}{V_m V_{рж}}. \quad (12)$$

С помощью (12) уравнение (11) упрощается:

$$P_{кор} = \frac{2 \frac{M_{пот}}{\rho_{ст}} E_1 (V_{vol} - 1)}{\pi D_0 (1 + \Psi + \nu)(D_0 + 2\delta_0)} - \frac{2\delta_0 E_1}{(1 + \Psi + \nu)(D_0 + 2\delta_0)}. \quad (13)$$

Процент потери массы стали  $m_1$  задается:

$$m_1 = 100 M_{\text{пот}} / M_{\text{ст}}, \quad (14)$$

где  $M_{\text{пот}}$  – масса стали на единицу длины, потребляемая для образования ржавчины, и  $M_{\text{ст}}$  – это исходная масса арматурной стали на единицу длины до коррозионного повреждения.

Чтобы выразить внутреннее радиальное давление, вызванное коррозией, как функцию потери массы в процентах, используется следующая зависимость:

$$P_{\text{кор}} = \frac{m_1 E_1 D_o (\gamma_{\text{vol}} - 1)}{200(1 + \Psi + \nu)(D_o + 2\delta_o)} - \frac{2\delta_o E_1}{(1 + \Psi + \nu)(D_o + 2\delta_o)}. \quad (16)$$

Как сказано выше, бетон вокруг стальной арматуры моделируется в виде толсто-стенного цилиндра с толщиной стенки, равной самой тонкой бетонной оболочке. Предполагается, что бетонное кольцо растрескивается, когда растягивающие напряжения в круговом направлении на каждой части кольца достигают предела прочности бетона на растяжение. Радиальное давление, необходимое для образования трещин в защитном слое бетона  $P_{\text{срс}}$ , задается:

$$P_{\text{срс}} [D_o + 2(\delta_o + \delta_c)] = 2[X_{\text{зс}} - (\delta_o + \delta_c)] R_{\text{bt}}, \quad (17)$$

где  $R_{\text{bt}}$  – прочность бетона на растяжение.

$$P_{\text{кор}} = \frac{m_1 E_1 D_o (V_{\text{vol}} - 1)}{200(1 + \Psi + \nu)(D_o + 2\delta_o)} - \frac{2\delta_o E_1}{(1 + \Psi + \nu)(D_o + 2\delta_o)} = \frac{2X_{\text{зс}} R_{\text{bt}}}{D_o}. \quad (20)$$

Масса стали  $M_{\text{пот}}$ , расходуемая с течением времени, связана с количеством тока  $I_{\text{кор}}$  (А), который протекает через ячейку электрохимической коррозии, состоящую из анодных и катодных зон и порового раствора, через который проходят ионы. Процесс описывается законом Фарадея, как:

$$\frac{dM_{\text{пот}}}{dt} = \frac{I_{\text{кор}} A_{\text{Fe}}}{zF}, \quad (21)$$

где  $A_{\text{Fe}}$  – атомный вес железа, равный

$$\frac{M_{\text{пот}}}{\rho_{\text{ст}}} = \frac{M_{\text{пот}} M_{\text{ст}}}{M_{\text{ст}} \rho_{\text{ст}}} = \frac{m_1 A_{\text{с,нач}}}{100} = \frac{m_1 \pi D_o^2}{400}, \quad (15)$$

где  $A_{\text{с,нач}}$  является исходной площадью поперечного сечения стальной арматуры. Объединяя уравнения (15) и (13), соотношение между процентной потерей массы стали и внутреннее радиальное давление, вызванное коррозией, в конечном итоге определяется, как:

Если предположить, что:

$$\begin{aligned} [D_o + 2(\delta_o + \delta_c)] &= D_o, \quad 2(\delta_o + \delta_c) \leq D_o, \\ [X_{\text{зс}} - (\delta_o + \delta_c)] &= X_{\text{зс}}, \quad (\delta_o + \delta_c) \leq X_{\text{зс}}, \end{aligned} \quad (18)$$

радиальное давление, которое вызывает растрескивание  $P_{\text{срс}}$ , задается:

$$P_{\text{срс}} = \frac{2X_{\text{зс}} R_{\text{bt}}}{D_o}. \quad (19)$$

Основное уравнение при растрескивании может быть далее определено уравнением  $P_{\text{кор}}$  из (16), а  $P_{\text{срс}}$  из уравнения (19):

55,85г/моль;  $F$  – постоянная Фарадея равна 96500 С/моль;  $Z$  – количество электронов, обменявшихся в реакции.

Поскольку точный химический состав продуктов коррозии и, следовательно  $Z$ , невозможно измерить количественно, используется эмпирическое значение  $z=2,5$  (так как  $z=2$  для  $\text{Fe}(\text{OH})_2$  и  $z=3$  для  $\text{Fe}(\text{OH})_3$ ), откуда следует, что:

$$\frac{dM_{\text{пот}}}{dt} = (2,315 \cdot 10^{-4}) I_{\text{кор}}. \quad (22)$$

Отношения между  $I_{кор}$  (А) и  $I_{кор}$  (А/м<sup>2</sup>) может быть установлено, как:

$$I_{кор} = \begin{cases} \pi D_o i_{кор} L & (t=t_{нач}), \\ \pi D_r i_{кор} L & (t>t_{нач}), \end{cases} \quad (23)$$

$$\Delta M_{пот,j} = \begin{cases} (2,315 \cdot 10^{-4}) \pi D_o i_{кор} (31,536 \cdot 10^3) \Delta t & (t_1=t_{нач}+1), \\ (2,315 \cdot 10^{-4}) \pi D_{r,j-1} i_{кор} (31,536 \cdot 10^3) \Delta t & (t_j>t_{нач}+1), \end{cases} \quad (24)$$

где  $t$  и  $\Delta t$  в годах. Объем железа, подвергнутого коррозии на единицу длины сталь-

$$V_{пот,j} = \frac{\Delta M_{пот,j}}{\rho_s} = \begin{cases} (2,949 \cdot 10^{-11}) \pi D_o i_{кор} (31,536 \cdot 10^3) \Delta t & (t_1=t_{нач}+1), \\ (2,949 \cdot 10^{-11}) \pi D_{r,j-1} i_{кор} (31,536 \cdot 10^3) \Delta t & (t_j>t_{нач}+1). \end{cases} \quad (25)$$

Уменьшенный диаметр стального стержня после коррозии  $D$ :

$$D_{r,j} = \sqrt{(D_{r,j-1}^2 - 4 \frac{\Delta V_{пот,j}}{\pi})} \quad (\text{м}). \quad (26)$$

Уравнения (24)...(26) решаются рекурсивно, так как их описывают индексы  $j=1...N$ . Для  $j=1$  в момент времени  $t_1$  используется верхнее выражение в уравнениях (24) и (25).  $i_{кор}$  на каждом шаге рассчитывается как среднее значение текущего и предыдущего шага. В уравнении (26) для  $j=1$ ,  $D_{r,0}=D_0$ . Общую массу стали, потерянную для образования ржавчины на единицу длины во времени  $t_n$ , можно выразить:

$$M_{пот,n} = \sum_{j=1}^n \Delta M_{пот,j} \quad (\text{г/м}). \quad (27)$$

Таким образом, на каждом временном шаге, комбинируя уравнениями (14) и (27), можно найти процент потери массы стали  $m_1$ . Как только  $P_{кор}$  будет равно  $P_{кр}$ , в уравнении (20) можно определить трещины в защитном слое бетона и время до коррозионного растрескивания.

где  $D_r=D_o-\delta_1$  – уменьшенный диаметр стального стержня после коррозии,  $t_{нач}$  – время начала коррозии и  $L$  – длина вытравленного стержня. Масса корродированного железа на единицу длины (г/м) получается, как:

ного стержня (см<sup>3</sup>/м), можно определить:

## ВЫВОДЫ

Разработана аналитическая модель возникновения трещин в толстостенном бетонном цилиндре с учетом пористой зоны на границе раздела "сталь-бетон", и поэтому продукты коррозии должны сначала заполнить эту зону, прежде чем их расширение начнет создавать давление на окружающий бетон.

Определено соотношение между процентной потерей массы стали и внутренним радиальным давлением, вызванным коррозией.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Бондаренко В.М., Римшин В.И. Остаточный ресурс силового сопротивления поврежденного железобетона // Вестник РААСН. – 2005, № 9. С.119...126.
2. Дрокин С.В. Влияние дефектов на прочность и деформативность элементов перекрытий каркасных конструктивных систем: Дис. ... канд. техн. наук. – Белгород, 2012.
3. Du Y., Clark L. A., & Chan A.H. Impact of reinforcement corrosion on ductile behavior of reinforced concrete beams // ACI Structural Journal. – 104(3), 2007. P. 285...293.
4. Залесов А.С. Расчет железобетонных конструкций по прочности, трещиностойкости и деформациям. – М.: Стройиздат, 1998.

5. Колчунов В.И., Меркулов С.И., Дворников В.М. Усиление железобетонных конструкций эксплуатируемых зданий и сооружений // Изв. Курского гос. технич. ун-та. – 2004, № 1. С. 117...122.

6. Меланич В.М. Применение метода дискретных конечных элементов к расчету сложных шарнирно-стержневых систем типа структурных плит: Дис... канд. техн. наук. – Волгоград, 1986.

7. Тимошенко С.П. и Войновский –Кригер С. Пластинки и оболочки. – М.: Изд-во Наука, 1966.

8. СП 63.13330.2012 Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения. Актуализированная редакция СНиП 52-01-2003. М.: 2012.

9. СП 28.13330.2017. Защита строительных конструкций от коррозии. Актуализированная редакция СНиП 2.03.11-85. – М.: Стандартинформ, 2017.

10. Тамразян А.Г. К оценке риска чрезвычайных ситуаций по основным признакам его проявления на сооружение // Бетон и железобетон. – 2001, № 5. С.8...10.

11. Тамразян А.Г. Рекомендации к разработке требований к живучести зданий и сооружений // Вестник МГСУ. – 2011, № 2-1. С. 77...83.

12. Tamrazyan A. Reduce the impact of dynamic strength of concrete under fire conditions on bearing capacity of reinforced concrete columns // Applied Mechanics and Materials. – V. 475-476, 2014. P.1563...1566.

13. Tamrazyan A., Popov D. Reduce of bearing strength of the bent reinforced concrete elements on a sloping section with the corrosive damage of transversal armature // MATEC Web of Conferences. – 2017. P.162.

14. Tamrazyan A.G. Calculation of reinforced concrete plates with hole at long-term loading // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering 21, Construction - The Formation of Living Environment. – 2018. P. 052021.

15. Чупичев О.Б. Развитие предложений по оценке остаточного силового сопротивления железобетонных конструкций от воздействия несиловых факторов в процессе эксплуатации // Вестник РААСН. – 2005, № 9. С. 465...469.

16. Val D.V., Stewart M.G. Life-cycle cost analysis of reinforced concrete structures in marine environments // Structural Safety. – Vol.25, №4, 2003. P.343...362.

17. Vecchio F.J. Distributed Stress Field Model for Reinforced Concrete Formulation // ASCE Journal of Structural Engineering. – 126(9), 2000. P. 1071...1077.

## REFERENCES

1. Bondarenko V.M., Rimshin V.I. Ostatochnyy resurs silovogo soprotivleniya povrezhdennogo zhelezobetona // Vestnik RAASN. – 2005, № 9. S.119...126.

2. Drokin S.V. Vliyaniye defektov na prochnost' i deformativnost' elementov perekrytiy karkasnykh konstruktivnykh sistem: Dis. ... kand. tekhn. nauk. – Belgorod, 2012.

3. Du Y., Clark L. A., & Chan A.H. Impact of reinforcement corrosion on ductile behavior of reinforced concrete beams // ACI Structural Journal. – 104(3), 2007. P. 285...293.

4. Zalesov A.S. Raschet zhelezobetonykh konstruktсий po prochnosti, treshchinostoykosti i deformatsiyam. – М.: Stroyizdat, 1998.

5. Kolchunov V.I., Merkulov S.I., Dvornikov V.M. Usilenie zhelezobetonykh konstruktсий ekspluatiruemyykh zdaniy i sooruzheniy // Izv. Kurskogo gos. tekhnich. un-ta. – 2004, № 1. S. 117...122.

6. Melanich V.M. Primeneniye metoda diskretnykh konechnykh elementov k raschetu slozhnykh sharnirno-stержnevyykh sistem tipa strukturnykh плит: Dis... kand. tekhn. nauk. – Volgograd, 1986.

7. Timoshenko S.P. i Voynovskiy–Kriger S. Plastinki i obolochki. – М.: Izd-vo Nauka, 1966.

8. SP 63.13330.2012 Betonnyye i zhelezobetonyye konstruktсий. Osnovnyye polozheniya. Aktualizirovannaya redaktsiya SNiP 52-01-2003. М.: 2012.

9. SP 28.13330.2017. Zashchita stroitel'nykh konstruktсий ot korrozii. Aktualizirovannaya redaktsiya SNiP 2.03.11-85. – М.: Standartinform, 2017.

10. Tamrazyan A.G. K otsenke riska chrezvychnyykh situatsiy po osnovnym priznakam ego proyavleniya na sooruzhenie // Beton i zhelezobeton. – 2001, № 5. S.8...10.

11. Tamrazyan A.G. Rekomendatsii k razrabotke trebovaniy k zhivuchesti zdaniy i sooruzheniy // Vestnik MGSU. – 2011, № 2-1. S. 77...83.

12. Tamrazyan A. Reduce the impact of dynamic strength of concrete under fire conditions on bearing capacity of reinforced concrete columns // Applied Mechanics and Materials. – V. 475-476, 2014. P.1563...1566.

13. Tamrazyan A., Popov D. Reduce of bearing strength of the bent reinforced concrete elements on a sloping section with the corrosive damage of transversal armature // MATEC Web of Conferences. – 2017. P.162.

14. Tamrazyan A.G. Calculation of reinforced concrete plates with hole at long-term loading // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering 21, Construction - The Formation of Living Environment. – 2018. P. 052021.

15. Chupichev O.B. Razvitie predlozheniy po otsenke ostatochnogo silovogo soprotivleniya zhelezobetonykh konstruktсий ot vozdeystviya nesilovykh faktorov v protsesse ekspluatatsii // Vestnik RAASN. – 2005, № 9. S. 465...469.

16. Val D.V., Stewart M.G. Life-cycle cost analysis of reinforced concrete structures in marine environments // Structural Safety. – Vol.25, №4, 2003. P.343...362.

17. Vecchio F.J. Distributed Stress Field Model for Reinforced Concrete Formulation // ASCE Journal of Structural Engineering. – 126(9), 2000. P. 1071...1077.

Рекомендована кафедрой металлических и деревянных конструкций. Поступила 22.06.20.