УДК 624.046

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ДИНАМИЧЕСКОГО ДОГРУЖЕНИЯ В АРМАТУРЕ РАСТЯНУТОГО ЖЕЛЕЗОБЕТОННОГО ЭЛЕМЕНТА

DETERMINATION OF THE PARAMETERS OF THE DYNAMIC IMPACT IN THE ARMATURE OF REINFORCED CONCRETE ELEMENT

Н.В. ФЕДОРОВА, В.И. КОЛЧУНОВ, В.Т. ЧЕМОДУРОВ, П.А. КОРЕНЬКОВ
N.V. FEDOROVA, V.I. KOLCHUNOV, V.T. CHEMODUROV, P.A. KORENKOV

(Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет,
Юго-Западный государственный университет,
Крымский федеральный университет им. В.И.Вернадского, г. Симферополь)
(National Research Moscow State University of Civil Engineering,
Southwest State University,
V.I. Vernadsky Crimean Federal University, Simferopol)
E-mail: fenavit@mail.ru; asiorel@mail.ru; chens_mu1@mail.ru; kpa_gbk@mail.ru

Предложена методика определения времени динамического догружения в арматуре железобетонных элементов конструктивных систем при оценке живучести зданий и сооружений, в том числе реконструируемых объектов текстильной промышленности. В результате образования трещины при хрупком разрушении растянутой бетонной матрицы в арматуре возникает дополнительное динамическое догружение, максимальное приращение которого достигается на первой полуволне колебания. На основе прямого динамического расчета получено аналитическое выражение для определения времени приложения динамического воздействия на арматурный стержень в растянутом железобетонном элементе в момент образования трещин.

The article deals with a method of determining the time of dynamic increase of stresses in the reinforcing bars of reinforced concrete elements of structural systems in assessing the survivability of buildings and structures, including the reconstructed objects of the textile industry. As a result of the crack formation during the brittle fracture of a stretched concrete matrix in the reinforcing bars, an additional dynamic increase of stresses appears. It's maximum increment is achieved in the

first half-wave of the oscillation. On the basis of direct dynamic calculation, an formula for determining the time of application of a dynamic effect on the reinforcing bar in a stretched ferro-concrete element at the time of the crack formation is obtained.

Ключевые слова: прогрессирующее обрушение, живучесть конструктивных систем, конструктивная безопасность, динамическое догружение.

Keywords: progressive collapse, survivability of structural systems, constructive safety, dynamic effects.

В настоящее время при проектировании и реконструкции несущих систем зданий (и объектов текстильной промышленности тоже) должна быть учтена аварийная расчетная ситуация, в том числе предельное состояние при этой ситуации, возникшее в связи с внезапным отказом одного из несущих элементов [1], [2]. Внезапный отказ несущего элемента в конструктивной системе сооружения ведет к динамическому догружению оставшихся неразрушенными конструктивных элементов системы, а в конструкциях из железобетона еще и к образованию трещин в этих элементах. Образование трещин также вызывает мгновенное приращение напряжений в арматуре в сечении с трещиной.

В статье предложена методика определения времени динамического догружения в арматурном стержне при образовании трещины в железобетонном элементе конструктивной системы. Показано, что время воздействия на арматурный стержень существенно влияет на уровень напряженно-деформированного состояния в железобетонном элементе. Особенно важен этот анализ для предварительно напряженных железобетонных элементов с высоким уровнем преднапряжения, когда динамическое догружение в арматуре может привести к ее разрыву.

В последние три десятилетия выполнен ряд исследований, связанных не только с проблемой конструктивной безопасности – как характеристики неразрушимости несущей системы при эксплуатации объекта недвижимости, но и с решением проблемы живучести – как характеристики сопротивляемости конструктивной системы прогрессирующему разрушению при внезапных аварийных воздействиях.

Одним из первых исследований в области живучести конструктивных систем зданий и сооружений стали исследования, проведенные в РААСН Г.А. Гениевым, [3], [4], В.И.Травушем [5], В.И. Колчуновым [4…7], Н.И. Карпенко [6] и др. Вопросы, связанные с учетом динамических нагружений в арматуре железобетонных элементов при внезапном хрупком разрушении бетонной матрицы, пока носят еще единичный характер, не учитывают время динамического догружения конструктивных элементов и соответственно его влияние на их прочность[8…10].

Определение времени динамического догружения в арматуре растянутого железобетонного элемента при трещинообразовании.

Рассмотрим растянутый железобетонный элемент с одиночной ненапряженной арматурой, нагруженный растягивающей силой N (рис. 1 – расчетная схема для определения времени динамического догружения в растянутом железобетонном элементе).

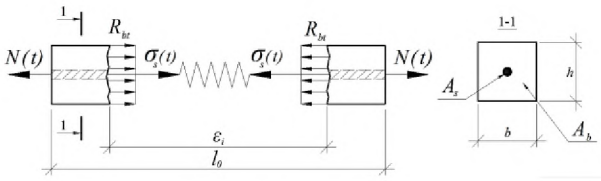


Рис. 1

При достижении растягивающей силы N усилия трещинообразования в бетоне N_{crc} происходит хрупкое разрушение бетона и

мгновенная передача усилия, воспринимаемого бетонной матрицей, с бетона на арматуру. При этом в арматурном стержне возникают продольные колебания, вызванные его динамическим догружением. Запишем уравнение движения рассматриваемого железобетонного элемента при его мгновенном динамическом догружении, вызванном разрушением бетонной матрицы.

При действии динамически приложенной кратковременной нагрузки N(t) максимальный отклик осциллятора будет достигаться через некоторый промежуток времени – четверть периода его продольных колебаний. В течение этого времени силы демпфирования не успеют проявиться. Поскольку интересовать нас будет только максимальный отклик осциллятора, а не закон, по которому он колеблется, то силами демпфирования в уравнении движения можно пренебречь [11…14]:

$$m\ddot{\varepsilon}_s + C\varepsilon_s = N(t), \qquad (1)$$

где $m = A_i \ell_i \rho_i$ – масса колеблющегося элемента; ε_s – деформации растяжения; $\sigma_s(t)$ – напряжение в продольно колеблющемся арматурном стержне; C – продольная жесткость стержня, под которой будем подразумевать силу, которую нужно приложить, чтобы вызвать ее статическое перемещение, равное единице (значение этой жесткости может быть получено по общеизвестным диаграммам состояния материалов "$\sigma - \varepsilon$" [15], [16]); N(t) – сила, приводящая в движение всю систему, определяемая по формуле:

$$N(t) = N + N_{bt}(t), \qquad (2)$$

в которой N – усилие растяжения, действующее в рассматриваемом железобетонном элементе; (t) – усилие, мгновенно переданное с разрушенной бетонной матрицы на арматурный стержень, определяемое как:

$$N_{bt}(t) = R_{bt,ser} K_{dv}(t), \qquad (3)$$

где при упругом деформировании стержня на первой полуволне от начала колебаний максимальное значение коэффициента динамичности $K_{dv}(t) = 2$, поскольку передача усилия с бетона на арматуру при хрупком разрушении бетонной матрицы происходит мгновенно [7]; $R_{bt,ser}$– нормативное сопротивление бетона растяжению.

Разделим обе части выражения (1) на массу m и получим уравнение:

$$\ddot{\varepsilon}_s + \omega^2 \varepsilon_s = \frac{N(t)}{m}, \qquad (4)$$

в котором ω^2 – частота продольных колебаний.

Используя отображение Лапласа, запишем:

$$\ddot{\varepsilon}_s \to p^2 q - p q_0 - \dot{q}_0, \qquad (5)$$
$$\varepsilon_s \to q, \qquad (6)$$
$$N(t) \to N(p). \qquad (7)$$

Подставляя выражения (5) ...(7) в уравнение (4), получим:

$$p^2 q - p q_0 - \dot{q}_0 + \omega^2 q = \frac{N(p)}{m}. \qquad (8)$$

Преобразуем уравнение (8) к виду:

$$p^2 q - \omega^2 q = \frac{N(p)}{m} + p q_0 - \dot{q}_0, \qquad (9)$$
$$q = \frac{1}{p^2+\omega^2}\frac{N(t)}{m} + \frac{p}{p^2+\omega^2} q_0 + \frac{1}{p^2+\omega^2}\dot{q}_0. \qquad (10)$$

Используя обратное отображение Лапласа, получим:

$$\frac{N(p)}{p^2+\omega^2} \leftarrow \cos \omega t, \qquad (11)$$
$$\frac{1}{p^2+\omega^2} \leftarrow \sin \omega t. \qquad (12)$$

Преобразуя (10) с учетом (11) ... (12), запишем:

$$\frac{N(p)}{p^2+\omega^2} = \frac{1}{\omega}\int N(u) \sin \omega (t-u)\, du. \qquad (13)$$

Тогда выражение (10) примет вид:

$$\varepsilon_s = \varepsilon_0 \cos \omega t + \dot{\varepsilon}_0 \sin \omega t \frac{1}{\omega} + \frac{1}{m\omega}\int_0^t N(u) \sin \omega (t-u)\, du. \qquad (14)$$

При начальных условиях $\varepsilon_0 = 0$ и $\dot{\varepsilon}_0 = 0$ будем иметь:

$$\varepsilon_s = \frac{1}{m\omega^2}\int_0^t N(u)\sin\omega(t-u)\,du. \quad (15)$$

При $N = const$ получим:

$$\varepsilon_s = \frac{1}{m\omega^2}\int_0^t N\sin\omega(t-u)\,du. \quad (16)$$

Вынесем N и запишем:

$$\varepsilon_s = \frac{N}{m\omega^2}\int_0^t \sin\omega(t-u)\,du. \quad (17)$$

Проинтегрировав (17), получим выражение, описывающее зависимость перемещения во времени от мгновенно приложенной нагрузки:

$$\varepsilon_s = \frac{N}{m\omega^2}(1-\cos\omega t). \quad (18)$$

Из (18) будем иметь окончательное выражение для аналитического определения времени динамического воздействия:

$$t_d = \frac{1}{\omega}\arccos\left(1-\varepsilon_s\frac{m\omega^2}{N}\right). \quad (19)$$

Согласно (18) рассматриваемый элемент начинает совершать колебания около статической упругой линии как система с одной степенью свободы. Перемещения ε в начальный момент времени изменяются в пределах от $2\varepsilon_{ст}$ при $\cos\omega t = \pi$ до 0 при $\cos\omega t = 0$.

Определение времени динамического догружения в железобетонном растянутом железобетонном элементе с предварительно напряженной арматурой.

Примем по аналогии с предыдущей расчетной схемой расчетную схему в виде совершающего вынужденные колебания осциллятора с той лишь разницей, что в нее дополнительно добавим усилие от предварительного напряжения арматуры с учетом всех потерь (P_{02}) (рис. 2 – расчетная схема для определения времени динамического догружения в предварительно напряженном растянутом железобетонном элементе).

Тогда выражение (2) примет вид:

$$N(t) = N + N_{bt} + P_{02}. \quad (20)$$

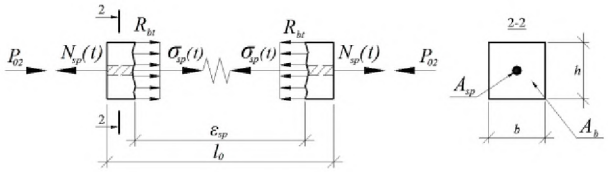


Рис. 2

Проделав преобразования уравнения (4), аналогичные преобразованиям (5)…(19), получим искомое выражение для железобетонного элемента с предварительно напряженной арматурой:

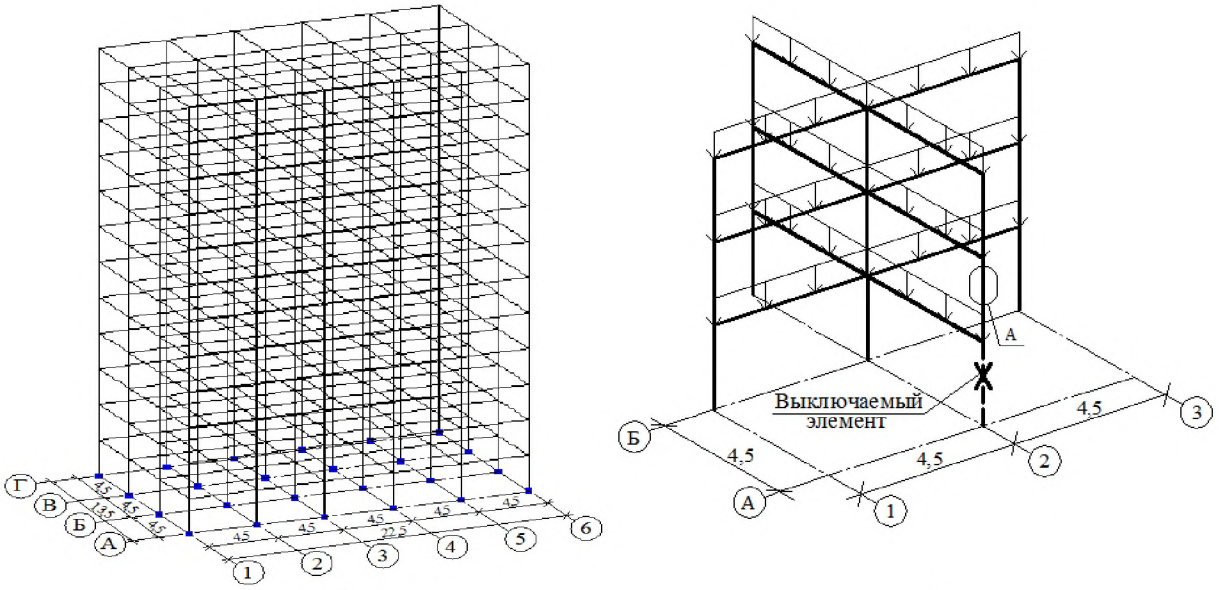
$$t_d = \frac{1}{\omega}\arccos\left(1-\varepsilon_i\frac{m\omega^2}{N+N_{bt}+P_{02}}\right). \quad (21)$$

Анализ выражения (21) позволяет отметить, что чем выше уровень предварительного напряжения, тем время динамического воздействия будет меньше. Это может быть использовано при проектировании защиты зданий и сооружений от прогрессирующего обрушения в качестве одного из приемов, позволяющего минимизировать ущерб от возможных аварийных воздействий.

Пример расчета. В качестве примера рассмотрим определение времени динамического догружения арматуры в колонне каркаса монолитного многоэтажного здания рамной конструктивной системы, выполненной из монолитного железобетона. Здание имеет размеры в плане 13,5×22,5 (рис. 3-а).

На рис. 3 представлена расчетная схема первого (а) и второго (б) уровня каркаса железобетонного монолитного здания.

Шаг колонн регулярный в продольном и поперечном направлениях и равен 4,5 м. Высота каждого этажа 3 м. Сечения ригелей и колонн принято 0,4×0,4 м, бетон конструкций класса В25, арматура А400С. Проектная нагрузка на каркас здания определена согласно действующим нормам (СП20.13330.2011). Армирование колонн по осям А-2 выполнено четырьмя стержнями диаметром 28 мм (A_s=24,63 см^2). В качестве выключаемого несущего элемента рассмотрена колонна первого этажа в осях А-2. Усилие в этой колонне до ее выключения, полученное расчетом на эксплуатационную нагрузку, составило N(t)=1750 кН.



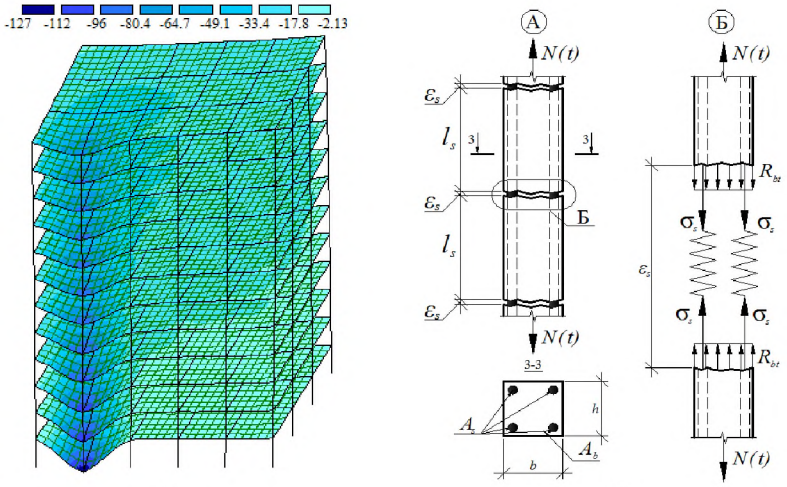
а) б)

Рис. 3

На первом этапе расчетного анализа в соответствии с методикой [17] был выполнен расчет конструктивной системы всего здания по первичной расчетной схеме первого и второго уровня (рис. 3-а,б) на заданную проектную нагрузку и определено напряженно- деформированное состояние в элементах конструктивной системы.

На втором этапе осуществлен расчет конструктивной системы по так называемой вторичной расчетной схеме первого и второго уровня на суммарное нагружение заданной запроектной нагрузкой и запроектное воздействие в виде внезапного выключения крайней колонны в осях А-2 первого этажа. По результатам расчета определено новое распределение силовых потоков в конструктивной системе. При этом сжимающее усилие в колонне, определенное на первом этапе расчетного анализа, во вторичной расчетной схеме было приложено с обратным знаком и вычислены динамические догружения и перемещения во всех элементах вторичной расчетной схемы (рис. 4-б). Время динамического догружения колонны А-2 второго этажа определено по расчетной схеме третьего уровня (рис. 4-б) с использованием аналитической зависимости (19).

На рис. 4 представлены: схема перемещения элементов каркаса после удаления колонны в осях А-2, мм (а) и расчетная схема третьего уровня каркаса железобетонного монолитного здания (б).



а) б)

Рис. 4

При относительных деформациях для арматуры колонны с физическим пределом текучести $\varepsilon_{s0} = 0{,}002$ на максимальном расстоянии между трещинами в колонне, вычисленной по [15], максимальное значение деформации арматуры колонн в трещине составило $\varepsilon_{s,max} = 0{,}006$.

Следовательно, параметр C будет равен отношению прочности на растяжение к максимальным деформациям:

$$C = \frac{R_s A_s}{\varepsilon_{max}} = \frac{400 \cdot 10^6 \cdot 24{,}63 \cdot 10^{-3}}{6 \cdot 10^{-3}} = 164200000 \text{ Н/м}.$$

Соответственно частота собственных колебаний будет равна:

$$\omega = \sqrt{\frac{C}{m}} = \sqrt{\frac{164200000}{1750/9{,}81}} = 30 \text{ с}^{-1}.$$

Время динамического догружения в соответствии с формулой (19) будет равно:

$$t_d = \frac{1}{30}\arccos\left(1 - 6 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{1750/9{,}81 \cdot 30^2}{1750 + 0{,}16 \cdot 1550 \cdot 2}\right) = 0{,}037 \text{ с}.$$

ВЫВОДЫ

1. Построены аналитические зависимости, которые могут быть использованы для определения параметров динамического догружения в растянутых элементах при расчете живучести железобетонных каркасов зданий и сооружений при особых предельных состояниях.

2. Учет времени динамического воздействия на арматурные стержни при хрупком разрушении бетонной матрицы в двухкомпонентном железобетонном элементе позволит более строго определять динамическую прочность арматуры и использовать ее значение при защите рассматриваемых конструктивных систем от прогрессирующего обрушения.

ЛИТЕРАТУРА

1. ГОСТ 27751–2014. Надежность строительных конструкций и оснований. Основные положения. Введ. 2015-07-01. – М.: Стандартинформ, 2015.

2. Федеральный закон от 30.12.2009 N 384-ФЗ "Технический регламент о безопасности зданий и сооружений" [Электронный ресурс] // СПС КонсультантПлюс: Законодательство: Версия Проф. – URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_95720/ (12.05.2017)

3. *Гениев Г.А.* Об оценке динамических эффектов в стержневых системах из хрупких материалов // Бетон и железобетон. – 1992, № 9. С. 25…27.

4. *Гениев Г.А., Колчунов В. И., Клюева Н.В., Никулин А.И., Пятикрестовский К.П.* Прочность и деформативность железобетонных конструкций при запроектных воздействиях. – М.: АСВ, 2004.

5. *Травуш В.И., Колчунов В. И., Клюева Н.В.* Некоторые направления развития теории живучести конструктивных систем зданий и сооружений систем // Промышленное и гражданское строительство. – 2015, №3. С.4…11.

6. *Карпенко Н.И., Колчунов В.И.* О концептуально-методологических подходах к обеспечению конструктивной безопасности // Строительная механика и расчет сооружений. –2007, №1. С. 4…8.

7. *Колчунов В.И., Клюева Н.В., Андросов Н.Б., Бухтиярова А.С.* Живучесть зданий и сооружений при запроектных воздействиях. – М.: АСВ, 2014.

8. *Колчунов В.И., Клюева Н.В., Андросова Н.Б.* Определение динамических догружений в арматуре железобетонного изгибаемого элемента при трещинообразовании // Современные проблемы расчета железобетонных конструкций, зданий и сооружений на аварийные воздействия. – 2016. С.181…186.

9. *Колчунов В.И., Андросова Н.Б.* Анализ динамических нагружений в арматуре изгибаемых железобетонных элементов при хрупком разрушении бетонной матрицы // Научный вестник Воронежского ГАСУ. Строительство и архитектура. – 2016, №4. С.11…20.

10. *Клюева Н.В., Рыпаков Д.А.* Расчет динамических догружений в железобетонных элементах, работающих на изгиб с кручением при трещинообразовании // Жилищное строительство. – 2015, №3. С. 19…22.

11. *Верюжский Ю.В., Голышев А.Б., Колчунов Вл.И., Клюева Н.В., Лисицин Б.М., Машков И.Л.,*

Яковенко И.А. Справочное пособие по строительной механике. – В двух томах. Том I. – М.: АСВ, 2014.

12. *Расторгуев Б.С., Плотников А.И., Хуснутдинов Д.З.* Проектирование зданий и сооружений при аварийных взрывных воздействиях. – М.: АСВ, 2007.

13. *Коробко В.И., Коробко А.В.* Строительная механика: Динамика и устойчивость стержневых систем. – М.: АСВ, 2008.

14. *Бирбраер А.Н., Роледер А.Ю.* Экстремальные воздействия на сооружения. – СПб.: Изд-во Политехнического университета, 2009.

15. СП 63.13330-2012. Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения. Актуализированная редакция СНиП 52-01-2003: введ. 2013-01-01/Минрегион РФ.–М., ФАУ"ФЦС", 2012.

16. EN 1992-1:2004 Eurocode-2: Design of Concrete Structures – Part1: General Rules and Rules for Building. – Brussels, 2004.

17. *Емельянов С.Г., Клюева Н.В., Кореньков П.А.* Методика определения параметров живучести железобетонных каркасов многоэтажных зданий // Изв. вузов. Технология текстильной промышленности. – 2016, №3. С.266…270.

R E F E R E N C E S

1. GOST 27751–2014. Nadezhnost' stroitel'nyh konstrukcij i osnovanij. Osnovnye polozhenija. Vved. 2015-07-01. – M.: Standartinform, 2015.

2. Federal'nyj zakon ot 30.12.2009 N 384-FZ "Tehnicheskij reglament o bezopasnosti zdanij i sooruzhenij" [Jelektronnyj resurs] // SPS Konsul'tantPljus: Zakonodatel'stvo: Versija Prof. – URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_ LAW_95720/ (12.05.2017)

3. Geniev G.A. Ob ocenke dinamicheskih jeffektov v sterzhnevyh sistemah iz hrupkih materialov // Beton i zhelezobeton. – 1992, № 9. S. 25…27.

4. Geniev G.A., Kolchunov V. I., Kljueva N.V., Nikulin A.I., Pjatikrestovskij K.P. Prochnost' i deformativnost' zhelezobetonnyh konstrukcij pri zaproektnyh vozdejstvijah. – M.: ASV, 2004.

5. Travush V.I., Kolchunov V. I., Kljueva N.V. Nekotorye napravlenija razvitija teorii zhivuchesti konstruktivnyh sistem zdanij i sooruzhenij sistem // Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo. – 2015, №3. S.4…11.

6. Karpenko N.I., Kolchunov V.I. O konceptual'no-metodologicheskih podhodah k obespecheniju konstruktivnoj bezopasnosti // Stroitel'naja mehanika i raschet sooruzhenij. –2007, №1. S. 4…8.

7. Kolchunov V.I., Kljueva N.V., Androsov N.B., Buhtijarova A.S. Zhivuchest' zdanij i sooruzhenij pri zaproektnyh vozdejstvijah. – M.: ASV, 2014.

8. Kolchunov V.I., Kljueva N.V., Androsova N.B. Opredelenie dinamicheskih dogruzhenij v armature zhelezobetonnogo izgibaemogo jelementa pri treshhinoobrazovanii // Sovremennye problemy rascheta zhelezobetonnyh konstrukcij, zdanij i sooruzhenij na avarijnye vozdejstvija. – 2016. S.181…186.

9. Kolchunov V.I., Androsova N.B. Analiz dinamicheskih nagruzhenij v armature izgibaemyh zhelezobetonnyh jelementov pri hrupkom razrushenii betonnoj matricy // Nauchnyj vestnik Voronezhskogo GASU. Stroitel'stvo i arhitektura. – 2016, №4. S.11…20.

10. Kljueva N.V., Rypakov D.A. Raschet dinamicheskih dogru-zhenij v zhelezobetonnyh jelementah, rabotajushhih na izgib s krucheniem pri treshhinoobrazovanii // Zhilishhnoe stroitel'stvo. – 2015, №3. S.19…22.

11. Verjuzhskij Ju.V., Golyshev A.B., Kolchunov Vl.I., Kljueva N.V., Lisicin B.M., Mashkov I.L., Jakovenko I.A. Spravochnoe posobie po stroitel'noj mehanike. – V dvuh tomah. Tom I. – M.: ASV, 2014.

12. Rastorguev B.S., Plotnikov A.I., Husnutdinov D.Z. Proektirovanie zdanij i sooruzhenij pri avarijnyh vzryvnyh vozdejstvijah. – M.: ASV, 2007.

13. Korobko V.I., Korobko A.V. Stroitel'naja mehanika: Dinamika i ustojchivost' sterzhnevyh sistem. – M.: ASV, 2008.

14. Birbraer A.N., Roleder A.Ju. Jekstremal'nye vozdejstvija na sooruzhenija. – SPb.: Izd-vo Politehnicheskogo universiteta, 2009.

15. SP 63.13330-2012. Betonnye i zhelezobetonnye konstrukcii. Osnovnye polozhenija. Aktualizirovannaja redakcija SNiP 52-01-2003: vved. 2013-01-01/Minregion RF.–M., FAU"FCS", 2012.

16. EN 1992-1:2004 Eurocode-2: Design of Concrete Structures – Part1: General Rules and Rules for Building. – Brussels, 2004.

17. Emel'janov S.G., Kljueva N.V., Koren'kov P.A. Metodika opredelenija parametrov zhivuchesti zhelezobetonnyh karkasov mnogojetazhnyh zdanij // Izv. vuzov. Tehnologija tekstil'noj promyshlennosti. – 2016, №3. S.266…270.

Рекомендована кафедрой уникальных зданий и сооружений Юго-Западного гос. ун-та. Поступила 16.08.17.