

**ВЛИЯНИЕ ДИАГОНАЛЬНОЙ ВЫСОКОПРОЧНОЙ АРМАТУРЫ
БЕЗ СЦЕПЛЕНИЯ С БЕТОНОМ
НА ПРОГИБЫ МОНОЛИТНЫХ БЕЗБАЛОЧНЫХ ПЕРЕКРЫТИЙ**

**INFLUENCE OF DIAGONAL HIGH-STRENGTH REINFORCEMENT
WITHOUT ADHESION TO CONCRETE ON THE DEFLECTIONS
OF MONOLITHIC BEAMS**

B.C. КУЗНЕЦОВ, Ю.А. ШАПОШНИКОВА
V.S. KUZNETSOV, YU.A. SHAPOSHNIKOVA

(Национальный исследовательский
Московский государственный строительный университет)
(National Research Moscow State University of Civil Engineering)
E-mail: vitalik.kuznetsov2016@yandex.ru; yuliatalyzova@yandex.ru

В статье рассматривается влияние применения диагональной преднапряженной арматуры без сцепления с бетоном на прогибы плит с различным соотношением сторон. Траектория укладки канатов в плите представлена частью параболы. Вычислены величины узловых сил отпора с помощью интегрирования уравнения изогнутой оси каната и получена формула для определения интенсивности отпора в любой точке по длине каната. С помощью метода конечных элементов получены деформации ячейки безбалочной плиты. В результате проведенного исследования выявлено, что при выборе схемы раскладки высокопрочной арматуры следует отдавать предпочтение диагональному расположению, как более экономичному, а количество канатов подбирать, исходя из требуемого уменьшения прогибов.

The influence of the application of a diagonal prestressed reinforcement without adhesion to concrete on the deflections of plates with different aspect ratio is considered in the article. The trajectory of laying ropes in the slab is represented by a part of the parabola. The values of nodal repulsive forces are calculated by integrating the equation of the curved axis of the rope and a formula is obtained to determine the intensity of the repulsion at any point along the length of the rope. Deformations of the cell of the bezel plate were obtained using the finite element method. As a result of the conducted research it was revealed that when choosing the scheme for layout of high-strength reinforcement, it is necessary to give preference to the diagonal arrangement as more economical, and to select the number of ropes based on the required reduction in deflections.

Ключевые слова: канат, монолитное безбалочное перекрытие, моностренд, предварительно напряженная контурная арматура, преднапряженная арматура, прогиб.

Keywords: rope, monolithic flat overlap, monostrend, contour prestressed reinforcement, tensioning armature, deflection.

В работе рассматривается влияние диагональной преднапряженной арматуры без сцепления с бетоном на прогибы плит с различным соотношением сторон (рис. 1 –

схема расположения напрягаемой арматуры в плите).

Серьезным недостатком, препятствующим распространению безбалочных пере-

крытий, является развитие чрезмерных прогибов в центре плиты.

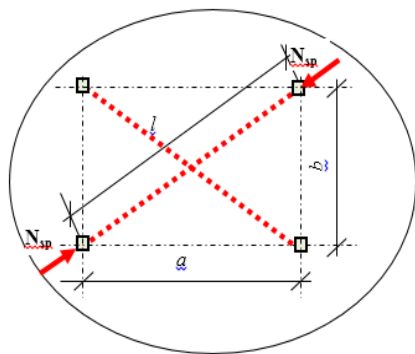


Рис. 1

Так, при пролетах более 7 м российские нормы рекомендуют для уменьшения прогибов устраивать капители или дополнительно применять высокопрочную преднапряженную арматуру без сцепления с бетоном, не приводя сведений о расчете [1].

В европейских [2], [4] и в американских [5] нормах отделяются системы со сцеплением с бетоном и без него, но для последних ограничиваются коэффициентами ограничения уровня преднапряжения. Подробное обоснование введенных коэффициентов в нормах не указывается. Несколько современных работ по данному направлению, с учетом работы преднапрягаемой арматуры без сцепления с бетоном, посвящено монолитному перекрытию только с ортогональным расположением преднапрягаемой арматуры [6...14].

Напрягаемая арматура в виде нескольких канатов (1...5) существенно уменьшает прогибы, а диагональное расположение уменьшает общую длину канатов и количество рабочих точек, по сравнению с контурным, что является важным с точки зрения экономичности конструкции [15...16].

Некоторые вопросы использования предварительно напряженной диагональной арматуры без сцепления с бетоном и ее влияние на прочность плиты такого перекрытия рассматривались авторами ранее [16...19].

Существенный вопрос, связанный с оптимизационным решением плит перекрытий, рассмотрен в [20...22].

Расположение канатов по высоте сечения, как правило, соответствует ожидаемой

эпюре моментов и при равномерно распределенной нагрузке может быть представлено частью окружности или параболы. Способы и методы фиксации канатов могут быть выбраны в соответствии с [23...27].

При начале координат в точке А траектория канатов может быть представлена частью параболы, проходящей через опоры А и Б, с высотой, равной прогибу f , а ℓ – длина диагоналей равна расстоянию между осями колонн (рис. 1).

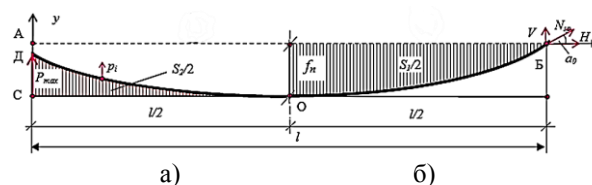


Рис. 2

Исходное уравнение изогнутой оси каната:

$$y = -\frac{4f}{\ell^2} x(x - \ell). \quad (1)$$

Площадь параболы определяется интегрированием уравнения (1):

$$S_1 = \frac{4f}{\ell^2} \int_0^\ell x(\ell - x) dx. \quad (2)$$

Отпор канатов в произвольной точке i зависит от угла наклона каната α_i и усилия N_{sp} (рис. 2 – к расчету отпора каната):

$$P_i = N_{sp} \sin \alpha_i. \quad (3)$$

Угол наклона каната в произвольной точке α_i находится дифференцированием исходного уравнения (1) и при малых углах α :

$$y' = \operatorname{tga} \approx \sin \alpha = -\frac{4f}{\ell^2} (2x - \ell). \quad (4)$$

Максимальное значение интенсивности отпора p_{\max} определяется усилием преднапряжения N_{sp} и углом α_0 выхода каната на опорах (рис.2-б). Из выражения (4) при $x=0$ и $x = \ell$ находятся углы наклона каната на опорах. При симметричном расположении канатов $\operatorname{tga} \alpha_0 \approx \sin \alpha_0 = 4f/\ell$:

$$p_{\max} = N_{sp} \sin \alpha_0 = 4N_{sp} f / \ell. \quad (5)$$

Опорная реакция V уравнивается распределенными по длине каната силами отпора, величина которых геометрически равна площади криволинейной трапеции СДО:

$$V = \frac{p_{\max} \ell}{6} = \frac{4N_{sp} f \ell}{\ell \cdot 6} = \frac{2fN_{sp}}{3}. \quad (6)$$

Уравнение параболы с началом координат в точке С (рис. 2-а):

$$y = p_i = \frac{4p_{\max}}{\ell^2} x^2 - \frac{4p_{\max}}{\ell} x + p_{\max}. \quad (7)$$

Величины узловых сил отпора определяется пределами интегрирования от x_i до x_{i+1} , равными расстоянию между диагональными узлами принятой сетки:

$$p_i = \int_0^{x_i} \left(\frac{4p_{\max}}{\ell^2} x^2 - \frac{4p_{\max}}{\ell} x + p_{\max} \right) dx. \quad (8)$$

Вычисляя интеграл (8) получаем формулу для определения интенсивности отпора p_i в любой точке по длине каната:

$$p_i = \frac{4p_{\max}}{\ell^2} \frac{x^3}{3} - \frac{4p_{\max}}{\ell} \frac{x^2}{2} + p_{\max} x. \quad (9)$$

При пределах интегрирования от $x=0$ до $x=\ell/2$ площадь криволинейной трапеции СДО соответствует опорной реакции:

$$S_2 = V = f\ell/6. \quad (10)$$

Подставляя (5) в выражение (10), получаем окончательную формулу для определения отпорных сил в любой точке каната:

$$P_i = \frac{4N_{sp}}{3\ell} x \left(\frac{4x^2}{3\ell^2} - \frac{2x}{\ell} \right) + P_{\max}. \quad (11)$$

Влияние преднапряжения на перемещение изучалось на плитах площадью 81 м^2 , с отношением сторон $a/b=1,0...2,0$. Толщина плит $h=200 \text{ мм}$, защитный слой $a=a'=30 \text{ мм}$. Бетон В30, колонны $300 \times 300 \text{ мм}$. Преднапрягаемая арматура – канаты К70, $R_{s,n} = 1860 \text{ МПа}$. Уровень преднапряжения с учетом упругого обжатия и всех потерь $\sigma_{sp0} = 0,7 \cdot 1860 = 1302 \text{ МПа}$. $A_{sp}=1,54 \text{ см}^2$. Усилие от одного каната $N_{sp}=1,54 \cdot 10^{-4} \cdot 1302 \cdot 10^3 \approx 200,51 \text{ кН}$. Нагрузка $q=10 \text{ кН/м}^2$. Начальная стрела провиса канатов $f_0 = h-a-a'=200-30-30=140 \text{ мм}$. Нормативный прогиб плиты в центре ячейки $f_a = \ell/200$ определялся в соответствии с [1], [12] при расчетном пролете, равном большему расстоянию в свету между колоннами, $\ell_a = (a-h_k)$. Полный провис каната равен $f = f_a + f_0$.

Расчеты выполняли в комплексе Scad, отпор учитывался в виде сосредоточенных сил, приложенных в узлах разбивочной сетки по диагонали ячейки [28]. Величина силы определялась площадью криволинейной трапеции, основание которой равно расстоянию между узлами, а высота ограничена функцией (11).

На рис. 3 (деформации плиты $10,06 \times 8,05 \text{ м}$ без преднапряженной арматуры (а) и с диагональной преднапряженной арматурой (б)) представлены изополя прогибов плит.

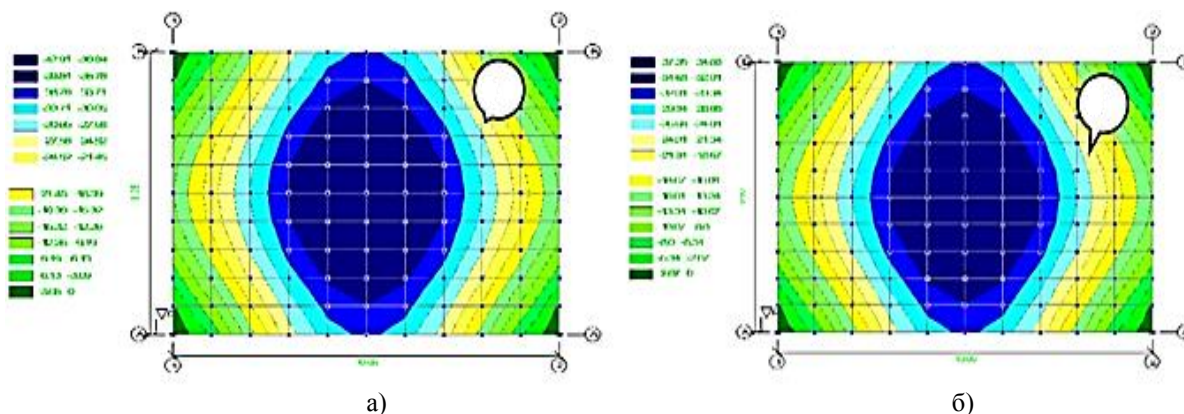


Рис. 3

№ ячейки	Отношение сторон a/b	Размеры сторон, м		Прогибы центра плиты, мм		Снижение прогибов, %
		a	b	без преднапряжения f_1	с преднапряжением f_2	
1	1	9	9	39,51	34,57	12,50
2	1,25	10,06	8,05	42,91	37,35	12,96
3	1,5	11,02	7,35	51,0	44,54	12,67
4	1,75	11,90	6,81	61,89	54,02	12,72
5	2,0	12,73	6,36	74,91	65,26	12,88

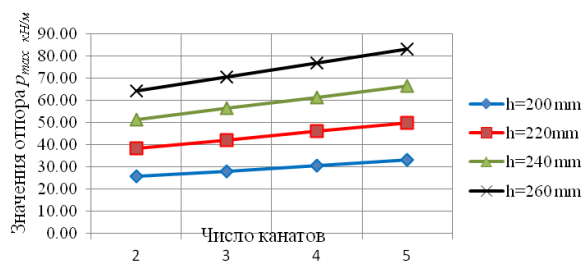


Рис. 4

Из выражения (5) видно, что влияние предварительно напряженной арматуры на прогибы обусловлено величиной r_{max} и формой распределения отпора. При параболической форме расположения каната $r_{max} = 4N_{sp}f/l$, основными факторами, влияющими на отпор и, следовательно, на уменьшение прогибов являются усилие преднапряжения N_{sp} и суммарный прогиб $f = f_a + f_0$.

Изменение конфигурации ячеек практически не сказывается на эффекте уменьшения прогибов, и при указанных отношениях сторон и усилиях преднапряжения от трех канатов снижение прогибов составляет 12,0...13,0% (табл. 1). Прогибы центра плит с преднапряжением арматуры 3Ø15К70, $N_{sp} = 601,0$ кН и без преднапряжения показаны в табл. 1.

Из рис. 4 (максимальные значения r_{max} в зависимости от количества канатов и толщины плиты) видно, что наиболее существенным параметром, влияющим на отпор, является начальный провис f_0 , связанный с высотой сечения плиты h . Так, изменение толщины с 200 до 260 мм увеличивает значение отпора в 2,5 раза, например, при трех канатах от $r_{max} = 28,18$ до $r_{max} = 70,45$ кН/м, что уменьшает прогибы плиты на 25...30%.

ВЫВОДЫ

1. Таким образом, при выборе схемы раскладки высокопрочной арматуры для прямоугольных ячеек с различным соотношением сторон следует учитывать равнозначность влияния отпорных сил и отдавать предпочтение диагональному расположению, как более экономичному, а количество канатов подбирать, исходя из требуемого уменьшения прогибов.

2. Для увеличения эффекта отпора при проектировании плит безбалочных перекрытий с предварительно напряженной арматурой без сцепления с бетоном следует при укладке канатов стремиться к получению максимального начального провиса (эксцентриситета).

ЛИТЕРАТУРА

- СП 52-103-2007. Железобетонные монолитные конструкции зданий. – 2007.
- La norme NBN EN 1992-1-1. Eurocode 2. – 1998.
- Manual for the Design of Concrete Building Structures to Eurocode 2 // Institution of Structural Engineers. – London, 2006.
- BS8110. British Standard. Structural use of concrete, 2010.
- ACI 318-05. Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary. – 2004.
- Дзюба И.С., Ватин Н.И., Кузнецов В.Д. Монолитное большепролетное ребристое перекрытие с постнапряжением // Инженерно-строительный журнал. – 2008, № 1. С. 5...12.
- Кишиневская Е.В., Ватин Н.И., Кузнецов В.Д. Усиление строительных конструкций с использованием постнапряженного железобетона. // Инженерно-строительный журнал. – 2009, №3. С. 29...32.
- Muttoni Aurelio. Conception et dimensionnement de la precontrainte // Ecole polytechnique federale. – Lausanne, 2012.
- Paille G.M. Calcul des structures en beton arme // AFNOR. – 2013.

10. *Seinturiere P.* Etat Limite de service // IUT. Génie. Civil de Grenoble. – 2006.

11. *Морозов А.* BIM в России: преднапряженный железобетон – два подхода при моделировании в Revit-Robot [Электронный ресурс] / Режим доступа: <http://bim-fea.blogspot.ru/2012/09/bim-revit-robot.html>.

12. *Баркая Т.Р., Бровкин А.В., Гавриленко А.В., Скудалов П.А.* Предварительное напряжение монолитных железобетонных конструкций арматурой, не имеющей сцепления с бетоном // Мат. Всероссийск. научн.-практ. конф.: Саморазвивающаяся среда технического вуза: научные исследования и экспериментальные разработки. – В 3-х частях. – Тверь, 2016.

13. *Портаев Д.В.* Расчет и конструирование монолитных преднапряженных конструкций гражданских зданий. – М.: АСВ, 2011.

14. *Портаев Д.В.* Опыт расчета монолитных преднапряженных конструкций в программном комплексе SCAD с использованием метода эквивалентных нагрузок [Электронный ресурс] Режим доступа: <http://scadsoft.com/download/Portaev2012.pdf>.

15. *Ситников С.Л., Мирюшенко Е.Ф.* Способ изготовления предварительно напряженных железобетонных конструкций и моностренд [Электронный ресурс] / Патент на изобретение № 2427686. М., 2011. Режим доступа <http://www.freepatent.ru/patents/2427686>.

16. ТКП 45-5.03-135–2009 (02250). Железобетонные предварительно напряженные конструкции без сцепления арматуры с бетоном. Правила проектирования. Министерство архитектуры и строительства Республики Беларусь. – Минск, 2010.

17. ETA-03/0036. Post-tensioning kit for prestressing of structures with unbonded monostrands for concrete. – 2004.

18. *Бардышева Ю.А., Кузнецов В.С., Талызова Ю.А.* Конструктивные решения безбалочных безкапитальных перекрытий с предварительно напряженной арматурой // Вестник МГСУ. – 2014, №6. С.44...51.

19. *Кремнев В.А., Кузнецов В.С., Талызова Ю.А.* Особенности распределения напряжений в плите безбалочного перекрытия от усилия преднапряжения // Вестник МГСУ. – 2014, №9. С. 48...53.

20. *Тамразян А.Г., Филимонова Е.А.* Структура целевой функции при оптимизации железобетонных плит с учетом конструкционной безопасности // Промышленное и гражданское строительство. – 2013, № 9. С. 14...15.

21. *Tamrazyan A., Filimonova E.* Searching method of optimization of bending reinforced concrete slabs with simultaneous assessment of criterion function and the boundary conditions // Applied Mechanics and Materials. –V. 467, 2014. P. 404...409.

22. *Tamrazyan A.G.* The assessment of reliability of punching reinforced concrete beamless slabs under the influence of a concentrated force at high temperatures // Procedia Engineering. – V. 153, 2016. P. 715...720.

23. *Кузнецов В.С., Шапошникова Ю.А.* К определению напряжений в арматуре без сцепления с бе-

тоном в безбалочных перекрытиях // Промышленное и гражданское строительство. – 2015, №3. С.50...53.

24. *Кузнецов В.С., Шапошникова Ю.А.* К определению напряженно-деформированного состояния безбалочных перекрытий со смешанным армированием // Промышленное и гражданское строительство. – 2016, №2. С. 54...57.

25. *Кузнецов В.С., Шапошникова Ю.А.* К определению прогибов безбалочных перекрытий, армированных преднапряженной диагональной арматурой без сцепления с бетоном // Научное обозрение. – 2015, №21. С. 50...55.

26. *Кузнецов В.С., Шапошникова Ю.А.* Прочность преднапряженного монолитного безбалочного перекрытия в стадиях изготовления и разрушения // Системные технологии. – 2016, №1/18. С.85...92.

27. *Kuznetsov V.S., Shaposhnikova Yu.A.* On the definition deflections of monolithic slabs with the mixed reinforcing at the stage of limit equilibrium // MATEC Web of Conferences (Web of Science) эл. адрес: <http://www.matec-conferences.org/>, 2016.

28. *Карпиловский В.С.* SCAD OFFICE. Вычислительный комплекс Scad. – М.: АСВ, 2011. С.274...283.

REFERENCES

1. SP 52-103–2007. Zhelezobetonnye monolitnye konstrukcii zdaniy. – 2007.

2. La norme NBN EN 1992-1-1. Eurocode 2. – 1998.

3. Manual for the Design of Concrete Building Structures to Eurocode 2 // Institution of Structural Engineers. – London, 2006.

4. BS8110. British Standart. Structural use of concrete, 2010.

5. ACI 318-05. Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary. – 2004.

6. *Dzjuba I.S., Vatin N.I., Kuznecov V.D.* Monolitnoe bol'sheproletnoe rebristoe perekrytie s postnaprjazheniem // Inzhenerno-stroitel'nyj zhurnal. – 2008, № 1. S. 5...12.

7. *Kishinevskaja E.V., Vatin N.I., Kuznecov V.D.* Usilenie stroitel'nyh konstrukcij s ispol'zovaniem postnaprjazhennogo zhelezobetona. // Inzhenerno-stroitel'nyj zhurnal. – 2009, №3. S. 29...32.

8. *Muttoni Aurelio.* Conception et dimensionnement de la precontrainte // Ecole polytechnique federale. – Lausanne, 2012.

9. *Paille G.M.* Calcul des structures en beton arme //AFNOR. – 2013.

10. *Seinturiere R.* Etat Limite de service // IUT. Génie. Civil de Grenoble. – 2006.

11. *Morozov A.* BIM v Rossii: prednaprjazhennyj zhelezobeton – dva podhoda pri modelirovanii v Revit-Robot [Elektronnyj resurs] / Rezhim dostupa: <http://bim-fea.blogspot.ru/2012/09/bim-revit-robot.html>.

12. Barkaja T.R., Brovkin A.V., Gavrilenko A.V., Skudalov P.A. Predvaritel'noe naprjazhenie monolitnyh zhelezobetonnyh konstrukcij armaturoj, ne imejushhej sčeplenija s betonom // *Mat. Vserossijsk. nauchn.-prakt. konf.: Samorazvivajushhajasja sreda tehničeskogo vuza: nauchnye issledovanija i jeksperimental'nye razrabotki.* – V 3-h chastjah. – Tver', 2016.
13. Portaev D.V. Raschet i konstruirovanie monolitnyh prednaprjazhennyh konstrukcij grazhdanskih zdaniy. – M.: ASV, 2011.
14. Portaev D.V. Opyt rasčeta monolitnyh prednaprjazhennyh konstrukcij v programmnom komplekse SCAD s ispol'zovaniem metoda jekvivalentnyh zagruženij [Jelektronnyj resurs] Rezhim dostupa: <http://scadsoft.com/download/Portaev2012.pdf>.
15. Citnikov S.L., Mirjushenko E.F. Sposob izgotovlenija predvaritel'no naprjazhennyh zhelezobetonnyh konstrukcij i monostrend [Jelektronnyj resurs] / Patent na izobrenenie № 2427686. M., 2011. Rezhim dostupa <http://www.freepatent.ru/patents/2427686>.
16. ТКР 45-5.03-135–2009 (02250). Zhelezobetonnye predvaritel'no naprjazhennye konstrukcii bez sčeplenija armatury s betonom. Pravila proektirovanija. Ministerstvo arhitektury i stroitel'stva Respubliki Belarus'. – Minsk, 2010.
17. ETA-03/0036. Post-tensioning kit for prestressing of structures with unbonded monostrands for concrete. – 2004.
18. Bardysheva Ju.A., Kuznecov V.S., Talyzova Ju.A. Konstruktivnye reshenija bezbalochnyh bezkapitel'nyh perekrytij s predvaritel'no naprjazhennoj armaturoj // *Vestnik MGSU.* – 2014, №6. S. 44...51.
19. Kremnev V.A., Kuznecov V.S., Talyzova Ju.A. Osobennosti raspredelenija naprjazhenij v plite bezbalochnogo perekrytija ot usilija prednaprjazhenija // *Vestnik MGSU.* – 2014, №9. S. 48...53.
20. Tamrazjan A.G., Filimonova E.A. Struktura celevoj funkcii pri optimizacii zhelezobetonnyh plit s uchetom konstrukcionnoj bezopasnosti // *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo.* – 2013, № 9. S. 14...15.
21. Tamrazyan A., Filimonova E. Searching method of optimization of bending reinforced concrete slabs with simultaneous assessment of criterion function and the boundary conditions // *Applied Mechanics and Materials.* – V. 467, 2014. P. 404...409.
22. Tamrazyan A.G. The assessment of reliability of punching reinforced concrete beamless slabs under the influence of a concentrated force at high temperatures // *Procedia Engineering.* – V. 153, 2016. P.715...720.
23. Kuznecov V.S., Shaposhnikova Ju.A. K opredeleniju naprjazhenij v armature bez sčeplenija s betonom v bezbalochnyh perekrytijah // *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo.* – 2015, №3. S. 50...53.
24. Kuznecov V.S., Shaposhnikova Ju.A. K opredeleniju naprjazhenno-deformirovannogo sostojanija bezbalochnyh perekrytij so smeshannym armirovaniem // *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo.* – 2016, №2. S. 54...57.
25. Kuznecov V.S., Shaposhnikova Ju.A. K opredeleniju progibov bezbalochnyh perekrytij, armirovannyh prednaprjazhennoj diagonal'noj armaturoj bez sčeplenija s betonom // *Nauchnoe obozrenie.* – 2015, №21. S. 50...55.
26. Kuznecov V.S., Shaposhnikova Ju.A. Prochnost' prednaprjazhennogo monolitnogo bezbalochnogo perekrytija v stadijah izgotovlenija i razrushenija // *Sistemnye tehnologii.* – 2016, №1/18. S. 85...92.
27. Kuznetsov V.S., Shaposhnikova Yu.A. On the definition deflections of monolithic slabs with the mixed reinforcing at the stage of limit equilibrium // *MATEC Web of Conferences (Web of Science)* jel. adres: <http://www.matec-conferences.org/>, 2016.
28. Karpilovskij V.S. SCAD OFFICE. Vychislitel'nyj kompleks Scad. – M.: ASV, 2011. S. 274...283.

Рекомендована кафедрой железобетонных и каменных конструкций. Поступила 15.04.18.