



УДК 624.046.3:624.078.34

Расчет прочности шпоночных соединений элементов перекрытия конструктивной системы «АРКОС»

Оксана Александровна ДОВЖЕНКО, кандидат технических наук, доцент, e-mail: O_O_Dovzhenko@mail.ru

Владимир Владимирович ПОГРЕБНОЙ, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, e-mail: V.V.Pogrebnoy@mail.ru

Юлия Владимировна ЧУРСА, аспирантка, e-mail: Jylia21@mail.ru

Полтавский национальный технический университет им. Ю. Кондратюка, Украина, 36011 Полтава, Первомайский просп., 24

Аннотация. На строительном рынке доступного жилья широко распространена сборно-монолитная технология возведения многоэтажных каркасных зданий. Конструктивная система «АРКОС» – один из примеров ее реализации, в которой опирание многопустотных плит на монолитные ригели осуществляется с помощью бетонных шпонок. Совместная работа плит перекрытия между собой и связевыми ригелями также обеспечивается за счет шпоночных соединений. Одно из направлений их совершенствования – разработка эффективной методики расчета. В Полтавском национальном техническом университете предложена общая методика расчета прочности шпоночных стыков бетонных и железобетонных элементов на основе вариационного метода в теории пластичности бетона, которая базируется на рассмотрении характера разрушения и учитывает совокупность определяющих прочность факторов: сопротивление бетона сжатию и растяжению; геометрические параметры шпонок; форму поперечного сечения; угол наклона опорной поверхности; уровень обжатия; количество арматуры и характер ее расположения; число шпонок. Приведен алгоритм решения задачи прочности бетонной (железобетонной) шпонки и составлена таблица для инженерных расчетов. Выполнен расчет прочности стыка опирания многопустотной плиты на монолитный ригель.

Ключевые слова: шпоночные соединения, конструктивная система «АРКОС», теория пластичности, вариационный метод, характер разрушения, прочность.

STRENGTH CALCULATION OF KEYED JOINTS OF FLOOR ELEMENTS OF STRUCTURAL SYSTEM «ARCOS»

Oksana A. DOVZHENKO, e-mail: O_O_Dovzhenko@mail.ru, **Vladimir V. POGREBNOY**, e-mail: V.V.Pogrebnoy@mail.ru

Julia V. CHURSA, e-mail: Jylia21@mail.ru

Poltava National Technical Yuri Kondratyuk University, Pervomajskij prosp., 24, Poltava 36011, Ukrainian

Abstract. The precast-monolithic technology of construction of multi-storey frame buildings is widely presented now at the affordable housing market. The structural system «ARKOS» is one of the examples of its implementation in which the resting of multi-hollow slabs on monolithic beams is realized with the help of concrete keys. Collaboration of the floor slabs and not-load-bearing beams is also provided by the keyed joints. One of the directions of their improvement is a development of efficient calculation method. The Poltava National Technical University proposes a general method for strength calculation of keyed joints of concrete and reinforced concrete elements on the basis of the variation method in the concrete plasticity theory which is based on the consideration of destruction nature and takes into account the set of factors determining the strength: concrete resistance to compression and tension, geometric parameters of keys, shape of cross-section, sloping angle of a supporting surface, level of compression, amount of reinforcement and character of its location, number of keys. An algorithm of solving the strength problem of the concrete (reinforced concrete) key is presented; the table for engineering calculations is made. The calculation of the keyed joints strength bearing of multi-hollow core slabs on monolithic beams has been made.

Key words: keyed joints, structural system «ARKOS», plasticity theory, variational method, destruction nature, strength.

Система «АРКОС» – одна из распространенных конструктивных систем многоэтажных каркасных зданий [1], обладающая следующими особенностями: сборно-монолитные диски перекрытий с применением многопустотных плит выполняют плоскими, без выступающих в объем помещений частей; при сплошном перекрытии толщиной 12–14 см используются пролеты до 7,2 м; при проектирова-

нии дисков перекрытий учитываются реактивные распорные усилия, возникающие под нагрузкой, что позволяет на 30–40 % снизить расход стали на их армирование.

Опирание плит осуществлено на монолитные несущие ригели с помощью бетонных шпонок, образованных в пустотах плит с их торцов при бетонировании ригелей. Совместная работа плит между собой и

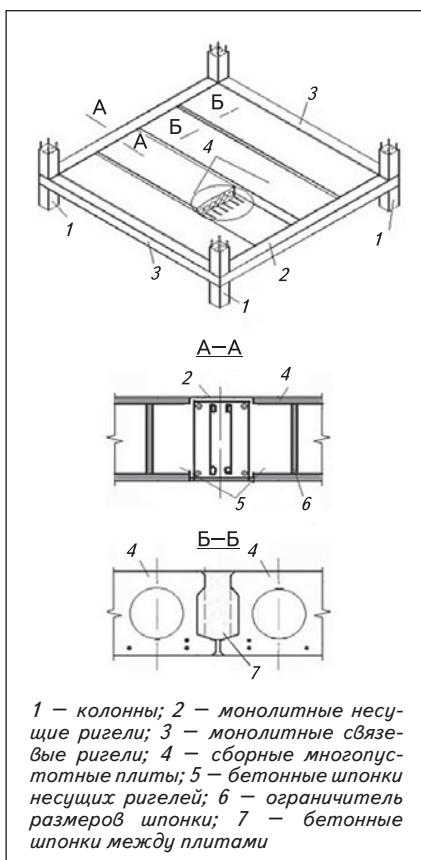


Рис. 1. Фрагмент здания конструктивной системы «ARKOC»

связевыми ригелями также обеспечивается за счет работы шпонок (рис. 1). Цель статьи – разработка общей методики расчета прочности шпоночных соединений, учитывающей специфику их работы в предельном состоянии.

В Полтавском национальном техническом университете предложена методика расчета прочности шпоночных стыков [2], которая базируется на вариационном методе в теории пластичности бетона [3]. Методика рассматривает характер разрушения этих стыков и учитывает полную совокупность факторов прочности: сопротивления бетона сжатию f_{cd} и растяжению f_{ctd} ; геометрические параметры шпонок (длина b_k , глубина l_k , высота h_k) и отношение l_k/h_k ; форму поперечного сечения (прямоугольная, круглая, овальная); угол наклона опорной поверхности ψ (прямоугольные, трапециевидные и треугольные шпонки); уровень обжатия σ/f_{cd} ; количество арматуры $\rho_{sw} = A_{sw}/b_k h_k$, характер ее расположения и нагельный эффект; количество шпонок n_k .

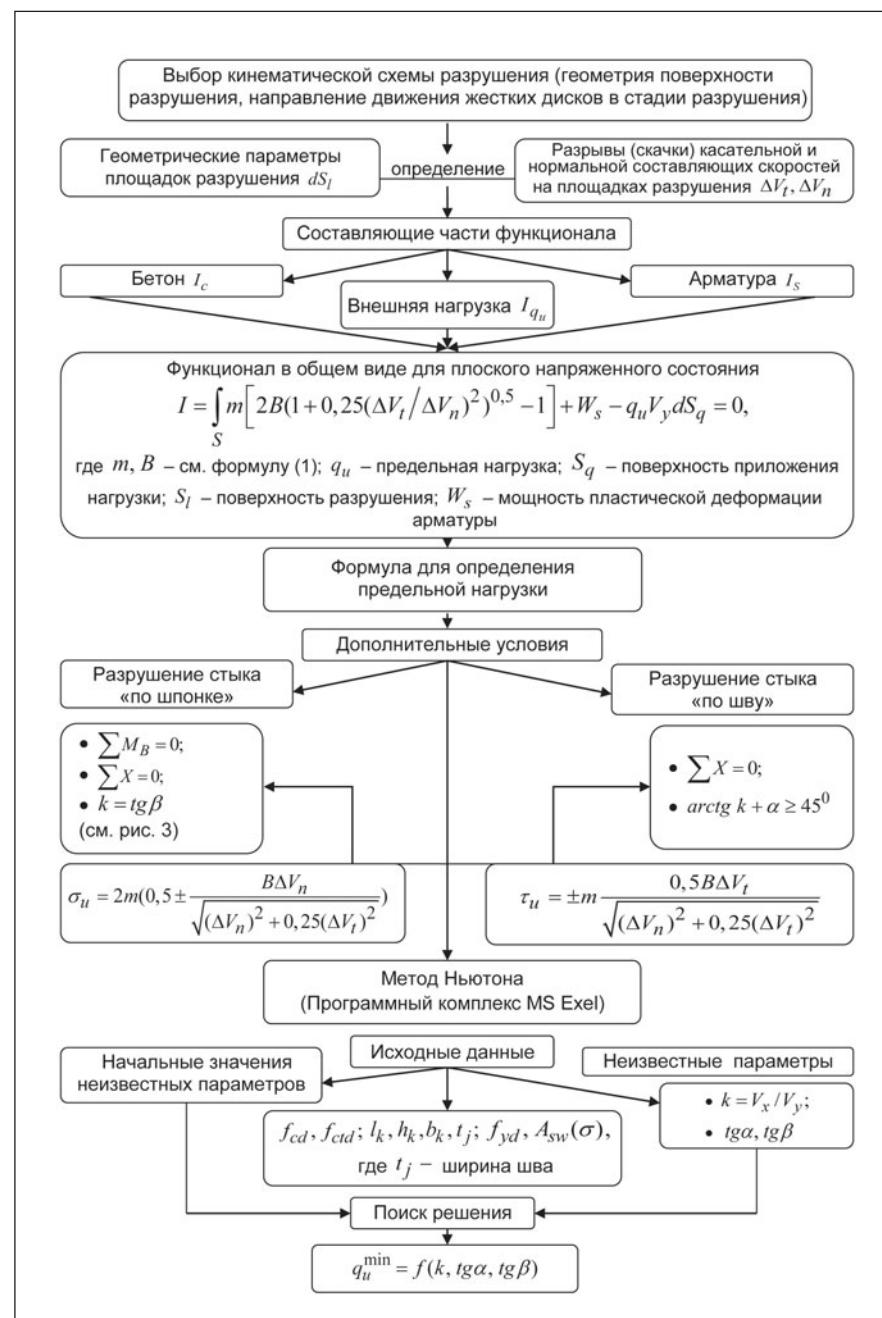


Рис. 2. Алгоритм решения задачи прочности одношпоночных стыков

Последовательность решения задачи прочности одношпоночных стыков приведена на рис. 2.

При разработке методики использована концепция жестко-пластического тела. В качестве условия пластичности бетона принято условие прочности Г. А. Гениева [4], представляющее собой в общем случае уравнение поверхности параболоида вращения, обобщающее классическую теорию Мизеса–Генки на хрупкие материалы и имеющее достаточно простую запись в тензорной форме. Варьируя направлениями скорости перемещения V блоков, разделенных поверхностью разрушения, и ее

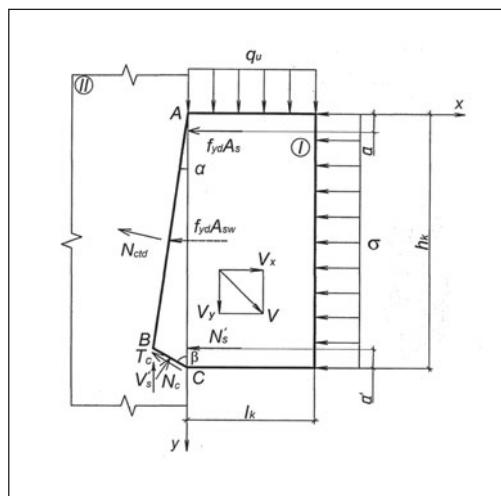


Рис. 3. Кинематическая схема разрушения прямоугольных железобетонных (бетонных) шпонок при срезе

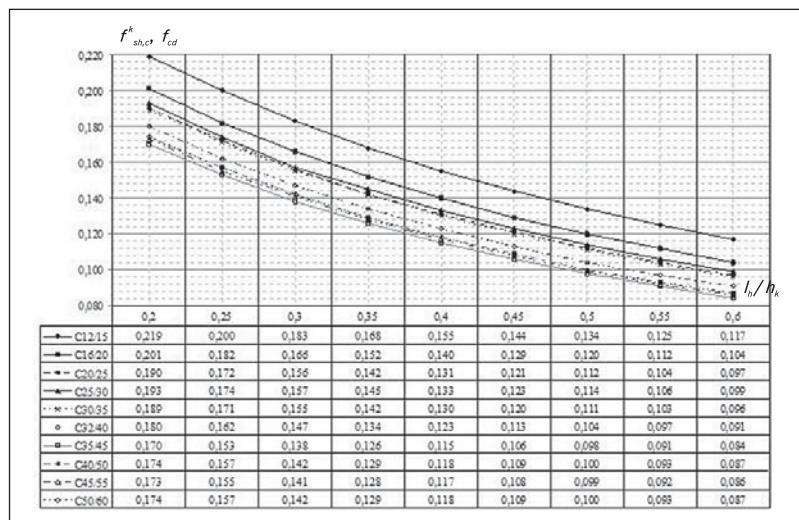


Рис. 4. К определению относительной прочности прямоугольных бетонных шпонок

геометрическими характеристиками, находят минимум мощности пластической деформации, которая соответствует функционалу I на действительном состоянии [2, 3, 5].

Существует два возможных случая разрушения одношпоночного соединения в зависимости от геометрических параметров стыка — по шпонке и по шву.

Кинематическая схема разрушения железобетонной (бетонной) прямоугольной шпонки представлена на рис. 3. Поверхность разрушения задается ломаной ABC. Напряжения на площадке AB принимаются равными сопротивлению бетона растяжению. Направленная пластиическая деформация считается локализованной в тонком слое на линии BC, а разделенные поверхностью разрушения диски I и II приняты жесткими.

Зависимость для определения величины предельной нагрузки шпонки имеет вид:

$$q_u = \left(m[2B\sqrt{(k - \operatorname{tg}\beta)^2 + 0,25(k\operatorname{tg}\beta + 1)^2} - (k - \operatorname{tg}\beta)] \times \frac{1}{\gamma} \right) \times \left(\frac{\operatorname{tg}\alpha}{\operatorname{tg}\alpha + \operatorname{tg}\beta} + f_{ctd}(k + \operatorname{tg}\alpha) \frac{\operatorname{tg}\beta}{\operatorname{tg}\alpha + \operatorname{tg}\beta} + k\sigma + \bar{W}_s \right) \quad (1)$$

где $m = f_{cd} - f_{ctd}$, $B = \sqrt{(1 + \chi/(1 - x)^2)/3}$, $\chi = f_{ctd}/f_{cd}$, $\gamma = l_k/h_k$, \bar{W}_s — составляющая нагрузки, учитывающая влияние армирования, равная:

при расположении арматуры посередине высоты шпонки $f_{yd}A_{sw}k$; при расположении арматуры в два яруса с учетом на-
 $b_k h_k$

гельного эффекта арматуры нижнего ряда [6–8]: $\frac{f_{yd}A_s k}{b_k h_k} + \frac{f_{yd}A'_s k_c}{b_k h_k} \left(1 + \frac{k^2}{4k_c^2}\right)$, $k_c = 0,338$ — для тяжелых бетонов;

$k_c = 0,284$ — для бетонов на пористых заполнителях.

Разрушение по наклонным сечениям шпоночных соединений возможно при отношении глубины к

Сравнение прочности стыка многопустотной плиты с несущим ригелем по разным методикам

Вид шпоночного соединения	Разрушающая нагрузка, кН, при расчете по методикам		
	[2]	[13]	[15]
Бетонное	—*	286,7	77,14
Железобетонное	230,16	—**	115,1
Бетонное обжатое	381,15 (до 40%)***	323,97	265,2
Железобетонное обжатое	412,09 (до 35%)***	—**	302,17

* Методика [2] для необжатых бетонных шпонок ограничивает отношение $l_k/h_k = 0,5$.

** Методика [13] не предусматривает учет армирования.

*** В скобках приведен процент снижения прочности стыка при приложении обжатия с эксцентрикситетом, который учитывается в уравнении $\Sigma M_B = 0$.

высоте $l_k/h_k \leq 0,25$ и свободных боковых гранях шпонки; переармировании шпонок поперечной арматурой; наличии замоноличенного шва. Задача прочности шпоночных стыков решается в ПК Excel методом Ньютона.

Для практического использования вариационного метода в инженерных расчетах предложены таблица и графики, с помощью которых можно определить прочность бетонных $f_{sh,c}^k$ (рис. 4), железобетонных $f_{sh,s}^k$ и обжатых $f_{sh,\sigma}^k$ шпонок в зависимости от соотношения их размеров l_k/h_k , класса бетона замоноличивания, уровня обжатия σ/f_{cd} и площади сечения поперечной арматуры A_{sw} [9].

Кинематическая схема разрушения шпонок и величина теоретической нагрузки нашли подтверждение в материалах исследований [10–12].

Рассмотрим соединение круглопустотных плит с несущими ригелями системы «АРКОС». Расчет на действие вертикальной нагрузки проводится на срез и смятие. При этом характеристикистык следующие: диаметр шпонки (пустоты плиты) $d = 159$ мм, глубина шпонки $l_k = 100$ мм, бетон замоноличивания класса С25/30: $f_{cd} = 15,3$ МПа, $f_{ctd} = 1,08$ МПа при $\gamma_{c1} = 0,9$.

Предложенная методика [2] позволяет учесть уровень и место приложения обжатия, форму профиля и поперечного сечения шпонки. Величина распора находится согласно [13].

Существует ряд патентов, предлагающих усовершенствовать стык плиты с монолитным ригелем путем армирования шпонки плоскими или пространственными каркасами, например [14]. Исходя из минимального процента армирования 0,05 % согласно СНиП 2.03.01.84* принимается 2ØBр-I.

Результаты расчета прочности стыка по разным методикам для плиты шириной 1,5 м приведены в таблице.

Таким образом, для шпоночного соединения «плита–ригель» системы «АРКОС» установлено следующее:

- Еврокод [15] существенно занижает расчетную прочность по сравнению с [13];
- учет геометрии поверхности разрушения свиде-

тельствует о снижении прочности шпонки с круглым поперечным сечением на 10,5 % по сравнению с приведенным квадратным [2];

- обжатие и армирование существенно повышают прочность стыка, при этом значение разрушающей нагрузки в [2] и [15] сближаются с ростом уровня обжатия;
- учет места приложения обжатия по высоте шпонки также выступает определяющим фактором прочности стыка;
- все методики дают запас прочности соединения, что свидетельствует о его надежности.

Выводы

1. Разработана общая методика расчета прочности шпоночных соединений на основе вариационного метода в теории пластичности бетона, учитывающая специфику их работы в предельном состоянии.

2. При расчете шпоночного стыка опирания многоштотной плиты на монолитный ригель учтены конструктивные особенности соединения: круглое сечение, соотношение глубины шпонки к высоте, уровень обжатия, место его приложения, армирование, а также обе характеристики прочности бетона замоноличивания. Полученные результаты позволяют усовершенствовать конструкцию стыка.

ЛИТЕРАТУРА

1. Сборно-монолитная каркасная система МВБ-01 с плоскими перекрытиями для зданий различного назначения: Сер. Б1.020.1-7. Минск: НИЭП ГП БелНИИС, 1998. 25 с.
2. Довженко О. О., Погребний В. В., Чурса Ю. В. Методика розрахунку шпонкових з'єднань залізобетонних елементів [Методика расчета шпоночных соединений железобетонных элементов] // Вісник національного університету «Львівська політехніка». «Теорія і практика будівництва». 2013. № 755. С. 111–117.
3. Митрофанов В. П. Вариационный метод в теории идеальной пластичности бетона // Строительная механика и расчет сооружений. 1990. № 6. С. 23–28.
4. Гениев Г. А., Кисюк В. Н., Тюпин Г. А. Теория пластичности бетона и железобетона. М.: Стройиздат, 1974. 316 с.
5. Довженко О. О., Погребний В. В. До питання визначення межі реалізації зрізової форми руйнування бетонних елементів [К вопросу определения границы реализации срезовой формы разрушения бетонных элементов] // Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури. 2012. Вип. № 47. С. 406–417.
6. Довженко О. О. Міцність шпонкових з'єднань бетонних і залізобетонних елементів: експериментальні дослідження [Прочность шпоночных соединений бетонных и железобетонных элементов: экспериментальные исследования] // Сборник научных трудов Саратовского государственного технического университета. Серия: Строительство. Вып. 10. Саратов: СГТУ, 2014. С. 279–284.
7. Ашкинадзе Г. И., Соколов М. Е., Мартынова Л. Д. [и др.]. Железобетонные стены сейсмостойких зданий. Исследование и основы проектирования. М.: Стройиздат, 1988. 504 с.
8. Norimoto T., Katori K., Hayashi S. Analytical study on relations between form and shear behavior of shear key on joints of precast concrete structure [Аналитическое исследование зависимости поведения при срезе от формы шпоночных стыков сборных железобетонных конструкций] // J. Structural Constructors Engineering, Architectural Institute of Japan. 1996. № 9. Рр. 835–836.
9. Довженко О. А., Погребной В. В., Карабаш Л. В. Сравнительный анализ расчета прочности бетонных (железобетонных) шпонок по существующим методикам // Ресурсо- и энергоэффективные технологии в строительном комплексе региона: сб. науч. тр. по материалам Междунар. науч.-практич. конф. Саратов: СГТУ, 2014. С. 279–284.
10. Ibrahim I.S., Padil K. H., Mansoor H., Bady A., Saim A. A., Sarbini N. Ultimate shear capacity and failure of shear keys connection in precast concrete construction [Несущая способность и разрушение при срезе шпоночных стыков сборных железобетонных конструкций]. Malaysian Journal of Civil Engineering, 2014, no. 26 (3), pp. 414–430.

11. Jorgensen H. B., Hoang Linh Cao. Load carrying capacity of keyed joints reinforced with high strength wire rope loops [Несущая способность шпоночных стыков, армированных высокопрочными канатными петлями]. In Proceedings of fib Symposium Concrete – Innovation and Design, Copenhagen, May 18–20, 2015. 13 p.
12. Araujo D. L., Debs M. K. Strength of shear connection in composite bridges with precast decks using high performance concrete and shear-keys [Прочность при срезе шпоночных соединений композитных мостов с использованием сборных железобетонных настилов из высокопроизводительных бетонов]. *Materials and Structures*, 2005, vol 38, no. 3, pp. 173–181.
13. Указания по проектированию сборно-монолитного каркаса: Сер. Б1.020.1-7. Вып. 0-1. Минск: НИЭП ГП БелНИИС, 1999. 20 с.
14. Патент на корисну модель 23418 МПК-2011.01 E04G 23 / 00. Спосіб улаштування збірно-монолітного заливобетонного перекриття [Способ устройства сборно-монолитного железобетонного перекрытия] / Куліченко І. І., Савицький М. В. ПДАБА. Опубл. 25.05.2007. Бюл. № 7.
15. EN 1990:1992. Eurocode 2. Part 1. Design of concrete structures [Проектирование железобетонных конструкций].

РЕФЕРЕНЦІЇ

1. Sbornono-monolitnaya karkasnaya sistema MVB-01 s ploskimi perekrytiyami dlya zdaniy razlichnogo naznacheniya [Precast frame system DHS-01 with flat slabs for various buildings]. Ser. B1.020.1-7. Minsk, NIEP GP BelNIIS Publ., 1998. 25 p. (In Russian).
2. Довженко О. О., Погребний В. В., Чурса Ю. В. Методика розрахунку шпонкових з'єднань залізобетонних елементів. Вісник національного університету «Львівська політехніка». «Теорія і практика будівництва», 2013, № 755, pp. 111–117. (In Ukrainian).
3. Mitrofanov V. P. Variational method in the theory of ideal plasticity concrete. *Stroitel'naya mekhanika i raschet sooruzheniy*, 1990, no. 6, pp. 23–28. (In Russian).
4. Geniev G. A., Kislyuk V. N., Tyupin G. A. Teoriya plastichnosti betona i zhelezobetona [Theory of plasticity of concrete and reinforced concrete]. Moscow, Stroyizdat Publ., 1974. 316 p. (In Russian).
5. Довженко О. О., Погребний В. В. До питання визначення межі реалізації зрізової форми руйнування бетонних елементів. Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури, 2012, № 47, pp. 406–417. (In Ukrainian).
6. Довженко О. О. Міцність шпонкових з'єднань бетонних і залізобетонних елементів: експериментальні дослідження. Poltava, PoltNTU im. Yu. Kondratyuka Publ., 2015. 181 p. (In Ukrainian).
7. Ashkinadze G. I., Sokolov M. E., Martynova L. D., et al. Zhelezobetonnye steny seysmostoykikh zdaniy. Issledovanie i osnovy proektirovaniya [Reinforced concrete walls of earthquake-resistant buildings. Research and design principles]. Moscow, Stroyizdat Publ., 1988. 504 p. (In Russian).
8. Norimono T., Katori K., Hayashi S. Analytical study on relations between form and shear behavior of shear key on joints of precast concrete structure. *J. Structural Constructors Engineering. Architectural Institute of Japan*, 1996, no. 9, pp. 835–836. (In Russian).
9. Dovzhenko O. A., Pogrebnoy V. V., Karabash L. V. Comparative analysis of calculation of strength of concrete (reinforced concrete) dowels according to the existing methods. *Resursno- i energoeffektivnye tekhnologii v stroitel'nom kompleksie regiona* [Resource- and energy-efficient technologies in the construction complex of the region]. Sb. nauch. tr. po materialam Mezhdunar. nauch.-prakt. konf. Saratov, SGTU Publ., 2014. pp. 279–284. (In Russian).
10. Ibrahim I.S., Padil K. H., Mansoor H., Bady A., Saim A. A., Sarbini N. Ultimate shear capacity and failure of shear keys connection in precast concrete construction. *Malaysian Journal of Civil Engineering*, 2014, no. 26(3), pp. 414–430.
11. Jorgensen H. B., Hoang Linh Cao. Load carrying capacity of keyed joints reinforced with high strength wire rope loops. Proc. of fib Symposium Concrete – Innovation and Design, Copenhagen, May 18–20, 2015. 13 p.
12. Araujo D. L., Debs M. K. Strength of shear connection in composite bridges with precast decks using high performance concrete and shear-keys. *Materials and Structures*, 2005, vol 38, no. 3, pp. 173–181.
13. Ukarazaniya po proektirovaniyu sbornono-monolitnogo karkasa [Guidelines for the design of precast-monolithic frame]. Ser. B1.020.1-7. Vol. 0-1. Minsk, NIEP GP BelNIIS Publ., 1999. 20 p. (In Russian).
14. Vlasnik patentu № 23418. Sposib ulashtuvannya zbirno-monolitnogo zalizobetonnogo perekrittya MPK-2011.01. Kulichenko I. I., Savits'kiy M. V. Declared 25.05.2007. Byul. no. 7. (In Ukrainian).
15. EN 1992-1-1. Eurocode 2. Design of concrete structures. Part 1. 1992.

Для цитирования: Довженко О. А., Погребной В. В., Чурса Ю. В. Расчет прочности шпоночных соединений элементов перекрытия конструктивной системы «АРКОС» // Промышленное и гражданское строительство. 2017. № 2. С. 70–74.

For citation: Dovzhenko O. A., Pogrebnoy V. V., Chursa Ju. V. Strength calculation of keyed joints of floor elements of structural system «ARCOS». *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo* [Industrial and Civil Engineering], 2017, no. 2, pp. 70–74. (In Russian). ■