

УДК 624.012.4

DOI: 10.30838/J.BPSACEA.2312.261021.61.802

## МІЦНІСТЬ БЕТОНУ ЗА МІСЦЕВОГО СТИСНЕННЯ З УРАХУВАННЯМ ВІДНОШЕННЯ ВИСОТИ ЕЛЕМЕНТА ДО РОЗМІРУ ДІЛЯНКИ НАВАНТАЖЕННЯ

КУЗНЕЦОВА І. Г.<sup>1\*</sup>, асп.,

ДОВЖЕНКО О. О.<sup>2</sup>, канд. техн. наук, проф.,

ПОГРІБНИЙ В. В.<sup>3</sup>, канд. техн. наук, с. н. с.

<sup>1\*</sup> Кафедра будівельних конструкцій, Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка», пр. Першотравневий, 24, 36011, Полтава, Україна, тел. +38 (095) 664-18-89, e-mail: [oldfieldeik@gmail.com](mailto:oldfieldeik@gmail.com), ORCID ID: 0000-0002-5859-4636

<sup>2</sup> Кафедра будівельних конструкцій, Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка», пр. Першотравневий, 24, 36011, Полтава, Україна, тел. +38 (050) 982-58-54, e-mail: [o.o.dovzhenko@gmail.com](mailto:o.o.dovzhenko@gmail.com), ORCID ID: 0000-0002-2266-2588

<sup>3</sup> Кафедра будівельних конструкцій, Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка», пр. Першотравневий, 24, 36011, Полтава, Україна, тел. +38 (050) 982-58-53, e-mail: [v.v.pogrebnoy1960@gmail.com](mailto:v.v.pogrebnoy1960@gmail.com), ORCID ID: 0000-0001-7531-2912

**Анотація. Постановка проблеми.** Надійність будівель і споруд із залізобетону великою мірою залежить від ефективності конструктивних рішень опорних ділянок та вузлів з'єднання елементів несних систем. При цьому важливе місце відводиться розгляду питань забезпечення їх несної здатності. Одним із напрямків вирішення цієї проблеми виступає підвищення характеристик міцності бетону, зокрема, шляхом використання базальтової фібри. **Мета статті** – удосконалення методу розрахунку міцності бетонних елементів за місцевого стиснення на загальній теоретичній основі й уточнення впливу на міцність визначальних факторів. **Висновок.** Для розрахунку міцності бетонних елементів за місцевого стиснення перспективною виступає теорія пластичності бетону. Запропоновано застосування варіаційного методу та принципу віртуальних швидкостей. За даними досліджень на міцність бетону, крім співвідношення площі прикладання навантаження та площі поперечного перерізу, впливають відношення висоти елемента до ширини штампа й обидві характеристики міцності бетону. Запропоновані кінематичні схеми руйнування знайшли експериментальне підтвердження. Аналіз результатів випробування бетонних елементів та оцінювання їх міцності на основі теорії пластичності дозволив скласти програму експериментального дослідження фібробетону на базальтових волокнах за місцевого стиснення.

**Ключові слова:** міцність бетону; місцеве стиснення; фібробетон; базальтові волокна; варіаційний метод; теорія пластичності

## STRENGTH OF CONCRETE UNDER LOCAL COMPRESSION TAKING INTO ACCOUNT THE RELATIONSHIP OF THE ELEMENT HEIGHT TO THE SIZE OF THE LOADING AREA

KUZNIETSOVA I.H.<sup>1\*</sup>, Postgrad. Stud.,

DOVZHENKO O.O.<sup>2</sup>, Cand. Sc. (Tech.), Prof.,

POHRIBNYI V.V.<sup>3</sup>, Cand. Sc. (Tech.), Senior Res.

<sup>1\*</sup> Department of Building Structures, National University “Yuri Kondratyuk Poltava Polytechnic”, 24, Pershotravnevyy Ave., 36011, Poltava, Ukraine, tel. +38 (095) 664-18-89, e-mail: [oldfieldeik@gmail.com](mailto:oldfieldeik@gmail.com), ORCID ID: 0000-0002-5859-4636

<sup>2</sup> Department of Building Structures, National University “Yuri Kondratyuk Poltava Polytechnic”, 24, Pershotravnevyy Ave., 36011, Poltava, Ukraine, tel. +38 (050) 982-58-54, e-mail: [o.o.dovzhenko@gmail.com](mailto:o.o.dovzhenko@gmail.com), ORCID ID: 0000-0002-2266-2588

<sup>3</sup> Department of Building Structures, National University “Yuri Kondratyuk Poltava Polytechnic”, 24, Pershotravnevyy Ave., 36011, Poltava, Ukraine, tel. +38 (050) 982-58-53, e-mail: [v.v.pogrebnoy1960@gmail.com](mailto:v.v.pogrebnoy1960@gmail.com), ORCID ID: 0000-0001-7531-2912

**Abstract. Formulation of the problem.** Reliability of buildings and structures from reinforced concrete largely depends on efficiency of construction solutions of supporting areas and joins of elements of bearing systems. At the same time, an important place is given to the issues of ensuring their bearing capacity. One of the ways to solve this

problem is to increase the strength characteristics of concrete, in particular by using basalt fiber. *The purpose of the article* is to improve the method of calculating the strength of concrete elements under the local compression on a general theoretical basis and to clarify the impact on the strength of determining factors. *Conclusion.* To calculate the strength of concrete elements under the local compression, the theory of concrete plasticity is promising. The application of the variational method and the principle of virtual velocities is proposed. According to research, the strength of concrete, in addition to the ratio of the area of application of the load and the cross-sectional area, is affected by the ratio of the height of the element to the width of the stamp and both characteristics of concrete strength. The proposed kinematic failure schemes have found experimental confirmation. Analysis of test results of concrete elements and assessment of their strength on the basis of the theory of plasticity allowed making the program of experimental research of fibroconcrete on basalt fibers under local compression.

**Keywords:** *strength of concrete; local compression; fibroconcrete; basalt fibers; variational method; plasticity theory*

**Постановка проблеми.** Надійність будівель і споруд із залізобетону великою мірою залежить від ефективності конструктивних рішень опорних ділянок та вузлів з'єднання елементів несних систем. При цьому важливе місце відводиться розгляду питань забезпечення їх несної здатності.

Один із напрямків вирішення цієї проблеми – підвищення характеристик міцності бетону, зокрема, шляхом використання фібри. Базальтова фібра – одна із найміцніших мінеральних волокон. Вона має низку суттєвих переваг, а саме високі механічні характеристики при досить низькій вартості. Її застосування дозволяє збільшити міцність та зменшити вагу конструкцій. Волокна забезпечують бетону тривимірну міцність, стійкі до фізичних пошкоджень під час перемішування, не піддаються корозії, котра характерна для сталевих фібри, легко розподіляються, не утворюють згустків, на відміну від поліпропілену.

Раціональний вибір розмірів, форми і вмісту волокна дає можливість отримати економічно вигідні матеріали з поліпшеними характеристиками. Згідно з експериментальними дослідженнями [1], оптимальні параметри базальтової фібри такі: довжина 12 мм, діаметр 20 мкм, відсотковий вміст 0,2 % .

Під час передачі великих зосереджених навантажень від ферм, арок і балок на масивні бетонні опори, стіни або колони, в зонах обтискування бетону напружуваною арматурою з анкерами на кінцях, в місцях обпирання колон висотних будівель на

плитні або стовпчасті фундаменти, в стиках збірних колон під центрувальними прокладками й обпиранні важкого технологічного обладнання на фундаменти, при влаштуванні силового поля, при спиранні кріпильних стоек у шахтах і гірничих виробках і в низці інших випадків потрібна перевірка міцності бетону на місцевий стиск. Тому у проектуванні бетонних і залізобетонних конструкцій передбачено їх розрахунок на дію місцевого навантаження. Його мета – надання проектувальнику можливості об'єктивно оцінити ступінь надійності роботи несної конструкції, знизити матеріаломісткість залізобетонної конструкції і навіть, за умови відповідного обґрунтування, відмовитися від місцевого непрямого армування.

Беручи до уваги велике різноманіття випадків роботи елементів за дії місцевого навантаження, котре існує в практиці, в розрахунку міцності слід зважати на специфіку напружено-деформованого стану зони їх руйнування.

**Аналіз досліджень.** Численні експериментально-теоретичні дослідження [2–7] бетонних елементів за місцевого навантаження сприяють більш глибокому вивченню проблеми. Слід зазначити, що найбільш поширений емпіричний підхід до розрахунку міцності, за якого особлива увага приділяється визначенню «розрахункової» площі елемента. Разом із цим існує розуміння щодо необхідності врахування впливу висоти елемента [5; 6], місця розташування навантаження [3], виду бетону [4; 7] та інших факторів впливу. У застосуванні емпіричних залежностей існує

складність урахування багатofакторності впливів і певна неоднозначність в оцінюванні визначальних факторів.

**Мета роботи** – удосконалення методу розрахунку міцності бетонних елементів за місцевого стиснення на загальній теоретичній основі й уточнення впливу на міцність визначальних факторів.

**Методика розрахунку.** Загальну основу для вирішення питань міцності бетону та залізобетону складає механіка твердого деформованого тіла [8]. Для розрахунку міцності за місцевого стиснення застосовується варіаційний метод у теорії ідеальної пластичності, достатньо апробований у Національному університеті «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка» при зрізі [9; 10]. Бетон розглядається як жорстко-пластичне тіло. Пластичні деформації вважаються локалізованими у тонких шарах на поверхні руйнування в стиснутій зоні. Інші області приймаються абсолютно жорсткими.

Аналіз характеру руйнування дослідних зразків за місцевого одностороннього стиснення свідчить, що порушення цілісності починається з переміщення штампа вертикально вниз із подальшим розколюванням і виходом площини відриву на бокові поверхні елемента в наближеній до їх середини частині. На кінематичній схемі руйнування (рис. 1) зразок поділяється на три частини: піраміду під площадкою навантаження, котра переміщується зі швидкістю  $V_1$ , та дві половинки, відокремлені поверхнями розколювання, що переміщуються зі швидкостями  $V_2$  та  $-V_2$ . Площина розколювання проходить через центр ваги зразка паралельно одній із його бічних граней. На площадці розколювання діють напруження, котрі дорівнюють опору бетону осьовому розтягу.

Невідомими даної задачі, крім величини граничного навантаження  $F$ , є відношення швидкостей та кути нахилу поверхонь ковзання до вертикалі  $\gamma$  і  $\gamma_1$ . Стрибки нормальної і дотичної складових швидкості та площі ділянок руйнування виражаються через параметри  $\gamma$  і  $\gamma_1$ .

Характер порушення цілісності елементів такий: спочатку безпосередньо під штампом у стиснутій зоні формується піраміда, котра виділяється в результаті утворення поверхонь ковзання (рис. 1). На бокових гранях піраміди локалізується направлена пластична деформація та реалізується зсув. Зі зростанням навантаження піраміда ущільнюється і діє на іншу частину елемента, як більш жорстке тіло, котре вертикальним тиском і горизонтальним розпором викликає розрив зразка. Подальше переміщення піраміди за висотою елемента спричинює роздроблення бетону за незначного падіння навантаження на низхідній гілці деформування.

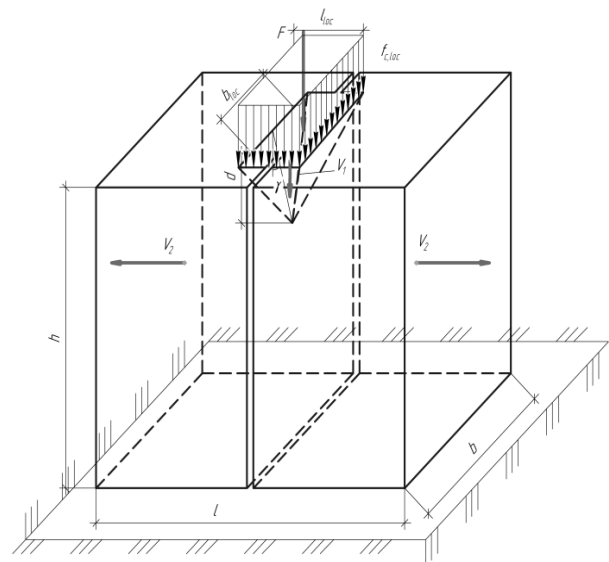


Рис. 1. Кінематична схема руйнування за місцевого стиснення

Таким чином, майже одночасно реалізуються три форми руйнування бетону: зріз, відрив та роздроблення. На всій поверхні руйнування елемента одночасно досягається граничний стан у зоні стиснення та розтягу.

Фунціонал принципу віртуальних швидкостей досліджується на стаціонарний стан, що еквівалентно розв'язанню крайової задачі. Застосовуються розривні рішення. При цьому на поверхні руйнування мають місце стрибки швидкостей як у дотичному, так і нормальному напрямках, що зумовлено дилатансією бетону в стадії руйнування. Стрибки швидкостей у стиснутій зоні в загальному вигляді виражаються через

параметри, котрі залежать від значення кутів напрямку швидкості та поверхні руйнування. Умова міцності в стиснутій зоні розглядається як умова пластичності.

Залежність для обчислення значення опору руйнуванню за місцевого стиснення за умови  $tg\gamma_1 = k_1 tg\gamma$  записується як:

$$f_{c,loc} = \frac{1}{2tg\gamma} \left\{ m \left[ B^2 k + \frac{(1+ktg\gamma)^2}{4(k-tg\gamma)} + \frac{1+k^2(1+k_1^2tg^2\gamma)}{4k_1^2tg\gamma} \right] + f_{ct} \frac{k}{k_1} (\alpha_1 \alpha_2 tg\gamma - k_1) \right\}, \quad (1)$$

де  $B^2 = [1 + \chi / (1 - \chi)^2] / 3$ ,  $\chi = f_{ct} / f_{c,prizm}$ ,  
 $k = V_1 / V_2$ ,  $k_1 = b_{loc} / l_{loc}$ ,  $\alpha_1 = 2h / l_{loc}$ ,  $\alpha_2 = 2b / l_{loc}$ .

У випадку квадратного штампа формула (1) спрощується та набуває вигляду:

$$f_{c,loc} = \frac{1}{2tg\gamma} \left\{ m \left[ B^2 k + \frac{(1+ktg\gamma)^2}{4(k-tg\gamma)} + \frac{1+k^2(1+tg^2\gamma)}{4tg\gamma} \right] + f_{ct} k (\alpha_1 \alpha_2 tg\gamma - 1) \right\}. \quad (2)$$

Значення руйнівного навантаження відповідає мінімуму потужності пластичної деформації в стиснутій зоні.

Результати розв'язання задачі міцності варіаційним методом у теорії пластичності свідчать про вплив на міцність бетону за місцевого стиснення, крім співвідношення площі поперечного перерізу зразка та площі навантаження, також відношення висоти елемента до розміру площадки навантаження. Запропонована кінематична схема (рис. 1) порівняна з картиною руйнування дослідних зразків [2; 5; 1–13].

У разі квадратного та прямокутного штампів за рівномірної передачі навантаження порушення цілісності елемента починається з переміщення штампа вертикально вниз із подальшим розколюванням і виходом площадки відриву на бокові поверхні елемента в наближеній до середини їх частині (рис. 2 а). У випадку

нерівномірної передачі навантаження виникає концентрація напружень біля кутів штампів. Тоді можлива зміна напрямку площини розколювання до кутів елемента (рис. 2б). На вплив концентрації напружень біля прямих кутів штампа вказує також відсутність такої картини руйнування у разі використання штампа круглої форми (рис. 2в).

У Національному університеті «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка» заплановані експериментальні дослідження міцності фібробетону з базальтовою фіброю за місцевого одностороннього центрального стиснення з метою визначення впливу фібри та відношення розмірів ділянки навантаження на характер утворення тріщин і руйнування, а також на величину граничного навантаження зразків.

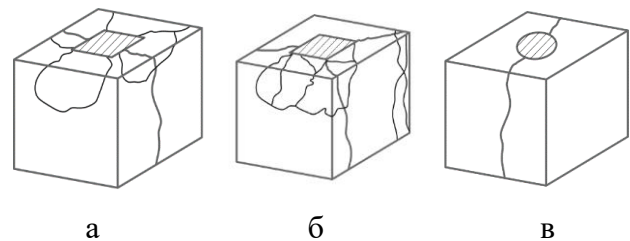


Рис. 2. Узагальнений характер руйнування бетонних зразків за місцевого стиснення: на квадратному штампі з рівномірною (а) та нерівномірною (б) передачею навантаження та круглому штампі (в)

**Програма експериментів** включає випробування стандартних кубів розмірами  $150 \times 150 \times 150$  мм на місцеве одностороннє центральне стиснення, а також призм розмірами  $150 \times 150 \times 600$  мм та  $100 \times 100 \times 800$  мм на стиснення і розтяг відповідно для визначення характеристик міцності бетону та фібробетону. Випробування зразків планується виконувати на гідравлічному пресі ПГ-125 та розривній машині в лабораторії кафедри будівельних конструкцій.

Навантаження на зразок за місцевого стиснення передається через металеві штампи розмірами  $l_{loc} \times b_{loc} = 50 \times 50$  мм,  $50 \times 100$  мм і  $50 \times 150$  мм (рис. 3). Довжина площадки завантаження  $l_{loc}$  при цьому залишається сталою, але змінюється її ширина  $b_{loc}$  (від  $1/3$  розміру сторони

поперечного перерізу зразка до смугового навантаження на всю ширину зразка).

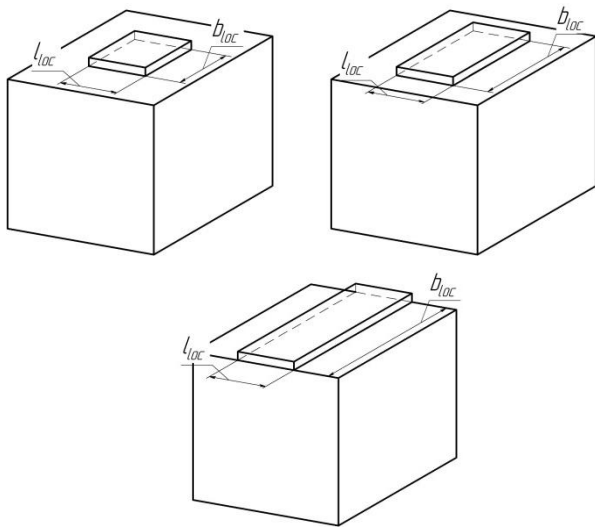


Рис. 3. Схема навантаження кубів розмірами  $150 \times 150 \times 150$  мм через штампи розмірами  $l_{loc} \times b_{loc} = 50 \times 50$  мм,  $50 \times 100$  мм і  $50 \times 150$  мм

Фібробетонні зразки виготовляли за такою технологією: спочатку у бетономішалку порціями закладали цемент і пісок; потім засипали необхідну кількість фібри; далі суху суміш ретельно перемішували; на заключному етапі додавали необхідну кількість води із пластифікатором та заповнювач (щебінь).

Формування зразків проводилося в інвентарних формах із використанням ручного вібратора. Розпалубка відбувалася через 14 діб, протягом яких здійснювався догляд за бетоном. Зразки зберігаються в закритому приміщенні за температури  $15 \dots 18$  °С і з вологістю  $60 \dots 70$  %.

Виготовлено три серії дослідних зразків, склад бетону для яких наведено в таблиці.

Як в'язуче застосовувався портландцемент марки 500, заповнювач – гранітний щебінь Кременчуцького кар'єру і річковий пісок середньої крупності. Пластифікатор – SikaPlast–2508 і базальтова фібра technobasalt РБР-18-Т10/12 з довжиною волокна 12 мм та діаметром волокна –  $18 \pm 2$  мкм.

Таблиця

#### Склад бетонної суміші для виготовлення зразків

№ замісу	Компоненти на м <sup>3</sup>	Кількість
1	Цемент М500, кг	520
	Щебінь крупності 2...5 мм, кг	1 440
	Пісок, кг	370
	Пластифікатор «SikaPlast 2508», л	2,5
	Базальтова фібра, кг	16,7
2	Цемент М500, кг	520
	Щебінь крупності 2...5 мм, кг	1 440
	Пісок, кг	370
	Пластифікатор «SikaPlast 2508», л	2,38
	Вода, л	240
3	Цемент М500, кг	520
	Щебінь крупності 2...5 мм, кг	1 440
	Пісок, кг	370
	Вода, л	250

Всього виготовлено 21 зразок: першого складу 9, другого 5 і третього складу 7 зразків.

У результаті проведення досліджень планується отримати нові експериментальні дані про характер утворення тріщин і картину руйнування фібробетонних зразків, величину зусилля, яке ними сприймається, та порівняти їх із даними для елементів із важкого бетону аналогічного складу, але без застосування фібри.

**Висновки.** Для розрахунку міцності бетонних елементів за місцевого стиснення перспективною бачиться теорія пластичності бетону. Запропоновано застосування варіаційного методу та принципу віртуальних швидкостей. За даними досліджень, на міцність бетону, крім співвідношення площі прикладання навантаження та площі поперечного перерізу, впливають відношення висоти елемента до ширини штампа й обидві характеристики міцності бетону.

Запропоновані кінематичні схеми руйнування знайшли експериментальне підтвердження. Аналіз результатів випробування бетонних елементів та оцінювання їх міцності на основі теорії пластичності дозволив скласти програму експериментального дослідження фібробетону на базальтових волокнах за місцевого стиснення.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Перфилов В. А. Мелкозернистые фибробетоны. Волгоград : ВолгГАСУ, 2015. 127 с.
2. Ince R., Arici E. Size Effect in Bearing Strength of Concrete Cubes. *Construction and Building Materials*. 2004. № 18. Pp. 603–609. doi:10.12989/sem.2005.19.5.567.
3. Venckevicius V. About the Calculation of Concrete Elements Subjected to Local Compression. *Journal of Civil Engineering and Management*. 2005. № 11 (3). Pp. 243–248. doi:10.3846/13923730.2005.9636355.
4. Рак Н. А. Методика расчета сопротивления сталефибробетонных элементов местному сжатию. *Вестник Полоцкого государственного университета. Строительство. Прикладные науки. Строительные конструкции*. 2017. № 16. С. 93–97.
5. Au T., Baird D. L. Bearing Capacity of Concrete Blocks. *Journal of the America Concrete Institute*. 1960. № 56. Pp. 869–880.
6. Roberts-Wolimann C. L., Banta T., Bonetti R., Charney F. Bearing Strength of Light-Weight Concrete. *ACI Materials Journal*. 2006. № 103 (6). Pp. 459–66.
7. Антаков А. Б. Прочность элементов из легких ячеистых бетонов при местном действии нагрузки : дис. на соиск. учен. степ. канд. тех. наук. Казань : КГАСА, 1999. 206 с.
8. Nielsen M. P., Hoang L. C. Limit Analysis and Concrete Plasticity. London : CRC Press, Taylor & Francis Group. 2011. 816 p.
9. Dovzhenko O., Pohribnyi V., Yurko I. Concrete and Reinforced Concrete Strength under Action of Shear, Crushing and Punching Shear. *IOP Conf. Series : Materials Science and Engineering*. 2018. Vol. 463. Pp. 022–026. doi:10.1088/1757-899X/463/2/022026.
10. Довженко О. О., Погрибний В. В., Куриленко О. О. Про можливість застосування теорії пластичності до розрахунку міцності елементів із високоміцного бетону. *Коммунальное хозяйство городов : науч.-техн. сб.* 2012. Вып. 105. Київ : Техніка. С. 74–82.
11. Гладышев Б. М. Механическое взаимодействие элементов структуры и прочность бетона. Харьков : Вища школа, 1987. 168 с.
12. Пирадов А. Б. Конструктивные свойства легкого бетона и железобетона. Москва : Стройиздат, 1973. 133 с.
13. Pohribnyi V., Dovzhenko O., Kuznietsova I., Usenko D. The improved technique for calculating the concrete elements strength under local compression. *MATEC Web of Conferences*. 2018. Vol. 230. Pp. 020–025. doi:10.1051/mateconf/201823002025.

## REFERENCES

1. Perfylov V.A. *Melkozernnyste fibrobetony* [Fine-grained fiber-reinforced concrete]. Volgograd : VolgGASU, 2015, 127 p. (in Russian)
2. Ince R. and Arici E. Size Effect in Bearing Strength of Concrete Cubes. *Construction and Building Materials*. 2004, no. 18, pp. 603–609. doi:10.12989/sem.2005.19.5.567.
3. Venckevicius V. About the Calculation of Concrete Elements Subjected to Local Compression. *Journal of Civil Engineering and Management*. 2005, no. 11 (3), pp. 243–248. doi:10.3846/13923730.2005.9636355.
4. Rak N.A. *Metodyka Rascheta Soprotyvleniya Stalefybробетонnykh Elementov Mestnomu Szhatyiu*. [Method for calculating the resistance of steel fiber concrete elements to local compression]. *Vestnyk Polotskoho Hosudarstvennoho Unyversyteta. Stroytelstvo. Prykladnye Nauky. Stroytelnye Konstruktsyy*. [Bulletin of Polotsk State University. Construction. Applied Sciences. Building construction]. 2017, no. 16, pp. 93–97. (in Russian)
5. Au T. and Baird D.L. Bearing Capacity of Concrete Blocks. *Journal of the America Concrete Institute*. 1960, no. 56, pp. 869–880.
6. Roberts-Wolimann C.L., Banta T., Bonetti R. and Charney F. Bearing Strength of Light-Weight Concrete. *ACI Materials Journal*. 2006, no. 103 (6), pp. 459–466.
7. Antakov A.B. *Prochnost Elementov Yz Lehkykh Yacheystykh Betonov Pry Mestnom Deistvyy Nahruzky : dys. k. t. n.* [Strength of elements made of light cellular concrete under local loading : dis. for a job. learned. step. Cand. Tech. Sc.]. Kazan' : KHASA, 1999, 206 p. (in Russian).
8. Nielsen M.P. and Hoang L.C. Limit Analysis and Concrete Plasticity. London : CRC Press, Taylor & Francis Group. 2011, 816 p.
9. Dovzhenko O., Pohribnyi V. and Yurko I. Concrete and Reinforced Concrete Strength under Action of Shear, Crushing and Punching Shear. *IOP Conf. Series : Materials Science and Engineering*. 2018, vol. 463, pp. 022–026. doi:10.1088/1757-899X/463/2/022026.
10. Dovzhenko O.O., Pohribnyi V.V. and Kurylenko O.O. *Pro mozhyvist zastosuvannia teorii plastychnosti do rozrakhunku mitsnosti elementiv iz vysokomitsnoho betonu* [On the possibility of applying the theory of plasticity to calculate the strength of elements of high-strength concrete]. *Kommunalnoe khoziaistvo horodov : nauchno-*

*tekhnicheskyy sbornyk* [Municipal services of cities : sc. and tech. coll.]. 2012, no. 105, Kyiv : Tekhnika Publ., pp. 74–82. (in Russian)

11. Gladyshev B.M. *Mekhanicheskoe Vzaimodejstvie Elementov Struktury i Prochnost Betona* [Mechanical interaction of structural elements and concrete strength]. Kharkov : Vishha Shkola Publ., 1987, 168 p. (in Russian)

12. Piradov A.B. *Konstruktivnye Svoystva Legkogo Betona i Zhelezobetona* [Structural properties of lightweight concrete and reinforced concrete]. Moscow : Strojizdat Publ., 1973, 133 p. (in Russian)

13. Pohribnyi V., Dovzhenko O., Kuznietsova I. and Usenko D. The improved technique for calculating the concrete elements strength under local compression. MATEC Web of Conferences. 2018, vol. 230, pp. 020–025. doi:10.1051/mateconf/201823002025.

Надійшла до редакції : 05.09.2021.