

## ПРОГНОЗУВАННЯ МІЦНОСТІ ФІБРОБЕТОНУ ЗА СТИСКУ

*В. П. СИЛОВАНЮК, А. Є. ЛІСНІЧУК, Р. Я. ЮХИМ, Н. А. ІВАНТИШИН*

*Фізико-механічний інститут ім. Г. В. Карпенка НАН України, Львів*

Сформульовано розрахункову модель для прогнозування міцності за стиску композита на основі цементної матриці і мікрочолокон різної природи. Отримано аналітичну залежність міцності матеріалу від механічних характеристик фаз, їх об'ємного вмісту, параметрів, які характеризують ступінь пористості матриці. Важливим елементом моделі є встановлення впливу пошкодженості матеріалу внаслідок мікророзтріскування на поверхнях поділу фаз за стиску. В окремих випадках мікротріщини на поверхнях розділу наповнювача з матрицею можуть нівелювати ефект зміцнення матриці від армування волокнами і навіть знизити міцність композита на стиск. Результати виконаних експериментів на стиск призматичних зразків із композита на основі цементного каменю і мікрочолокон базальту як наповнювача добре корелюють із отриманими розрахунковими даними.

**Ключові слова:** *розрахункова модель, фібробетон, міцність, базальтова фібра.*

Розвиток будівництва висотних будинків та сучасних архітектурних форм ставить нові вимоги до найпоширеніших будівельних матеріалів – бетонів, спонукає до пошуку нових методів підвищення їх службових властивостей. Одним із таких методів є дисперсне армування волокнами (фіброю). В будівельній практиці армування волокнами різної природи використовують давно, однак лише в останні десятиліття це стало предметом наукових досліджень. Найпоширенішими фібрами, які використовують у промисловості, є скляні, поліпропіленові, базальтові, металеві та вуглецеві. Їх фізико-механічні властивості наведені в таблиці.

**Механічні характеристики фібри**

Назва фібри	Густина, g/cm <sup>3</sup>	Міцність на розрив, МПа	Модуль пружності, GPa
Базальтова	2,65	1200	12
Вуглецева	2	2000	245
Скляна	2,6	1050	75
Сталева	7,8	900	200
Поліпропіленова	0,9	500	5

Діаметр фібр може змінюватися від кількох мікрометрів до міліметра. Поперечний переріз волокон може бути круглим, овальним, полігональним та іншої форми залежно від призначення фібри та її виготовлення. Умовно розрізняють дві категорії фібри – мікро і макро. До мікрофібри належать волокна, товщина яких менша 300 μm. Об'ємний вміст фібри, як правило, не перевищує 5% і залежить від мети введення у розчин. Низькі вмісти фібри (від 0,1 до 0,3%) вводять, щоб запобігти мікророзтріскуванню під час усадки та температурних змін. Вищі об'ємні вмісти фібри дають можливість суттєво поліпшити несучу здатність елементів бетонних конструкцій.

Експерименти і теоретичні дослідження показують, що дисперсне армування підвищує міцність елементів конструкції на розтяг та згин, збільшує тріщиностійкість та ударну в'язкість матеріалу, поліпшує інші його фізико-механічні характеристики [1–12]. Крім того, завдяки використанню технології фібрового армування можна істотно зменшити терміни виконання робіт, заощадити будівельні матеріали внаслідок досягнення проектних характеристик за меншої матеріалоемності конструкції.

Теоретичні моделі для прогнозування міцності фібробетону базуються, здебільшого, на засадах механіки композитних матеріалів, зокрема, використання правила сумішей з врахуванням об'ємного вмісту фаз композита [10]. Такі підходи дають змогу апроксимувати міцність композитів, не розкриваючи фізичної суті їх деформування і руйнування.

Оскільки чинників, які впливають на зміну властивостей композитів на основі цементної матриці, багато, то існує чимало варіантів їх комбінування для створення матеріалів із заданими характеристиками. Для цього необхідні теорії, які б враховували дискретну структуру матеріалів. На основі концепції механіки руйнування побудовано [13, 14] розрахункові моделі для прогнозування міцності та тріщиностійкості композитів на основі цементної матриці з врахуванням пор та тріщин у структурі цементного каменю. Мета цієї роботи – побудувати розрахункові залежності для прогнозування міцності фібробетону за стиску. Слід зазначити, що відомі в літературі експериментальні дослідження містять неоднозначні, а іноді й суперечливі результати стосовно впливу фібри, зокрема, її об'ємного вмісту на міцність композита за стиску.

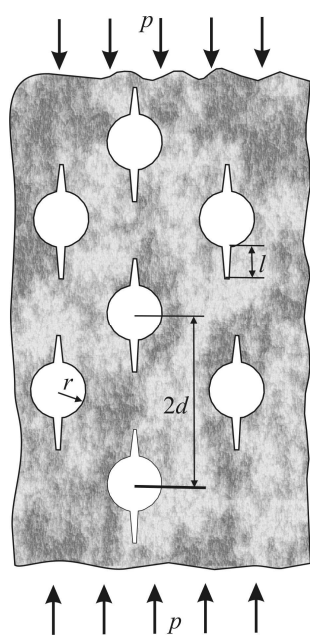


Рис. 1. Схема стиску армованого цементного каменю з порами.

Fig. 1. Compression scheme of reinforced cement stone with pores.

**Розрахункова модель фібробетону за стиску.** Найважливішою службовою характеристикою бетону є його міцність на стиск. Відомо, що міцність бетону на стиск і розтяг значно (на порядок і більше) відрізняються. Суттєву роль у виникненні тріщин у структурі бетону за стиску відіграють пори. Пори в цементному камені мають різне походження і розміри їх змінюються в широких межах. Розрізняють дві групи пор: дрібні пори розміром до  $5 \cdot 10^{-5}$  mm і крупні – розміром до  $10^{-1}$  mm. Реальні пори цементного каменю мають зазвичай довільну форму і випадково орієнтовані щодо зовнішнього навантаження. Показано [15], що за умови стиску напруження розтягу, які виникають в околі пор, мало залежать від їх форми. Побудуємо модель деформування за стиску цементного каменю в межах плоскої задачі теорії пружності.

За розрахункову модель міцності на стиск цементного каменю, стохастично армованого мікро-волокнами, візьмемо товсту пластину зі системою періодичних кругових отворів (пор) з тріщинами на контурі (рис. 1). Поза порами матеріал вважатимемо однорідним ізотропним із ефективними пружними характеристиками  $E$ ,  $\nu$ . Припускаємо, що концентрація пор є такою, що їхньою взаємодією можна знехтувати. Тоді утворення та поширення тріщин на контурі пор можна дослідити на

прикладі одного ізольованого отвору.

Згідно з відомими розв'язками теорії пружності, біля кругового отвору в тілі (рис. 2) під час його стискування виникає зона розтягальних напружень, які можна розрахувати за формулою [16]

$$\sigma_{yy}(x,0) = -p \left( \frac{1}{2} \frac{r^2}{x^2} - \frac{3}{2} \frac{r^4}{x^4} \right). \quad (1)$$

Ці напруження зображено графічно (рис. 3). В інтервалі  $(r < x < 1,7r)$  виникають напруження розтягу, а при  $x > 1,7r$  – напруження змінюють знак і стають стискальними.

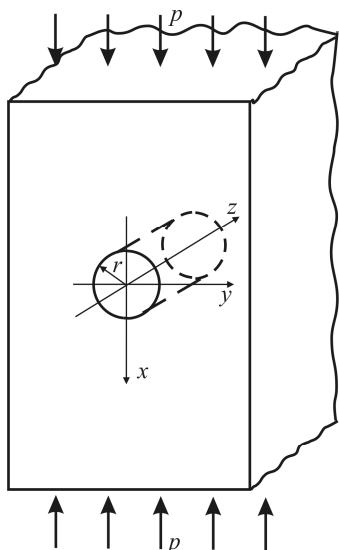


Рис. 2. Fig. 2.

Рис. 2. Схема стиску тіла з круговим циліндричним отвором.

Fig. 2. Compression scheme of a body with a circular cylindrical hole.

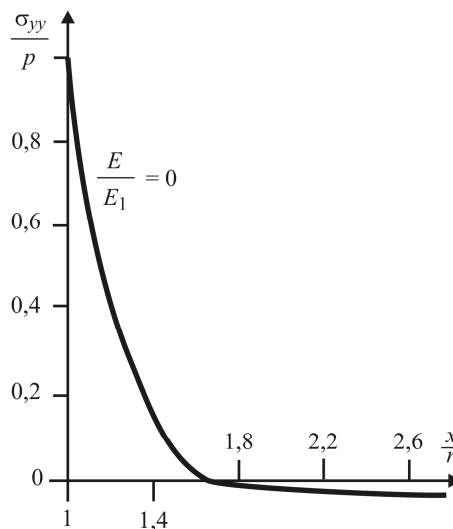


Рис. 3. Fig. 3.

Рис. 3. Розподіл напружень  $\sigma_{yy}(x, 0)$  біля кругового отвору за стиску вздовж осі  $x$ .

Fig. 3. Stress distribution  $\sigma_{yy}(x, 0)$  under compression near a circular cylindrical hole along the  $x$  axis.

Напруження розтягу за достатньої інтенсивності зовнішнього навантаження стиску ініціюють появу тріщин на контурі порожнини (рис. 4). Експериментальні дослідження показують, що тріщини в цементному камені виникають вже за інтенсивності навантаження  $p \sim (0,5 \dots 0,6) R_b$ . Тут  $R_b$  – міцність матеріалу на стиск.

Граничні навантаження для росту цих тріщин можна розраховувати за встановленою [15] залежністю

$$p^* = \sqrt{\frac{\pi(1+\lambda)^7}{4r((1+\lambda)^2 - 1)}} K_{IC}, \quad (2)$$

де  $K_{IC}$  – характеристика локальної тріщиностійкості матеріалу;  $\lambda = l/r$ .

Розвиток цих тріщин спочатку нестійкий, тобто вони поширюються до розмірів  $l = \lambda_0 r$  без збільшення навантаження (рис. 5). Далі навантаження для росту тріщини необхідно збільшувати.

Зовнішні навантаження, за яких тріщини зливаються в одну, яка перетинає все тіло, приймаємо за границю міцності композита за стиску. Цю характеристику встановлюємо за формулою (2), покладаючи довжину тріщини  $l$  рівною половині відстані між порами  $d - r$ :

$$R_b = \sqrt{\frac{\pi(1+\lambda_c)^7}{4r((1+\lambda_c)^2-1)}} K_{IC}, \quad \lambda_c = \frac{d}{r} - 1. \quad (3)$$

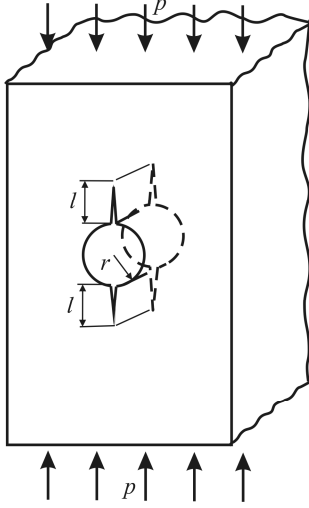


Рис. 4. Fig. 4.

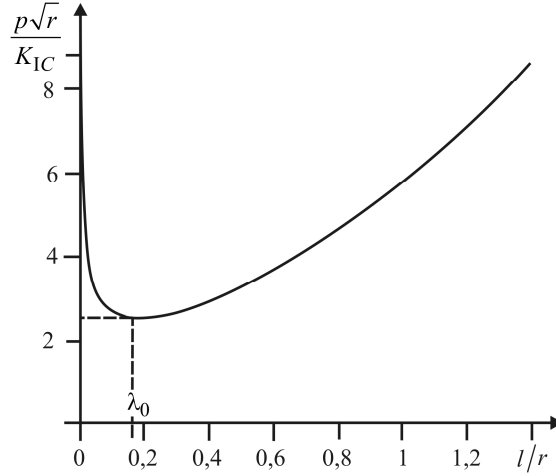


Рис. 5. Fig. 5.

Рис. 4. Тіло з круговим циліндричним отвором та тріщинами в умовах стиску.

Fig. 4. A body with circular cylindrical holes and cracks under compression.

Рис. 5. Залежність граничного навантаження від довжини тріщини.

Fig. 5. Dependence of maximum pressure on the crack length.

Якщо адгезія матриці із мікрволокнами зі зростанням інтенсивності навантаження стиску аж до руйнування не порушується, то для розрахунку  $K_{IC}$  можна застосувати раніше отриману [14] залежність

$$K_{IC} = \frac{1}{\sqrt{1-\nu^2}} \left( \left( 0,33\sigma_f V_f \left( 1 - \frac{r\sigma_f}{a\sigma_m} \right) + \sigma_m (1-V_f) \right) \times \right. \\ \left. \times \left( E_m \left( 1 + \frac{V_f}{(m/(m-1)) - V_f^{1/3}} \right) \right) \rho (\exp \epsilon_c - 1)^{1/2} \right). \quad (4)$$

Тут  $\sigma_f$ ,  $\sigma_m$  – граничі міцності фібри і цементної матриці відповідно;  $E_f$ ,  $E_m$  – модулі пружності фібри і матриці;  $V_f$  – об'ємний вміст фібри;  $\epsilon_c$  – гранична деформація композита;  $\nu$  – коефіцієнт Пуассона композита;  $\rho$  – параметр структури матеріалу;  $a$  – довжина волокон;  $m = E_f/E_m$ .

Реально в композиті за умови стиску внаслідок різниці в модулях пружності матриці і армувальних волокон вздовж поверхонь їх розділу виникають дотичні напруження, які за достатньої інтенсивності зовнішнього навантаження призводять до порушення адгезії між фазами з утворенням поля мікротріщин. Взаємодія макротріщини з мікротріщинами разом з втратою впливу армування на тріщиностійкість внаслідок декогезії призводить до зменшення  $K_{IC}$ , а отже, згідно зі співвідношенням (3), і до зниження міцності на стиск. Це одна з головних причин незначного зростання, а часто і зменшення міцності на стиск композитів на основі цементної матриці зі збільшенням об'ємного вмісту армувальних волокон.

Зниження опору поширенню тріщини внаслідок мікророзтріскування матеріалу за стиску можна виразити наближено залежністю [17]

$$K_{IC} = K_{IC}^0(1 - f_s) , \quad (5)$$

де  $K_{IC}^0$  – тріщиностійкість матеріалу без мікротріщин;  $f_s$  – параметр інтенсивності мікророзтріскування (функція деградації матеріалу).

Оскільки в умовах стиску композита мікророзтріскування пов'язане, в основному, з присутністю армувальної фібри, то припускаємо, що  $f_s$  є лінійною функцією від об'ємного вмісту фібри  $f_s(V_f) = kV_f$ , де  $k$  – коефіцієнт пропорційності.

На основі співвідношень (3)–(5) отримуємо залежність для розрахунку міцності композита на стиск

$$R_b = (1 - kV_f) \sqrt{\frac{\pi(1 + \lambda_c)^7}{4r((1 + \lambda_c)^2 - 1)(1 - \nu^2)}} \cdot \sqrt{0,33\sigma_f V_f \left(1 - \frac{r\sigma_f}{l\sigma_m}\right) + \sigma_m(1 - V_f)} \times \\ \times \sqrt{E_m \left(1 + \frac{V_f}{(m/(m-1)) - V_f^{1/3}}\right) \rho(\exp \epsilon_c - 1)} . \quad (6)$$

На основі формули (6) побудовані графічні залежності (рис. 6) прогнозованої міцності композита від об'ємного вмісту базальтової (рис. 6a), поліпропіленової (рис. 6b), вуглецевої (рис. 6c) фібри за різних параметрів пошкодження матеріалу за стиску.

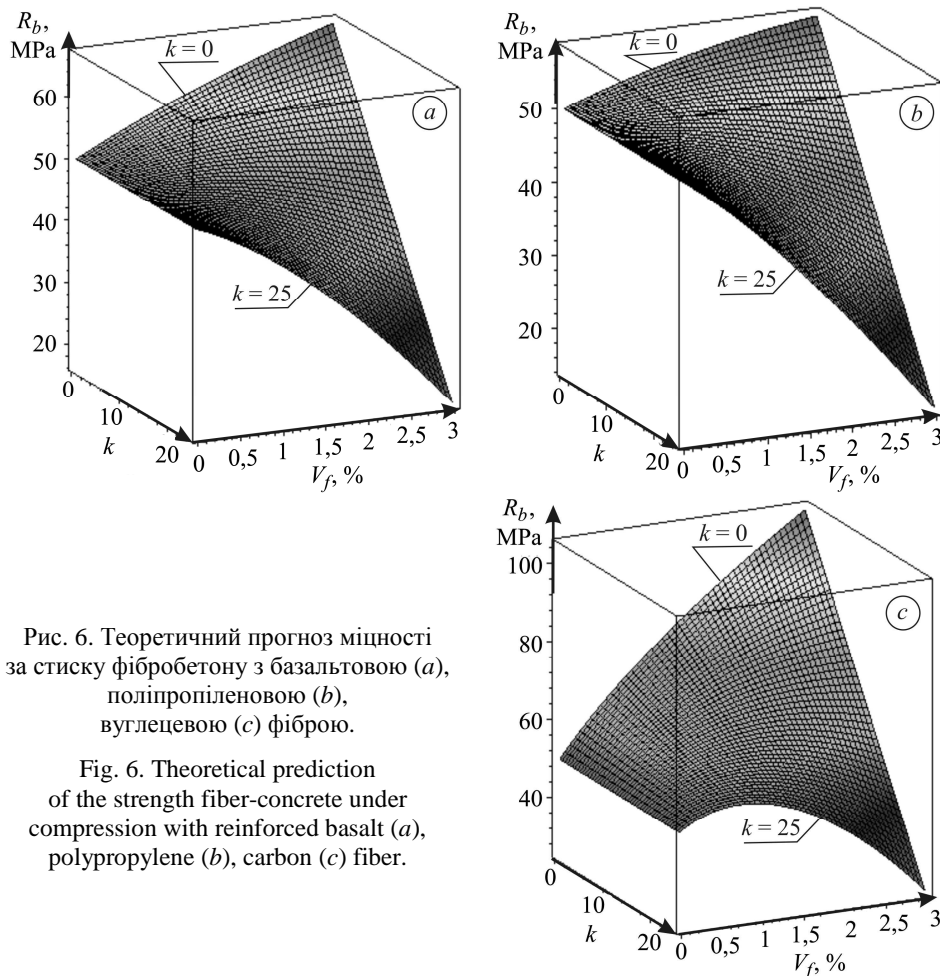


Рис. 6. Теоретичний прогноз міцності за стиску фібробетону з базальтовою (a), поліпропіленовою (b), вуглецевою (c) фіброю.

Fig. 6. Theoretical prediction of the strength fiber-concrete under compression with reinforced basalt (a), polypropylene (b), carbon (c) fiber.

**Експериментальні дослідження.** Для зіставлення отриманих теоретичних розрахункових залежностей з експериментальними результатами дослідили фібробетон на стиск. Для приготування розчину використовували портландцемент ПЦ П/А-Ш-400, гіперпластифікатор на основі полікарбоксилату Bergament ТВ-1. В усіх серіях зразків водоцементне відношення становило 0,32. Як армувальні елементи в розчин додавали базальтову фібру діаметром 15  $\mu\text{m}$ , довжиною 12 mm.

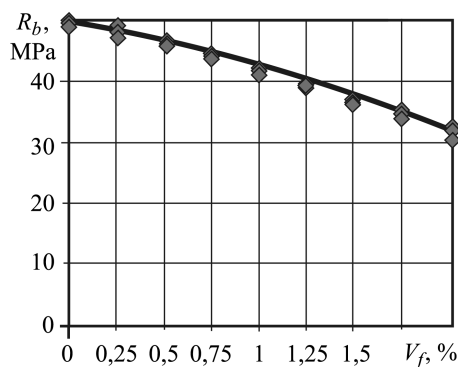


Рис. 7. Залежність міцності армованого цементного каменю за стиску від об'ємного вмісту базальтової фібри.

Fig. 7. Dependence of the strength of cement stone under compression on volume content of basalt fibre.

Об'ємний вміст фібри відносно цементу змінювали від 0 до 2%. З розчинів виготовляли кубічні зразки розміром 4×4 cm. Зразки за температури  $25\pm 3^\circ\text{C}$  витримували 28 days до випробувань.

Наведено (рис. 7) експериментальні результати залежності міцності на стиск армованого цементного каменю від об'ємного вмісту базальтових волокон. Суцільна лінія відповідає теоретичному прогнозу міцності композита. Параметр пошкодженості цементного каменю тут  $k = 16,7$ . Як бачимо, присутність армувальних волокон у цементній матриці знижує міцність на стиск композита. За армування матеріалу фіброю (2%) міцність на стиск становить лише 65% від неармованого цементного каменю.

## ВИСНОВКИ

На основі концепцій механіки руйнування сформульована розрахункова модель для прогнозування міцності за стиску фібробетону – композита на основі цементної матриці та армувальних волокон різної природи. Встановлено, що основними чинниками, які впливають на його міцність є пори, як основні ініціатори тріщиноутворення за стиску, а також множинна пошкодженість матеріалу внаслідок порушення адгезійних зв'язків між цементною матрицею та волокнами наповнювача за інтенсивних зусиль стиску. Останнє можна вважати причиною такого несподіваного явища як зниження міцності на стиск композита зі збільшенням об'ємного вмісту високомодульних волокон, що часто спостерігається в експериментальній практиці. Збільшення об'ємного вмісту пор під час внесення мікрочолокон у розчин є ще одним із чинників, який призводить до цього.

**РЕЗЮМЕ.** Сформулировано расчетную модель для прогнозирования прочности на сжатие композита на основе цементной матрицы и микроволокон различной природы. Получено аналитическую зависимость прочности материала от механических характеристик фаз, их объемного содержания, параметров, характеризующих степень пористости матрицы. Важным элементом модели является установление влияния поврежденности материала вследствие микрорастрескивание на поверхностях раздела фаз при сжатии. В отдельных случаях микротрещины на поверхностях раздела наполнителя с матрицей могут нивелировать эффект укрепления матрицы от армирования волокнами и даже снизить прочность композита на сжатие. Результаты выполненных экспериментов на сжатие призматических образцов с композита на основе цементного камня и микроволокон базальта в качестве наполнителя хорошо коррелируют с полученными расчетными данными.

**SUMMARY.** A calculation model for predicting compressive strength for composite-based cement matrix and microfibers of different nature is formulated. The analytical dependence of the material on the mechanical properties of phases, their volume content, parameters characteri-

zing the degree of porosity of matrix, is obtained. An important element of the model is the establishing of the impact of material damaging due to microcracking at the phases interface under compression. In some cases, cracks at the interface of filler and matrix can remove the effect of strengthening the matrix by reinforcing fibers and even weaken the composite compression. Experiments results obtained under compression of prismatic composite samples based on cement stone and basalt microfibers as filling element agree well with the obtained calculated data.

1. *Naaman A. E.* Tensile strain hardening FRC composites: historical evolution since the 1960 s / Ed.: C. U. Grosse // *Adv. in Const. Mat.* – Berlin: Springer, 2007. – P. 181–202.
2. *Banthia N., Azzabi M., and Pigeon M.* Restrained shrinkage cracking in fiber reinforced cementitious composites // *Mat. and Struct.* – 1993. – **26**, № 161. – P. 405–413.
3. *Marar K., Eren Ö., and Çelik T.* Relationship between impact energy and compression toughness energy of high strength fiber reinforced concrete // *Mat. Lett.* – 2001. – **47**, № 4–5. – P. 297–304.
4. *Nataraja M. C., Nagaraj T. S., and Basavaraja S. B.* Reproportioning of steel fiber reinforced concrete mixes and their impact resistance // *Cement and Concrete Research.* – 2005. – **35**, № 12. – P. 2350–2359.
5. *Xu Z., Hao H., and Li H. N.* Experimental study of dynamic compressive properties of fiber reinforced concrete material with different fibers // *Mat. and Design.* – 2012. – **33**, № 1. – P. 42–55.
6. *Kronlof A., Markku L., and Pekka S.* Experimental study on the basic phenomena of shrinkage and cracking of fresh mortar // *Cement and Concrete Research.* – 1995. – **25**, № 8. – P. 1747–1754.
7. *Brandt A. M.* Cement-based composites: materials, mechanical properties and performance. Second Edition. – Published by CRC Press, 2009. – 544 p.
8. *Jefferey M. and Lemm H. B.* Fiber-reinforced concrete: principles, properties, developments and applications // *Building Materials Science.* – 1990. – 194 p.
9. *Maidl B.* Steel fibre reinforced concrete. – Berlin: Ernst & Sohn, 1995. – 292 p.
10. *Рабинович Ф. Н.* Композиты на основе дисперсно армированных бетонов. Вопросы теории и проектирования, технологии, конструкции. – М.: Ассоциация строительных высших учебных заведений (АСВ), 2004. – 560 с.
11. *Hannant D. J.* Fibre-reinforced concrete in advanced concrete technology (Processes). – Oxford: Elsevier Ltd., 2002. – 700 p.
12. *Ramujel K.* Strength properties of polypropylene fiber reinforced concrete // *Int. J. of Innovative Research in Science, Engineering and Technology.* – 2013. – **2**, № 8. – P. 3409–3413.
13. *Розрахункова модель фібробетону на міцність за розтягу / В. П. Силованюк, Р. Я. Юхим, А. Є. Лісничук, Н. А. Івантишин // Фіз.-хім. механіка матеріалів.* – 2015. – **51**, № 3. – С. 39–45.  
(*Sylovanyuk V. P., Yukhym R. Ya., Lisnichuk A. E., and Ivantyshyn N. A.* Computational model of the tensile strength of fiber-reinforced concrete // *Materials Science.* – 2015. – **51**, № 3. – P. 340–347.)
14. *Прогнозування тріщиностійкості цементного каменю та фібробетону / В. П. Силованюк, Р. Я. Юхим, Н. А. Івантишин, А. Є. Лісничук // Фіз.-хім. механіка матеріалів.* – 2015. – **51**, № 4. – С. 120–125.  
(*Sylovanyuk V. P., Yukhym R. Ya., Ivantyshyn N. A., and Lisnichuk A. E.* Prediction of the crack resistance of cement stone and fibrous concrete // *Materials Science.* – 2015. – **51**, № 4. – P. 570–574.)
15. *Зайцев Ю. В.* Моделирование деформаций и прочности бетона методами механики разрушения. – М.: Стройиздат, 1982. – 196 с.
16. *Мусхелишвили Н. И.* Некоторые основные задачи математической теории упругости. – М.: Наука, 1966. – 708 с.
17. *Evans A. G. and Fu Y.* Some effects of microcracks on the mechanical properties of brittle solids – II microcrack toughening // *Acta metal.* – 1985. – **33**, № 8. – P. 1525–1531.

Одержано 05.02.2016