

УДК 624.012.45

ПОИСК ОПТИМАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ СТАЛЕФИБРОБЕТОННОЙ ПЛИТЫ НА УПРУГОМ ОСНОВАНИИ

ГУСЛИСТАЯ А. Э.¹ к.т.н, доц.,КОЛОХОВ В. В.², к.т.н, доц.,ЯРОШЕНКО Д. С.³, к.т.н.

¹ кафедра железобетонных и каменных конструкций, Государственное высшее учебное заведение «Приднепровская государственная академия строительства и архитектуры», ул. Чернышевского, 24-а, 49600, Днепропетровск, Украина, тел. +38 (0562) 47-44-17, e-mail: GuslystaAnna@3g.ua, ORCID ID: 0000-0002-4486-0630

² кафедра технологии строительных материалов, изделий и конструкций, Государственное высшее учебное заведение «Приднепровская государственная академия строительства и архитектуры», ул. Чернышевского, 24-а, 49600, Днепропетровск, Украина, тел. +38 (0562) 46-93-76, e-mail: kolokhovdnepr@i.ua, ORCID ID: 0000-0002-2314-1477

³ кафедра металлических, деревянных и пластмассовых конструкций, Государственное высшее учебное заведение «Приднепровская государственная академия строительства и архитектуры», ул. Чернышевского, 24-а, 49600, Днепропетровск, Украина, тел. 47-16-56, e-mail: YaroshenkoDenis@i.ua, ORCID ID: 0000-0002-2494-6082

Аннотация. Фибробетон – это принципиально новый вид бетона, который имеет широкие перспективы в будущем. Дисперсное армирование фиброй дает возможность не только компенсировать недостатки бетона (низкую прочность при растяжении и хрупкость), но и наделить его новыми свойствами, а что еще важнее – сделать процесс производства армированных конструкций автоматизированным (3D печать зданий). **Цель.** Нормативный документ по расчету и проектированию сталефибробетонных (СФБ) конструкций содержит общие условия проверки прочности СФБ, при этом прямых формул для подбора требуемых коэффициентов фибрового армирования и толщины плит нет. Целью данных исследований было разработать определенный алгоритм поиска оптимальных коэффициентов фибрового армирования и толщины плит из условия минимальной стоимости материалов. **Методика.** В качестве конструкции для исследования была выбрана плита на упругом основании. На основе положений нормативного документа была разработана формула для непосредственного поиска предельного изгибающего момента. Неизвестными в формуле являются искомые коэффициент фибрового армирования и толщина плиты. Таким образом, предельный момент является функцией этих двух величин. График функции представляет собой поверхность. **Результаты.** Для целевой функции, которая является общей стоимостью материалов, выполнен поиск оптимальных параметров плиты. Научная новизна. Разработан прямой алгоритм поиска оптимальных параметров СФБ плиты на упругом основании. Практическая значимость. Предложенный алгоритм может быть непосредственно использован при разработке программного обеспечения для автоматизированного подбора оптимальных параметров СФБ промышленных полов.

Ключевые слова: сталефибробетон; промышленные полы; коэффициент фибрового армирования; оптимизация; плита на упругом основании

ПОШУК ОПТИМАЛЬНИХ ПАРАМЕТРІВ СТАЛЕФІБРОБЕТОННОЇ ПЛИТИ НА ПРУЖНІЙ ОСНОВІ

ГУСЛИСТА Г. Е.¹ к.т.н, доц.,КОЛОХОВ В. В.², к.т.н, доц.,ЯРОШЕНКО Д. С.³, к.т.н.

¹ кафедра залізобетонних та кам'яних конструкцій, Державний вищий навчальний заклад «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», вул. Чернишевського, 24-а, 49600, Дніпропетровськ, Україна, тел. +38 (0562) 47-44-17, e-mail: GuslystaAnna@3g.ua, ORCID ID: 0000-0002-4486-0630

² кафедра технології будівельних матеріалів, виробів та конструкцій, Державний вищий навчальний заклад «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», вул. Чернишевського, 24-а, 49600, Дніпропетровськ, Україна, тел. +38 (0562) 46-93-76, e-mail: kolokhovdnepr@i.ua, ORCID ID: 0000-0002-2314-1477

³ кафедра металевих, дерев'яних та пластмасових конструкцій, Державний вищий навчальний заклад «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», вул. Чернишевського, 24-а, 49600, Дніпропетровськ, Україна, тел. +38 (0562) 47-16-56, e-mail: YaroshenkoDenis@i.ua, ORCID ID: 0000-0002-2494-6082

Анотація. Фібробетон – це принципово новий вид бетону, який має великі перспективи у будівництві майбутнього. Дисперсне армування фіброю дає змогу не тільки компенсувати недоліки бетону (низьку міцність при розтягу і крихкість), але й додати матеріалу нових властивостей, а що ще важливіше – зробити процес виробництва армованих конструкцій автоматизованим (3D друк будівель). **Мета.** Нормативний документ з проектування сталефібробетонних (СФБ) конструкцій містить загальні умови перевірки міцності СФБ, при цьому прямих формул для підбору потрібних коефіцієнтів

армування та товщини плит немає. Метою досліджень було поставлено розробити певний алгоритм пошуку оптимальних коефіцієнтів фібрового армування та товщини плити з умови мінімальної вартості матеріалів. **Методика.** В якості конструкції для дослідження була обрана СФБ плита на пружній основі. На основі положень нормативного документу було розроблено формулу для безпосереднього пошуку граничного згинального моменту. Невідомими у формулі є шукані коефіцієнт фібрового армування та товщина плити. Отже, граничний момент є функцією цих двох величин. Графік функції представляє собою поверхню. **Результати.** Для цільової функції, яка є загальною вартістю матеріалів, виконано пошук оптимальних параметрів плити. **Наукова новизна.** Розроблений прямий алгоритм пошуку оптимальних параметрів СФБ плити на пружній основі. **Практична значимість.** Запропонований алгоритм може бути безпосередньо використаний при розробці програмного забезпечення для автоматизованого підбору оптимальних параметрів СФБ промислових підлог.

Ключові слова: сталеві фібробетон; промислові підлоги; коефіцієнт фібрового армування; оптимізація; плита на пружній основі

SEARCH FOR OPTIMAL PARAMETERS OF FIBER REINFORCED CONCRETE PLATE ON THE ELASTIC FOUNDATION

GUSLYSTA A. E.^{1*}, *Ph.D, Ass. Prof.*,
KOLOKHOV V. V.^{2*}, *Ph.D, Ass. Prof.*,
YAROSHENKO D. S.^{3*}, *Ph.D.*

^{1*} Department of Reinforced concrete and Masonry Constructions, State Higher Education Establishment "Prydneprov'ska State Academy of Civil Engineering and Architecture", 24-A, Chernishevskogo str., Dnipro 49600, Ukraine, tel. +38 (0562) 47-44-17, e-mail: GuslystaAnna@3g.ua, ORCID ID: 0000-0002-4486-0630

^{2*} Department of Building Materials, Products and Structures Technology, State Higher Educational Establishment «Pridneprov'ska State Academy of Civil Engineering and Architecture», 24-a, Chernishevskogo str., Dnipro 49600, Ukraine, tel. +38 (0562) 46-93-76, e-mail: kolokhovdnepr@i.ua, ORCID ID: 0000-0002-2314-1477

^{3*} Department of Metallic, Wooden and Plastic Structures, State Higher Education Establishment "Prydneprov'ska State Academy of Civil Engineering and Architecture", 24-A, Chernishevskogo str., Dnipro 49600, Ukraine, tel. +38 (0562) 47-16-56, e-mail: YaroshenkoDenis@i.ua, ORCID ID: 0000-0002-2494-6082

Annotation. Fibre reinforced concrete has been successfully used in Civil Engineering applications: such as industrial floors, roads, airports, pile supported floors, hydraulic structures, foundation slabs, architectural panels, precast products, shotcrete, structures in seismic regions etc. This composite material is one of the concrete of the new generation. It consists from concrete matrix and short randomly distributed fibres (steel, glass, various polymers and others.). But the strongest is steel fibre. fibre can be with curved ends or wavy for better anchoring in a concrete matrix. Fibre allows compensating such weakness of concrete as low growth resistance, high shrinkage cracking, low durability, etc. Steel fibre reinforced concrete (SFRC) has the ability of excellent tensile strength, flexural strength, shock resistance, fatigue resistance, ductility and crack arrest. So the steel fibre reinforced concrete (SFRC) is very efficient in comparison with conventional reinforced concrete. As a rule during the design SFRC industrial floor we face a problem: to determine necessary thickness of floor and fibre reinforcement ratio. However, according to national rules of design SFRC structures the main characteristics of materials depend on unknown thickness and fibre reinforcement ratio. **Purpose.** The purpose of the article is to develop optimal parameters algorithm for fiber reinforced concrete plate on the elastic foundation by known value of bending moment of the plate. Thickness of plate and fiber reinforcement ratio were considered as parameters. **Methodology.** Fiber reinforced concrete plate with ultimate bending moment 100 кН·м was chosen for study. The formula for bending moment was transformed in such way that bending moment is a function. **Findings.** The diagram of the function is a surface. Each point on this surface is a possible solution of optimization problem. Equating the bending moment to maximal value and using the software Mathcad 14 we have received the line on the surface that is thickness/reinforcement ratio curve. Search for an optimum must be carrying out for the function of purpose which is the total cost of materials for 1 m² of the floor. **Originality.** The new modified formula for bending moment was worked out. Thickness of plate and fiber reinforcement ratio were unknown in this formula. **Practical value** Proposed algorithm may be practiced during soft-ware engineering for optimization of SFRC floors.

Keywords: steel fibre reinforced concrete (SFRC); industrial floors, fiber reinforcement ratio, optimization, plate on the elastic foundation

Вступ

Все частіше в світовій практиці будівництва застосовуються бетони нового покоління, одним з яких є фібробетон (Fiber Reinforced Concrete, FRC). В перекладі з англійської «фібра» (Fiber) означає «волокно». Фібробетон (дисперсно армований бетон) – принципово новий вид бетону. Він, як і традиційний бетон, представляє собою композиційний матеріал, що додатково містить

волокнистий наповнювач, рівномірно розподілений у тілі бетону (в бетонній матриці). Для виготовлення фібри застосовують різні матеріали: сталь, скло, базальт, різні полімери та інші. Але найбільш міцною є сталеві фібра. Вона представляє собою відрізки дроту, які можуть бути прямими, або для кращого анкерування в бетонній матриці можуть бути з плісценими кінцями, з загнутими кінцями чи

базальт, різні полімери та інші. Але найбільш міцною є сталеві фібри. Вона представляє собою відрізки дроту, які можуть бути прямими, або для кращого анкерування в бетонній матриці можуть бути з плісненими кінцями, з загнутими кінцями чи хвилеподібні. На рис.1 представлена фібра, яку виготовляє ПАТ «Днепрметиз».

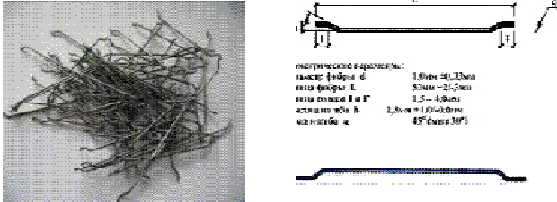


Рис. 1. Загальний вигляд сталевих фібр /
General view of steel fibers

Рівномірний розподіл фібри забезпечує тривимірне армування по всьому об'єму бетонної матриці. Дисперсне армування дає змогу компенсувати головні недоліки бетону – низьку міцність на розтяг і крихкість. Фіробетон має в декілька разів вищу міцність на стиск, розтяг, згин, зріз, ударну міцність, витривалість, тріщиностійкість та ударну в'язкість, зменшується усадка.

Сталефіробетон є економічно ефективною альтернативою традиційному залізобетону. Він вже знайшов застосування при виготовленні автодоріг, злітно-посадкових смуг та промислових підлог, гідроспоруд, фундаментів, стін, збірних конструкцій. Може бути застосований при зведенні будівель в сейсмічних регіонах.

Крім того, сталефіробетон дозволяє: реалізовувати ефективні конструктивні рішення, наприклад, тонкостінні конструкції без стрижневої або сітчастої розподільчої арматури; знизити витрати праці на арматурні роботи і підвищити ступінь механізації та автоматизації виробництва армованих конструкцій (3D друк будівель). [1, 4, 6]

Але ж отримати необхідну несучу здатність конструкцій, високі експлуатаційні властивості і економічний ефект від зниження витрат матеріалів і економії часу можна лише за умови правильного проектування конструкцій. На сьогодні основним нормативним документом при проектуванні конструкцій з фіробетону є ДСТУ [3].

Мета досліджень

Зазвичай при розрахунку СФБ підлоги промислової будівлі виникає така задача: при відомому значенні згинального моменту $\max\{M_{x,\max}; M_{y,\max}\}$ від зовнішніх навантажень визначити необхідні товщину h плити і коефіцієнт фібрового армування μ_{fv} .

Згідно з ДСТУ [3] розрахунок за міцністю перерізів згинних сталефіробетонних елементів проводять з умови:

$$M \leq M_{ult},$$

де M_{ult} - граничний згинальний момент, який може бути сприйнятий перерізом елемента.

Для елементів прямокутного профілю

$$M_{ult} = \frac{0,5 \cdot R_{fb} \cdot R_{fbr} \cdot b \cdot h^2}{R_{fb} + R_{fbr}} \quad (1)$$

де R_{fb} – розрахунковий опір фіробетону на стиск,
 R_{fbr} – розрахунковий опір фіробетону на розтяг,
 h - товщина плити,
 $b=1$ м.

Оскільки ДСТУ [3] набув чинності у 2009 р., позначення характеристик міцності матеріалів ще не відповідають новим нормам проектування залізобетонних конструкцій [2].

Але ж проблема полягає в тому, що згідно з ДСТУ [3] R_{fb} і R_{fbr} в свою чергу залежать від шуканого коефіцієнта фібрового армування μ_{fv} .

Таким чином, постає задача розробки певного алгоритму пошуку оптимальних параметрів СФБ плити (товщини h і коефіцієнта фібрового армування μ_{fv}) при відомому значенні згинального моменту в плиті.

Методика та результати досліджень

В якості конструкції для дослідження була обрана СФБ плита на пружній основі. На основі положень ДСТУ [3] формула (1) була трансформована таким чином, що невідомими у формулі є шукані коефіцієнт фібрового армування та товщина плити.

Алгоритм розрахунку представлений на рис. 2.

R_b – розрахунковий опір бетону на стиск, за першою групою граничних станів

R_f – розрахунковий опір сталі на розтяг, за першою групою граничних станів

$R_{b,ser}$ – розрахунковий опір бетону на стиск, за другою групою граничних станів

$R_{f,ser}$ – розрахунковий опір сталі на розтяг, за другою групою граничних станів

l_f – довжина фібри (від заводу-виробника)

η_f – коефіцієнт, що враховує анкерування фібр, приймається за табл. 1.

Таблиця 1

Значення коефіцієнта, що враховує анкерування фібри в залежності від її форми / The value of the coefficient, which takes into account the anchoring of the fiber depending on its shape

Форма фібри	η_f
Пряма (П)	1,00
З плісненими кінцями (ПЛ)	0,70
З загнутими кінцями (З)	0,90
Хвилеподібна (Х)	0,85

$d_{f,red}$ – приведений діаметр фібри, мм, що використовується

k_{or} – коефіцієнт, що враховує орієнтацію фібр в об'ємі елемента в залежності від співвідношення розмірів перерізу елемента і довжини фібри, приймається за ДСТУ [3] табл. 6.1. (Оскільки товщина плити h остаточно невідома, можна приймати осереднене значення k_{or})

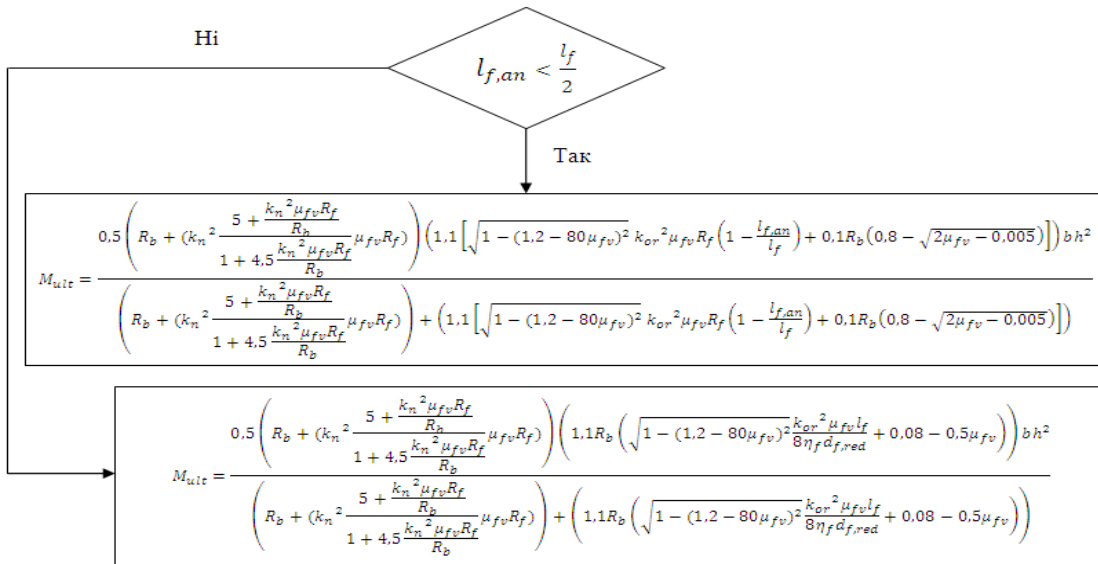


Рис. 2. Блок-схема / Block-scheme

k_n - коефіцієнт, що враховує роботу фібр у перерізі, перпендикулярному до напрямку зовнішнього стискального зусилля, приймається за ДСТУ [3] табл. 6.2. (Оскільки товщина плити h остаточно невідома, можна приймати осереднене значення k_n)

$b=1$ м.

$$l_{f,an} = \frac{\eta_f \cdot d_{f,red} \cdot R_{f,ser}}{R_{b,ser}} \quad (2)$$

Отже, граничний момент є функцією двох величин: $M_{ult}(h, \mu_{fv})$.

Підставляючи в пакеті MathCAD зазначені вище вихідні дані для діапазону $\mu_{fv}=0,005...0,018$; $h=30...200$ мм, отримуємо графік, який представляє собою поверхню. Кожна точка поверхні є можливим розв'язком задачі.

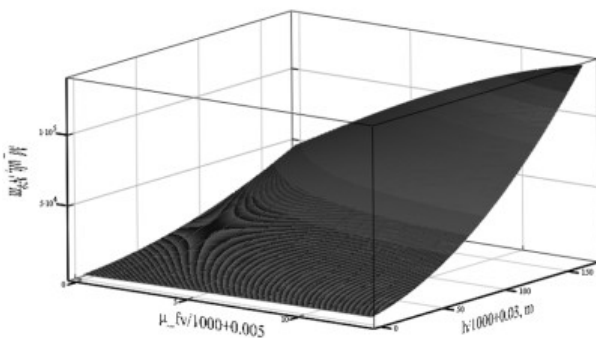


Рис. 3. Графік можливих розв'язків задачі / Diagram of possible solutions of the problem

Прирівнюючи $M_{ult}(h, \mu_{fv}) = \max\{M_{x,max}; M_{y,max}\}$, де $M_{x,max}$, $M_{y,max}$ – максимальні значення згинальних моментів в конструкції відповідно в напрямках осей x , y , отримуємо на поверхні лінію, а саме графік залежності $h - \mu_{fv}$ (рис.4).

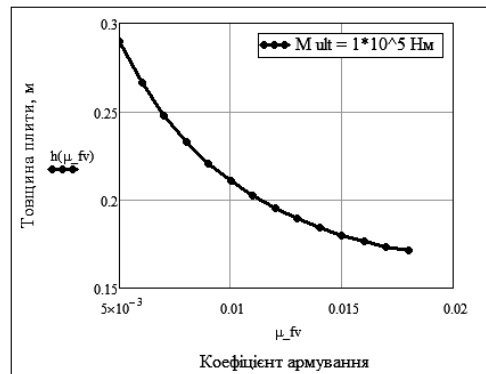


Рис. 4.Графік залежності товщини плити від коефіцієнта армування / Thickness/fibre reinforcement ratio curve of FRC plate

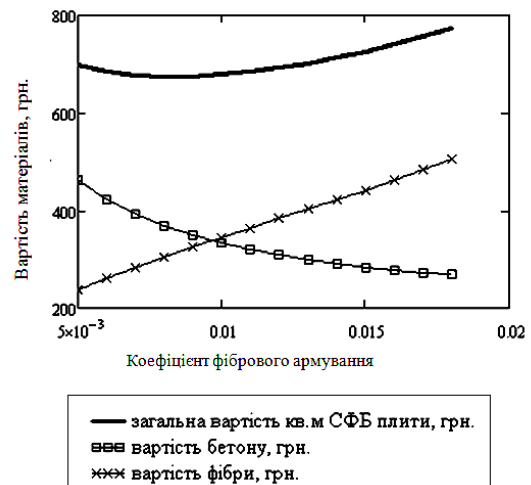


Рис. 5.Графік залежності вартості 1 м² плити від коефіцієнта армування / The total cost of materias/fibre reinforced ratio curve for 1 m² of the plate

Пошук оптимального розв'язку слід виконувати для цільової функції $C(\mu_{fv}, h)$, яка представляє

собою вартість матеріалів для виготовлення 1 м² плити:

$$C = (1 - \mu_{fv}) \cdot h \cdot c_{бет} + \mu_{fv} \cdot \rho_{ф} \cdot h \cdot c_{ф}, \quad (3)$$

де $c_{бет}$ - вартість 1 м³ бетону (1600 грн), $\rho_{ф}$ - густина матеріалу фібри (вданому випадку для сталі $\rho_{ф=7800}$ кг/м³), $c_{ф}$ - вартість 1 кг сталеві фібри (21 грн). Ціни вказано за даними інтернет-сайтів www.dnepropetrovsk.flagma.ua і www.dp.prom.ua станом на 02.08.2017.

Наукова новизна та практична значимість

Аналіз існуючої нормативної літератури показав, що в чинному ДСТУ [3] немає чітко прописаної послідовності дій щодо пошуку необхідних параметрів фібробетонних конструкцій.

На основі розрахункових формул, приведених в ДСТУ, авторами розроблено алгоритм пошуку оптимальних параметрів фібробетонної плити на пружній основі, а саме товщини і коефіцієнта армування.

Розроблений алгоритм може бути використаний при розробці програми для автоматизованого пошуку оптимальних параметрів фібробетонних плит.

Перспективні напрямки подальших досліджень:

Вдосконалення цільової функції таким чином, щоб врахувати також витрати на транспортування матеріалів, а також на трудомісткість виконання робіт.

Проведення порівняльного аналізу виготовлення підлоги з фібробетону та традиційного залізобетону.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Большаков В.И. Будівельне матеріалознавство: Навчальний посібник для студентів будівельних спеціальностей вузів / Большаков В.И. Дворкін Л.Й. – Дніпропетровськ: РВА «Дніпро-VAL», 2004. – 677 с.
2. ДБН В.2.6-98:2009. Конструкції будинків і споруд. Бетонні та залізобетонні конструкції. Основні положення. Видання офіційне. – К.: Мінрегіонбуд України, 2011. – 71 с.
3. ДСТУ-Н Б В.2.6-78:2009. Конструкції будинків і споруд. Настанова з проектування та виготовлення сталеві фібробетонних конструкцій. Видання офіційне. – К.: Міністерство регіонального розвитку та будівництва України, – 2009. – 43 с.
4. Коваленко О.В. Полімерцементний фібробетон – новий композиційний матеріал для ремонту та реконструкції гідротехнічних споруд / О.В. Коваленко // Меліорація і водне господарство. – 2011. – Вип. 99. – С. 311 – 322.
5. Трофимович В.В. Оптимизация металлических конструкций / Трофимович В.В., Пермяков В.А. – К.: Вища школа. Головное изд-во, 1983. – 200 с.
6. Vikrant S. Vairagade. Introduction to Steel Fiber Reinforced Concrete on Engineering Performance of Concrete / Vikrant S. Vairagade, Kavita S. Kene // International Journal of Scientific & Technology Research. – 2012. – Vol. 1. – Issue 4. – P. 139 – 141.

REFERENCES

1. Bolshakov V.I. *Budivselne materialoznavstvo* [Building materials science]. Dnipropetrovsk, 2004, 677 p.
2. DBN V.2.6-98:2009. *Konstruktivni budynkiv i sporud. Betonni ta zalizobetonni konstruktivni. Osnovni polozhennya* [Concrete and reinforced concrete structures], Kyiv, 2011. – 71 p.
3. DSTU-N B.V.2.6-78:2009. *Konstruktivni budynkiv i sporud. Nastanova z proektuvannya ta vygotovlennya ctalefibrobetonnykh konstruktiv* [Structures of buildings and erections. Instruction of application and production of fibre reinforced concrete construction], Kyiv, 2009. – 43 p.
4. Kovalenko O.V. *Polimercementny fibrobeton – novy kompozytsiyny material dlya remontu ta rekonstruktivni gidrotehnychnykh sporud* [Polymer-cement fibre reinforced concrete is the new composite material for repair and reconstruction of hydraulic structures]. *Melioratsiya i vodne gospodarstvo* [Amelioration and water equipment], 2011, Issue 99, P. 311-322.
5. Trofimovich V.V. *Optimizatsiya metallicheskih konstruktiv* [Steel structural optimization] / Trofimovich V.V., Permyakov V.A., Kyiv, 1983. – 200 p.
6. Vikrant S. Vairagade. Introduction to Steel Fiber Reinforced Concrete on Engineering Performance of Concrete / Vikrant S. Vairagade, Kavita S. Kene // International Journal of Scientific & Technology Research. – 2012. – Vol. 1. – Issue 4. – P. 139 – 141.

Стаття рекомендована до публікації д-ром. техн. наук, проф. В.В. Кулябко (Україна), д-ром. техн. наук, проф. М.В. Савицьким (Україна)

Поступила до редколегії 16.08.2017