

**ПІДВИЩЕННЯ ДОВГОВІЧНОСТІ КЕРАМЗИТОБЕТОНІВ  
ДЛЯ ТОНКОСТІННИХ ГІДРОТЕХНІЧНИХ І ТРАНСПОРТНИХ СПОРУД  
ЗА РАХУНОК ЗАСТОСУВАННЯ МОДИФІКАТОРІВ**

**Мишутін А.В.**, д.т.н., професор,  
**Кровяков С.О.**, к.т.н., доцент,  
**Пищев О.В.**, аспірант,  
**Дудник Л.В.**, аспірант,  
**Стрельцов К.О.**, к.т.н.,  
**Ткаченко Г.Г.**, к.т.н., доцент,  
*Одеська державна академія будівництва та архітектури*  
skrovyakov@ukr.net

**Анотація.** Досліджено вплив суперпластифікатору і мікрокремнезему на механічні властивості, водонепроникність та морозостійкість керамзитобетону для тонкостінних транспортних і гідротехнічних споруд. Всі бетонні суміші мали рівну рухливість П2. Встановлено, що за рахунок введення раціональної кількості модифікаторів морозостійкість досліджених бетонів зростає на 100 циклів, а водонепроникність на дві марки (4 атмосфери). Це підвищує довговічність даних матеріалів в жорстких умовах, які є найбільш розповсюдженим при експлуатації тонкостінних гідротехнічних споруд, зокрема плавучих залізобетонних.

**Ключові слова:** довговічність, тонкостінні споруди, керамзитобетон, модифікатори, експериментально-статистичне моделювання.

**ПОВЫШЕНИЕ ДОЛГОВЕЧНОСТИ КЕРАМЗИТОБЕТОНОВ  
ДЛЯ ТОНКОСТЕННЫХ ГИДРОТЕХНИЧЕСКИХ И ТРАНСПОРТНЫХ  
СООРУЖЕНИЙ ЗА СЧЕТ ПРИМЕНЕНИЯ МОДИФИКАТОРОВ**

**Мишутин А.В.**, д.т.н., профессор,  
**Кровяков С.А.**, к.т.н., доцент,  
**Пищев О.В.**, аспирант,  
**Дудник Л.В.**, аспирант,  
**Стрельцов К.А.**, к.т.н.,  
**Ткаченко Г.Г.**, к.т.н., доцент,  
*Одесская государственная академия строительства и архитектуры*  
skrovyakov@ukr.net

**Аннотация.** Исследовано влияние суперпластификатора и микрокремнезема на механические свойства, водонепроницаемость и морозостойкость керамзитобетона для тонкостенных транспортных и гидротехнических сооружений. Все бетонные смеси имели равную подвижность П2. Установлено, что за счет введения рационального количества модификаторов морозостойкость исследованных бетонов возрастает на 100 циклов, а водонепроницаемость на две марки (4 атмосферы). Это повышает долговечность данных материалов в жестких условиях, которые являются наиболее распространенным при эксплуатации тонкостенных гидротехнических сооружений, в частности плавучих железобетонных.

**Ключевые слова:** долговечность, тонкостенные сооружения, керамзитобетон, модификаторы, экспериментально-статистическое моделирование.

# INCREASE OF DURABILITY OF EXPANDED CLAY LIGHTWEIGHT CONCRETES FOR THIN-WALLED HYDRAULIC ENGINEERING AND TRANSPORT STRUCTURES THROUGH THE USE OF MODIFIERS

**Mishutin A.V.**, Doctor of Engineering, Professor,  
**Kroviakov S.O.**, PhD., Assistant Professor,  
**Pishev O.V.**, graduate student,  
**Dudnik L.V.**, graduate student,  
**Streltsov K.A.**, PhD.,  
**Tkachenko G.G.**, PhD., Assistant Professor,  
*Odessa State Academy of Civil Engineering and Architecture*  
skrovyakov@ukr.net

**Abstract.** Purpose of the work is to increase the durability and mechanical properties of expanded clay lightweight concrete for thin-walled hydraulic engineering and transport structures. To achieve the purpose modifiers were used. A three-factorial planned experiment was carried out. Such factors of light concrete composition were varied: the amount of cement (500-600 kg/m<sup>3</sup>), silica fume (0-50 kg/m<sup>3</sup>) and superplasticizer S-3 (0.5-1%). Concretes were made from mixtures of equal mobility P2.

It was found that the compressive strength of expanded clay lightweight concretes was in the range from 32 to 43 MPa. The tensile strength of these concretes was in the range from 5.6 to 7.0 MPa. Due to the introduction of 30-35 kg/m<sup>3</sup> of silica fume the compressive strength of expanded clay lightweight concretes is increased at 2 MPa and the tensile strength at bending increases by 0.3 MPa. Similarly, the increase in strength occurs when the amount of the S-3 additive is increased to 0.8-1%.

The average density of expanded clay lightweight concrete in the dry state was from 1660 to 1740 kg/m<sup>3</sup>. After saturation with water, the average density of concrete was from 1780 to 1840 kg/m<sup>3</sup>. Such concrete can be used for thin-walled hydraulic engineering and transport structures, in particular for the construction of pumping stations and floating reinforced concrete structures.

In the climatic conditions of Ukraine, the durability of concrete in hydraulic engineering and transport structures is ensured by its water-resistance and frost-resistance. The water-resistance of expanded clay lightweight concrete was in the range from W4 to W14. The frost-resistance was in the range from F400 to F550. The amount of cement most significantly affects water-resistance and frost-resistance. Water-resistance is increased by one grade with the introduction of silica fume and with an increase in the amount of the S-3 additive. Also, with the introduction of modifiers, the frost resistance of concrete is increased by 100 cycles.

Thus, the durability of expanded clay lightweight concrete for thin-walled hydraulic engineering and transport structures increases with the introduction of modifiers in the optimal amount.

**Keywords:** durability, thin-walled structures, expanded clay lightweight concrete, modifiers, experimental statistical modeling.

**Вступ.** В гідротехнічному і транспортному будівництві широко використовуються залізобетонні конструкції, переважна більшість яких виготовляється з важкого бетону. Проте для цілого ряду тонкостінних споруд ефективним є застосування бетонів на легких пористих заповнювачах, зокрема керамзитобетону. Наприклад для залізобетонних плавучих споруд використання бетонів керамзитобетону дозволяє знизити вагу судна за рахунок чого підвищити його вантажопідйомність. Застосування легких бетонів також дозволяє значно поліпшити комфортність перебування людей та умови роботи обладнання в приміщеннях деяких гідротехнічних і транспортних споруд, зокрема насосних станцій, плавучих залізобетонних готелів, доків і будинків.

**Аналіз останніх досліджень.** Досвід застосування конструкцій з бетонів на легких заповнювачах в гідротехнічному, транспортному і цивільному будівництві показав ефективність даних матеріалів [1]. Легкі бетони від важких відрізняються не тільки меншою

середньою густиною, а й набагато більшими можливостями варіювання як самої густини, так і інших властивостей [2].

При правильному призначенні складу керамзитобетон, як найбільш розповсюджений тип конструкційного легкого бетону, забезпечує первинний захист арматури від корозії без додаткових витрат і має виску морозостійкість [3]. Як показано у роботі [4], після 300-400 циклів заморожування і відтаювання у прісній та морській воді зразки з керамзитобетону високих марок збереглись без руйнувань, а втрата міцності не перевищувала 15%. Також керамзитобетон має високу стійкість в агресивних сольових розчинах, зокрема у сульфатах. В роботі [5] показано, що керамзитобетон марки 400 здатний витримувати без руйнування тривалі випробування на змінне зволоження і висушування у морській воді. Після 150 циклів такого випробування міцність при стиску може навіть зрости, що пов'язано з накопиченням в порах бетону солей, а також з посиленням гідратації цементу у вологому середовищі. Бетони на основі пористих керамічних заповнювачів використовувалися при будівництві плавучих нафтових платформ, доків, барж та інших плавучих залізобетонних споруд [6].

Для підвищення механічних властивостей і довговічності керамзитобетонів застосовуються модифікатори різного типу, зокрема суперпластифікатори [7]. Наприклад, у роботі [8] при використанні добавки С-3 В/Ц керамзитобетонної суміші було знижено при збереженні рухливості, за рахунок чого на 40% підвищена міцність бетону, або це дало змогу отримати рівноміцний легкий бетон при витратах цементу на 18..20% нижче. У [9] за рахунок застосування полікарбоксилатних пластифікаторів, модифікованих стабілізуючими системами, отримано самоущільнюючийся керамзитобетон класів В20..В35. У роботі [10] застосування полікарбоксилатного суперпластифікатору дало змогу отримати керамзитобетон міцністю до 45 МПа при В/Ц=0,35 і рухомості суміші 1-2 см.

Для отримання високоякісних і довговічних цементних композицій, а також для розширення спектру їх функціональних можливостей, необхідним є використання комплексних добавок, що поєднують в собі індивідуальні добавки різного функціонального призначення [7]. Зокрема ефективним є поєднання мікрокремнезему, який володіє пуцолановою активністю, з суперпластифікатором. Є позитивний досвід застосування мікрокремнезему в бетонах на легких заповнювачах для гідротехнічних споруд. Наприклад, для понтонів мосту Nordhordland на основі високоміцного цементу NS 65 був отриманий бетон класу LC55 за рахунок введення у склад 33 кг/м<sup>3</sup> мікрокремнезему і 10-12 кг/м<sup>3</sup> пластифікатору [11]. Таким чином, комплексна модифікація є ефективним методом підвищення механічних властивостей і довговічності керамзитобетонів в жорстких умовах експлуатації.

**Метою** роботи є підвищення механічних властивостей і довговічності керамзитобетонів для тонкостінних гідротехнічних і транспортних споруд за рахунок застосування модифікаторів: суперпластифікатору С-3 і мікрокремнезему.

**Об'єкти і методи дослідження.** Для виготовлення легких бетонів в якості крупного заповнювача використовувався керамзитовий гравій Одеського керамзитового заводу фракції 5-10 мм з насипною щільністю гравію 565 кг/м<sup>3</sup> і маркою по міцності П125. В якості дрібного заповнювача використовувався митий кварцовий пісок з Мкр=2.4. В якості в'язучого – сульфатостійкій портландцемент марки 400.

У 3-х факторному 15-ти точковому експерименті, який був проведений за оптимальним планом [12], варіювалися наступні фактори складу керамзитобетону:

$X_1$  – кількість сульфатостійкого портландцементу, від 500 до 600 кг/м<sup>3</sup>;

$X_2$  – кількість мікрокремнезему Нікопольського заводу феросплавів, від 0 до 50 кг/м<sup>3</sup>;

$X_3$  – кількість добавки С-3, від 0.5 до 1.0% від маси цементу.

Всі суміші мали рівну рухомість П2 (ОК від 4 до 6 см), що досягалося підбором кількості води. Перемішування сумішей проводилося з попереднім насиченням гравію водою, яка враховувалася при розрахунках В/Ц.

Визначення водонепроникності бетонів проводилося за методом мокрої плями на зразках-циліндрах діаметром 150 мм і товщиною 150 мм згідно ДСТУ Б В.2.7-170:2008.

Морозостійкість бетонів визначалася прискореним методом в солоній воді при заморожуванні до  $-50^{\circ}\text{C}$  згідно ДСТУ Б В.2.7-49-96 «Бетони. Прискорені методи визначення морозостійкості при багаторазовому заморожуванні та відтаванні» (третій метод).

**Результати досліджень.** З умов експерименту для забезпечення рівної технологічності сумішей їх В/Ц залежало від складу керамзитобетону. Відповідно при збільшенні кількості портландцементу і добавки суперпластифікатора В/Ц знижувалося. При введенні мікрокремнезему в кількості до  $30\text{ кг/м}^3$  В/Ц суміші змінюється несуттєво, але збільшення кількості мікрокремнезему до  $50\text{ кг/м}^3$  викликає необхідність підвищення В/Ц для збереження рухомості суміші.

Аналіз міцності при стиску модифікованого керамзитобетону показав, що при варіюванні складу цей показник змінюється у діапазоні від 32 до 43 МПа, при цьому міцність бетону на розтяг при згині змінюється від 5.6 до 7.0 МПа. По мірі збільшення кількості портландцементу міцність матеріалу зростає, при цьому більш відчутно при зміні кількості в'язучого з 500 до  $550\text{ кг/м}^3$ .

Вплив кількості мікрокремнезему і суперпластифікатора С-3 на міцність керамзитобетону при стиску показано на рис. 1, а, вплив на міцність на розтяг при згині показано на рис. 1, б. Діаграми на рис. 1 побудовані за відповідними ЕС-моделями.

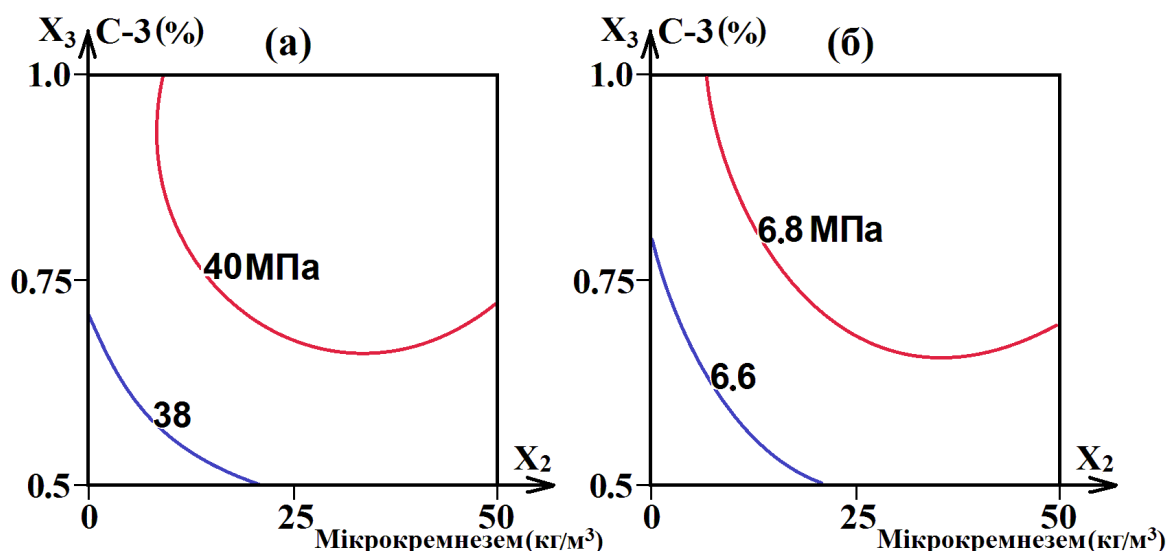


Рис.1. Вплив кількості мікрокремнезему і суперпластифікатора С-3 на міцність керамзитобетону при стиску (а) і на розтяг при згині (б),  $x_1=0$

Аналіз діаграм показує схожість впливу модифікаторів на міцність при стиску досліджених керамзитобетонів і на їх міцність на розтяг при згині. При введенні  $30\text{--}35\text{ кг/м}^3$  мікрокремнезему міцність при стиску підвищується приблизно на 2 МПа, а міцність на розтяг при згині – на 0.3 МПа. Аналогічне підвищенні міцності бетону відбувається при збільшенні кількості добавки С-3 до 0.8-1%, що досягається за рахунок зниження В/Ц суміші. Важливо зазначити, що бетони на пористих заповнювачах відрізняються від важких бетонів більшою міцністю на розтяг при згині за умови зіставної з важким бетоном міцності при стиску. Цей чинник істотно підвищує ефективність застосування керамзитобетонів для тонкостінних конструкцій.

Водонепроникність є одним з основних показників якості для бетонів тонкостінних конструкцій, які експлуатуються в підводному положенні або при контакті з водою. Для подібних конструкцій забезпечення водонепроникності є необхідною умовою їх довговічності. Для суднобудівних бетонів пред'являються найбільш жорсткі вимоги по рівню  $W$ , тому що крім власне довговічності даний показник обумовлює саму експлуатаційну придатність конструкцій споруди [13]. ЕС-модель, що описує вплив факторів складу, що варіювалися, на водонепроникність керамзитобетону, має вигляд:

$$\begin{aligned}
 W \text{ (атм)} = & 10.7 + 2.0x_1 + 1.1x_1^2 - 0.5x_1x_2 - 1.0x_1x_3 \\
 & + 1.4x_2 - 1.9x_2^2 + 0.5x_2x_3 \\
 & + 0.8x_3 - 0.9x_3^2
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

Слід зазначити, що точність даної ЕС-моделі обмежена через специфіку дискретної методики визначення водонепроникності (значення  $W$ , які є фактично тиском у атмосферах, можуть бути лише парними), проте це визначається на загальних тенденціях впливу факторів, що варіювалися. На рис. 2, а показана побудована за ЕС-моделлю (1) діаграма у вигляді куба, яка відображає вплив факторів складу керамзитобетону на його водонепроникність. Як можна побачити з діаграми, найбільш суттєво на рівень  $W$  впливає кількість портландцементу. При підвищенні кількості в'язучого з 500 до 600  $\text{кг}/\text{м}^3$  водонепроникність матеріалу зростає на 2 марки і більш. За рахунок введення у склад керамзитобетонів 30-35  $\text{кг}/\text{м}^3$  мікрокремнезему їх водонепроникність підвищується більш, ніж на марку (2 атмосфери і більше). При збільшенні кількості суперпластифікатору С-3 з 0.5 до 0.8-0.9% рівень  $W$  підвищується на величину до 2 атмосфер (одну марку).

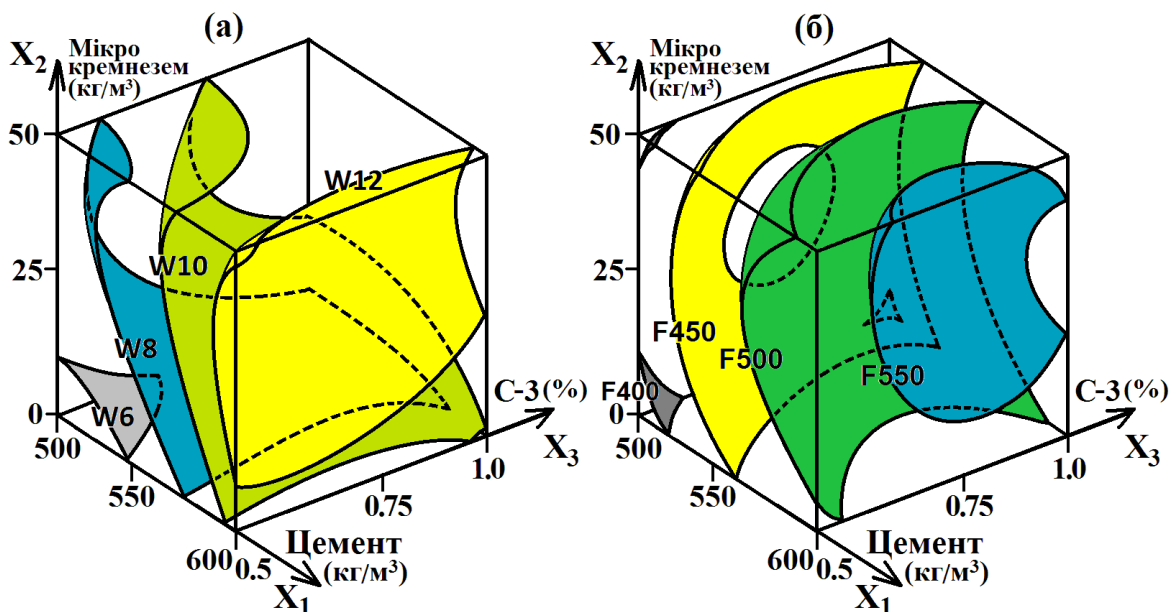


Рис.2. Вплив факторів складу керамзитобетону на його водонепроникність (а) і морозостійкість (б)

Також в рамках проведених досліджень була проаналізована морозостійкість суднобудівних керамзитобетонів. Відомо, що саме показник морозостійкості в значній мірі визначає довговічність бетону при експлуатації конструкцій в вологих і повітряно-вологих умовах в притаманному Україні та іншим європейським країнам кліматі. Діаграма у вигляді куба, що побудована за аналогічною (1) ЕС-моделлю та яка відображає вплив факторів складу керамзитобетону на його морозостійкість, показана на рис. 2, б. Аналіз даної діаграми показує, що морозостійкість досліджених керамзитобетонів знаходилася переважно в діапазоні від F400 до F550. Тобто, морозостійкість даних матеріалів при варіюванні складу змінювалася в меншій мірі, ніж їх водонепроникність. Загальний характер впливу факторів складу керамзитобетону на водонепроникність і морозостійкість є досить схожим, тобто склади з більшою водонепроникністю мали переважно більш високу морозостійкість.

Висока морозостійкість керамзитобетону забезпечується насамперед наявністю в структурі легкого пористого заповнювача, який виконує роль компенсатора при заморожуванні і відтаюванні, а також застосуванню модифікаторів. В найбільшій мірі на морозостійкість керамзитобетонів впливає кількість портландцементу, проте цей вплив має нелінійний характер. Тобто, при підвищенні кількості в'язучого з 500 до 550  $\text{кг}/\text{м}^3$  рівень  $F$  підвищується відчутніше, ніж при зміні кількості цементу з 550 до 600  $\text{кг}/\text{м}^3$ . За рахунок

введення мікрокремнезему в кількості 25-35 кг/м<sup>3</sup> рівень F підвищується приблизно на 50 циклів. Подальше підвищення кількості мікрокремнезему неефективно. Також практично на 50 циклів зростає морозостійкість досліджених керамзитобетонів за рахунок підвищення кількості добавки С-3 з 0.5 до 0.8-0.9% від маси цементу.

Важливо зазначити, що середня густина досліджених керамзитобетонів в сухому стані була від 1660 до 1740 кг/м<sup>3</sup>. У водонасиченому стані середня щільність досліджених бетонів складала від 1780 до 1840 кг/м<sup>3</sup>. Тобто, такі бетони є ефективними для конструкцій тонкостінних гідротехнічних і транспортних споруд, зокрема насосних станцій і плавучих залізобетонних споруд (доків, готелів, будинків).

**Висновки та перспективи подальших досліджень.** За рахунок застосування раціональної кількості модифікаторів, а саме 30-35 кг/м<sup>3</sup> мікрокремнезему і 0,8-0,9% суперпластифікатору С-3, відчутно зростає водонепроникність, морозостійкість і міцність керамзитобетону. Це забезпечує підвищення довговічності даного матеріалу при використанні у тонкостінних гідротехнічних і транспортних спорудах в кліматичних умовах України та в інших країнах з помірним кліматом.

В подальшому плануються дослідження впливу дисперсного армування на механічні властивості та довговічність легких бетонів для тонкостінних гідротехнічних і транспортних споруд.

### Література

1. Бабич Е.М. Конструкции из легких бетонов на пористых заполнителях, К.: Вища школа, 1988. 208 с.
2. Иванов И.А. Легкие бетоны на искусственных пористых заполнителях, М.: Стройиздат, 1993. 182 с.
3. Дворкін Л.Й., Дворкін О.Л. Бетони і будівельні розчини, К.: Основа, 2008. 448 с.
4. Бужевич Г.А., Горчаков Г.И. Долговечность легких бетонов на пористых заполнителях / Всесоюзная конференция по легким бетонам: тезисы докладов, М.: Гостройиздат, 1970. С. 61-73.
5. Бужевич Г.А., Карпикова Л.И. Стойкость керамзитобетона при действии морской воды и хлористых солей высокой концентрации – Бетон и железобетон, 1970, №9. С.16-18.
6. Liu G., Li H. Offshore platform integration and floatover technology – Science press, Beijing, China, 2017. 280 p.
7. Баженов Ю.М., Демьянова В.С., Калашников В.И. Модифицированные высококачественные бетоны. М.: Ассоциация строительных ВУЗов, 2006. 368 с.
8. Аникина В.А. Влияние добавки суперпластификатора на свойства конструктивного керамзитобетона. Автореф. дис. канд. техн. наук: 05.23.05, М., НИИЖБ, 1984. 20 с.
9. Протько Н.С. Подбор составов керамзитобетона плотной структуры, в том числе изготовленного из высокоподвижных бетонных смесей / Проблемы современного бетона и железобетона. Выпуск 5. Минск: СтройМедиаПроект, 2013. С. 212-231.
10. Каверин К.О. Високоміцні легкі керамзитобетони, модифіковані полікарбосилікатними суперпластифікаторами / Будівельні матеріали, виробництва та санітарна техніка. Науково-технічний збірник, 2015, Випуск 56. С. 47-53.
11. Johnsen H., Helland S., Hemdal E. Construction of Stovset Free Cantilever Bridge and the Nordhordland Cable Stayer Bridge / Proceedings of International symposium on structural lightweight aggregate concrete. Sandefjord, 1995. P. 373–379.
12. Ляшенко Т.В., Вознесенский В.А. Методология рецептурно-технологических полей в компьютерном строительном материаловедении. Одесса: Астропринт, 2017. 168 с.
13. Мишутин А.В., Мишутин Н.В. Повышение долговечности бетонов морских железобетонных плавучих и стационарных сооружений. Одесса: Эвен, 2011. 292 с.

Стаття надійшла 5.12.2017