

**БУДІВНИЦТВО ТА ЦИВІЛЬНА ІНЖЕНЕРІЯ (192)**

---

УДК 666.946

**ВПЛИВ ЗОЛОШЛАКІВ КОТЛІВ ІЗ ЦИРКУЛЯЦІЙНИМ КИПЛЯЧИМ ШАРОМ НА МОРОЗОСТІЙКІСТЬ ВАЖКИХ БЕТОНІВ**

Д-р техн. наук В. О. Бондар, канд. техн. наук Р. М. Ахмеднабієв, асп. Р. Р. Ахмеднабієв

**ВЛИЯНИЕ ЗОЛОШЛАКОВ КОТЛОВ С ЦИРКУЛЯЦИОННЫМ КИПЯЩИМ СЛОЕМ НА МОРОЗОСТОЙКОСТЬ ТЯЖЕЛЫХ БЕТОНОВ**

Д-р техн. наук В. А. Бондарь, канд. техн. наук Р. М. Ахмеднабиев, асп. Р. Р. Ахмеднабиев

**INFLUENCE OF SLAGS OF BOILERS WITH CIRCULATING FLUIDIZED BED ON FROST RESISTANCE OF CONCRETE**

Dr. sc. sciences V. O. Bondar, phd. tehn. R. M. Akhmednabiev, sciences, pg. R. R. Akhmednabiev

DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.176.2018.131167>

---

*Наведено результати дослідження впливу золошлаків котлів із циркуляційним киплячим шаром на морозостійкість важких бетонів. У дослідженнях використано портландцемент ПЦ І-500Н; пісок з модулем крупності  $M_{кр}=1,05$ ; щебінь гранітний фракції 5–10 мм; золошлаки котлів із циркуляційним киплячим шаром; гіперпластифікатор «Fluid Premia-196». Дослідження проведено з використанням математичного планування експерименту. Доведено, що із заміщенням піску золошлаками морозостійкість децю знижується, але гіперпластифікатор сприяє компенсації зниження морозостійкості за рахунок зниження В/Ц відношення, як наслідок — утворення супердрібної порової структури бетону. Відомо, що тонкі пори у структурі бетону компенсують напруження від процесу утворення льоду при низьких температурах навколишнього середовища. Встановлено оптимальну витрату цементу з точки зору морозостійкості як при повній, так і при частковій заміні піску золошлаками. Визначено також, що оптимальними слід уважати витрати гіперпластифікатора кількістю 1,2–1,4 % від маси цементу.*

**Ключові слова:** золошлаки, киплячий шар, морозостійкість, математичне планування.

*Приведены результаты исследования влияния золошлаков котлов с циркуляционным кипящим слоем на морозостойкость тяжелых бетонов. В исследованиях использованы портландцемент ПЦ I-500Н; песок с модулем крупности  $M_{кр} = 1,05$ ; щебень гранитный фракции 5–10 мм; золошлаки котлов с циркуляционным кипящим слоем; гиперпластификатор «Fluid Premia-196». Исследование проведено с использованием математического планирования эксперимента. Доказано, что с замещением песка золошлаками морозостойкость несколько снижается, но гиперпластификатор способствует компенсации снижения морозостойкости за счет снижения В/Ц отношения, как следствие — образование супермелкой поровой структуры бетона. Известно, что тонкие поры в структуре бетона компенсируют напряжения от процесса образования льда при низких температурах окружающей среды. Установлено оптимальный расход цемента с*

точки зрення морозостойкости как при полной, так и при частичной замене песка золошлаками. Определено также, что оптимальным следует считать расход гиперпластификатора в количестве 1,2—1,4 % от массы цемента.

**Ключевые слова:** золошлаки, кипящий слой, морозостойкость, математическое планирование.

*The results of the study of the influence of slags of boilers with a circulating fluidized bed on the frost resistance of heavy concrete are presented. In the studies was used following materials: Portland cement PC I-500N, sand with a grain size unit  $M_{kr}=1,05$ , crushed granite fraction 5-10 mm, ashes of boilers with circulating fluidized bed, hyperplasticizer "Fluid Premia-196". The research is conducted using mathematical planning of the experiment.*

*It is proved that with the replacement of sand with ashes, frost resistance is somewhat reduced, but the hyperplasticizer contributes to the reduction of frost resistance by reducing the W/C ratio, resulting in the formation of super-fine pore structure of concrete. Fine pores in the structure of concrete compensate for stress from the process of ice formation at low ambient temperatures.*

*The optimal flow of cement has been established in terms of frost resistance, both by full and partial replacement of sand with ash. It was also determined that the optimum should be considered the consumption of a hyperplasticizer in the amount of 1.2-1.4% of the mass of cement.*

*The introduction of ashes in a concrete mixture leads to a decrease in the frost resistance of concrete. This phenomenon is explained by the fact that the slags have water consumption in three times higher than the amount of sand they replace, therefore they contribute to an increase in the W/C ratio. With the increase in W/C increases both the total volume of open pores, and their average size. At the same time, permeability and water absorption increase and in such concrete less reserve pores are formed. In order to increase the frost resistance of concrete, it is customary to restrict W/C depending on the conditions of concrete service. Reducing W/C is possible, as at the expense of reducing water consumption due to the application of plasticizers additives, and by increasing the cost of cement.*

**Keywords:** ash and slag, fluidized bed, frost resistance, mathematical planning.

**Вступ.** Руйнування бетону в насиченому водою стані при циклічній дії позитивних і негативних температур, а також змінних негативних температур обумовлено комплексом фізичних корозійних процесів, що викликають деформації і механічні пошкодження виробів та конструкцій.

Відомо, що морозостійкість бетону залежить від його будови, особливо від характеру пористості, оскільки останній буде визначати об'єм та розповсюдження льоду, що утвориться у тілі бетону при низьких температурах.

Уведення золошлаків у склад бетонів сприяє збільшенню пористості розчинної частини бетону, що у свою чергу може призвести до зниження морозостійкості.

Але на територіях ТЕС накопичено понад 42 млн т зол та золошлаків, які негативно впливають на навколишнє середовище. Тому актуальність їх використання у бетонах не викликає сумнівів. Деякі ТЕС в Україні використовують нові сучасні котли з циркуляційним киплячим шаром, у яких вугілля спалюється довше, тому золи та золошлаки таких котлів відрізняються від звичайних за структурою частинок та хімічним складом. Вплив таких золошлаків на властивості бетонів досліджено недостатньо.

Раніше нами було досліджено вплив золошлаків котлів із циркуляційним киплячим шаром на міцність важких бетонів [9]. У цій статті наведено результати впливу золошлаків на морозостійкість важких бетонів.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** У мікропорах бетону розмірами  $10^{-5}$  см зазвичай міститься зв'язана вода, що не переходить у лід навіть при занадто низьких температурах (до  $-70^{\circ}\text{C}$ ), тому мікропори не мають значного впливу на морозостійкість бетону [1]. Остання залежить від макропор у бетоні й від їх будови.

Ряд лабораторних досліджень показав, що бетон, який містить золу-винесення та золошлаки, може бути менш морозостійким при заморожуванні і відтаванні [2–4], а більш низьку морозостійкість мають бетони з низьким вмістом цементу або бетони з високим вмістом цементу, але частину цементу у ньому замінено золою-винесення або золошлаками [5, 6].

Бетони із золою-винесення можуть забезпечити задовільну морозостійкість за умови, що використовується водонепроникний цемент і В / Ц не перевищує 0,45, а вміст золи-винесення не перевищує 20–30 %. При цьому, звичайно, передбачається, що бетон має адекватну порову структуру [7].

Ступінь впливу зол та золошлаків на властивості бетону залежить не тільки від їх кількості в суміші, але й від інших параметрів, включаючи склад і пропорції інших інгредієнтів у бетонній суміші, тип і розмір конкретного компонента, умови ущільнення під час укладання та умови твердіння [8, 9].

**Визначення мети та завдання дослідження.** Дослідження впливу золошлаків котлів із циркуляційним киплячим шаром на морозостійкість важких бетонів.

**Матеріали та методика досліджень.**

У роботі використані такі матеріали: портландцемент ПЦ І-500Н виробництва «Haldeberg zement Україна»; пісок із модулем крупності  $M_{кр} = 1,05$  місцевого родовища; золошлаки котлів із циркуляційним киплячим шаром [9]; гіперпластифікатор на основі модифікованих полікарбоксилатів «Fluid Premia-196»; щебінь гранітний фракції 5–10 мм Кременчуцького родовища. Для більш досконалого виявлення впливу золошлаків та гіперпластифікатора на морозостійкість бетонів було реалізовано трирівневу матрицю планування експерименту.

**Основна частина дослідження.**

Морозостійкість визначали прискореним методом. У ДСТУ Б В. 2.7-47-96 встановлено декілька методів визначення морозостійкості бетонів, у тому числі й два прискорених методи. Використано дилатометричний метод визначення морозостійкості шляхом заморожування бетону у середовищі гасу. За цією методикою морозостійкість визначається за максимальною різницею об'ємних деформацій бетонного та стандартного зразків. Стандартний зразок – алюмінієвий кубик зі стороною 100 мм. Вимірювання об'ємних деформацій провадили за допомогою дилатометра «Бетон-Фрост» (рис. 1).

При плануванні експерименту за вхідними параметрами було прийнято:  $X_1$  – витрати цементу;  $X_2$  – витрати гіперпластифікатора;  $X_3$  – ступінь заміщення піску золошлаками. Умови планування експерименту наведено у табл. 1.

Таблиця 1

Умови планування експерименту

Змінні фактори		Рівні варіювання			Інтервал варіювання
Натуральний вигляд	Кодований вигляд	-1	0	+1	
Витрата цементу, кг	$X_1$	400	500	600	100
Вміст добавки, %	$X_2$	0,8	1,4	2,0	0,6
Заміщення піску П – ЗШ	$X_3$	1	0	-1	0,5



Рис. 1. Зовнішній вигляд дилатометра з електронним блоком вимірювання

Зразки бетонів було виготовлено згідно з матрицею математичного планування експерименту. Для кожної серії було виготовлено по три зразки кубика з розміром ребра 100 мм. У марочному віці зразки піддавалися насиченню водою за такою методикою: першу добу занурені у воду на 1/3 висоти, другу добу – на 2/3 висоти, третю добу повністю занурені у воду, і товща води над зразком була 5 см. За три доби насичення водою для кожного зразка визначали точний об’єм методом зважування у воді. Всі три зразки кожної серії випробовувалися на морозостійкість. Зразки укладалися у вимірювальну камеру пристрою, камера заповнювалася гасом і герметично закривалася, після чого пристрій укладався у камеру клімату «Feutron». До пристрою підключали електронний блок через кабелі. Заморожування пристрою із зразками продовжувалося 4,5 години. За цей час

електронний блок записував змінення деформації зразка. Для всіх зразків було визначено максимально відносно збільшення різниці об’ємних деформацій  $\theta$  за формулою

$$\theta = \frac{\Delta V_i}{V_0},$$

де  $\Delta V_i$  – максимальна різниця значень деформацій бетонного та стандартного зразків при заморожуванні;

$V_0$  – початковий об’єм зразка,  $\text{см}^3$ .

За цією різницею, використовуючи таблицю ДСТУ Б В. 2.7-47-96, було визначено морозостійкість бетону.

Результати досліджень бетонів, що виготовлені за матрицею планування експерименту, наведено у табл. 2.

За результатами обробки експериментальних даних було отримано рівняння регресії

$$Y = 448.35 + 111.5X_1 + 42.8X_2 - 84.88X_3 - 6.68X_1^2 - 8.18X_2^2 - 43.2X_3^2 + 6.63X_1X_2 - 33.38X_2X_3.$$

Члени рівняння регресії свідчать про те, що вміст золошлаків має негативний вплив на морозостійкість бетонів, а витрати цементу та пластифікатора – позитивний.

Розв’язання рівняння регресії дає можливість для побудови поверхні впливу вхідних параметрів планування експерименту на морозостійкість бетонів, які наведені на рис. 2–4.

Таблиця 2

Результати випробування бетонів на морозостійкість

№	Змінні параметри			Морозостійкість		
	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$\theta = \frac{\Delta V_i}{V_0}$	Кількість циклів	Відповідна марка, F
	2	3	4	5	6	7
1	600	2	зола	0,304	480	400
2	400	2	зола	0,783	238	200
3	600	0,8	зола	0,548	332	300
4	400	0,8	зола	1,77	105	100
5	600	2	пісок	0,147	633	600
6	400	2	пісок	0,586	380	300
7	600	0,8	пісок	0,184	580	500
8	400	0,8	пісок	0,538	365	300
9	600	1,4	0,5+0,5	0,154	538	500
10	400	1,4	0,5+0,5	0,522	360	300
11	500	2	0,5+0,5	0,313	487	400
12	500	0,8	0,5+0,5	0,319	408	400
13	500	1,4	зола	0,362	390	300
14	500	1,4	пісок	0,298	435	400
15	500	1,4	0,5+0,5	0,299	424	400
16	500	1,4	0,5+0,5	0,309	416	400
17	500	1,4	0,5+0,5	0,247	464	400

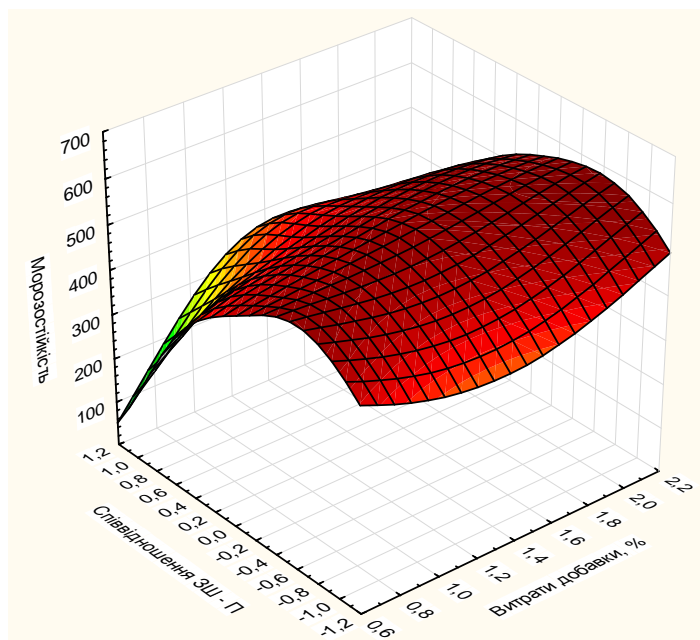


Рис. 2. Поверхня впливу витрат гіперпластифікатора та ступінь заміщення піску золошлаками на морозостійкість бетону

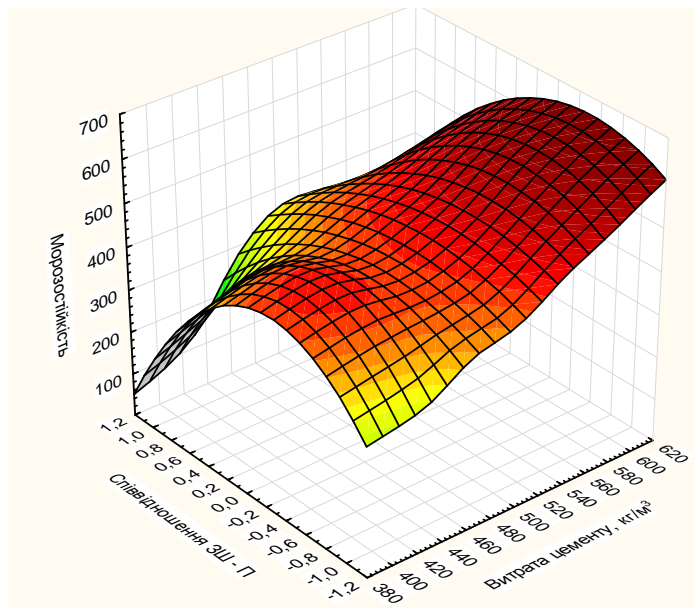


Рис. 3. Поверхня впливу на морозостійкість бетону витрат цементу та співвідношення П-ЗШ

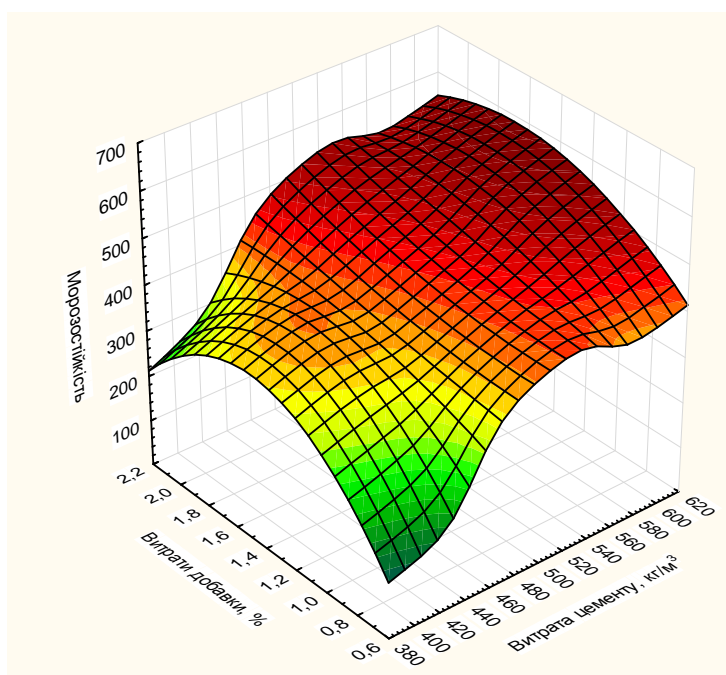


Рис. 4. Поверхня впливу на морозостійкість витрат цементу та добавки

Аналіз сумісного впливу ступеня заміщення піску золошлаками та витрат гіперпластифікатора на морозостійкість бетону показує, що з підвищенням кількості золошлаків у бетоні спочатку морозостійкість бетонів зростає незначно,

але при подальшому збільшенні морозостійкість починає поступово знижуватись. Максимум підвищення морозостійкості спостерігається при заміщенні половини піску золошлаками, тобто П-ЗШ = 0,5. При максимальному заміщенні піску

золошлаками морозостійкість знижується від F400 до F100 циклів.

Аналіз поверхні впливу на морозостійкість витрат цементу та ступінь заміщення піску золошлаками показує, що збільшення морозостійкості бетонів зі збільшенням витрат цементу практично пропорційно. Цей факт не викликає сумнівів, але відомо, що основним компонентом бетону, що сприяє підвищенню морозостійкості, є цемент.

Із збільшенням золошлаків у складі бетону морозостійкість має тенденцію до зниження. Але на поверхні впливу спостерігається максимум при значенні  $Z_{Ш-П} = 0,5$ , тобто золошлаки заміщують пісок тільки наполовину. При зниженні заміщення піску  $Z_{Ш}$  у бетонній суміші спостерігався процес седиментації за рахунок збільшення рухливості бетонної суміші. А при збільшенні заміщення морозостійкість також має тенденцію до зниження, тому що  $Z_{Ш}$  сприяють збільшенню пористості бетону, а, як відомо, морозостійкість бетону залежить від пористості та характеру пор. Очевидно, що пори у бетоні, які утворюються за рахунок уведення пористих золошлаків, більші, ніж гелеві пори цементного каменю. Як було роз'яснено вище, гелеві пори цементного каменю сприяють збільшенню морозостійкості бетонів, виконуючи роль компенсаторів при переході води у лід.

На графіках спостерігаємо, що зі збільшенням вмісту цементу у бетоні, як і слід було очікувати, морозостійкість збільшується, але не пропорційно. Максимальне значення морозостійкості спостерігається при витратах цементу  $460\text{--}500 \text{ кг/м}^3$ , при витратах пластифікатора  $1,2\text{--}1,4 \%$  від маси цементу. Таким чином, оптимальними слід уважати витрати цементу  $460\text{--}500 \text{ кг/м}^3$ , а пластифікатора –  $1,0\text{--}1,4 \%$  від маси цементу.

**Висновки.** Аналізуючи дані, одержані в результаті проведених досліджень, можемо зробити такий висновок:

1. Дослідження підтверджують, що найбільший вплив на морозостійкість бетону має витрата цементу (за рахунок зниження В/Ц). При максимальній витраті цементу та мінімальному заміщенні піску золошлаками марка бетону за морозостійкістю становить F600, при повному заміщенні піску золошлаками морозостійкість знижується до F400. При мінімальному витраті цементу марка за морозостійкістю знижується від F300 до F200.

2. Уведення золошлаків у бетонну суміш призводить до зниження морозостійкості бетонів. Так, при максимальному заміщенні піску золошлаками морозостійкість знижується на одну та дві марки при різних значеннях витрат цементу.

3. При заміщенні піску золошлаками на  $50 \%$  морозостійкість бетонів знижується на одну марку при різних витратах цементу.

### *Список використаних джерел*

1. Баженов, Ю. М. Технология бетона [Текст] : учеб. пособие для вузов / Ю. М. Баженов. – М. : ВШ, 1987. – 414 с.
2. Timms, A. G. Use of fly ash in concrete [Text] / A. G. Timms, W. E. Grieb // Proceedings of ASTM. – Vol. 56, 1956. – P. 1139–1160.
3. Gebler, S. H. Effect of Fly Ash on the Durability of Air-Entrained Concrete [Text] / S. H. Gebler and P. Klieger // Proceedings of the 2nd International Conference on Fly Ash, Silica Fume, Slag, and Natural Pozzolans in Concrete, ACI SP. Vol. 1. American Concrete Institute. – Farmington Hills; MI, 1986. – P. 483–519.

4. Johnston, C. D. Effects of Microsilica and Class C Fly Ash on Resistance of Concrete to Rapid Freezing and Thawing and Scaling in the Presence of Deicing Agents [Text] / C. D. Johnston // Concrete Durability, ACI SP-100, Vol. 2, American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, 1987. – P. 1183–1204.

5. Johnston, C. D. W/CM Code Requirements Inappropriate for Resistance to Deicer Salt Scaling [Text] / C. D. Johnston // Proceedings of the 3rd International Conference on the Durability of Concrete, ACI SP-145, American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, 1994. – P. 85–105.

6. Whiting, D. Strength and Durability of Residential Concretes Controlling Fly Ash [Text] / D. Whiting // RD099, Portland Cement Association. – Skokie: IL, 1989. – 48 p.

7. Afrani, I. The Effects of Different Cementing Materials and Curing on Concrete Scaling [Text] / I. Afrani, C. Rogers // Cement, Concrete, and Aggregates, Vol. 16 (2), 1994. – P. 132–139.

8. Malhotra, V. M. High-Performance, High-Volume Fly Ash Concrete [Text] / V. M. Malhotra, P. K. Mehta // Supplementary Cementing Materials for Sustainable Development Inc., Ottawa, Canada, 2005. – 124 p.

9. Bondar, V. A. Influence of fly ash and slags of boiler with circulating fluidized bed on properties of concrete [Text] / V. A. Bondar, R. R. Akhmednabiev, R. M. Akhmednabiev // 36. наук. праць. Сер. Галузеве машинобудування, будівництво. – Полтава: ПолтНТУ, 2016. – Вип. 2 (47). – С. 148–154

---

Бондар Віктор Олександрович, д-р техн. наук, професор кафедри технології будівельних конструкцій, виробів і матеріалів Полтавського технічного університету імені Юрія Кондратюка. Тел. (066) 2576802.

Ахмеднабієв Расул Магомедович, канд. техн. наук, доцент кафедри технології будівельних конструкцій, виробів і матеріалів Полтавського технічного університету імені Юрія Кондратюка. Тел. (067)532-36-40. E-mail: akhmednabiev4@gmail.com.

Ахмеднабієв Расул Расулович, аспірант кафедри технологій будівельних конструкцій, виробів і матеріалів Полтавського технічного університету імені Юрія Кондратюка. Тел. (050) 999-59-67. E-mail: bimconstructio@gmail.com.

Бондарь Виктор Александрович, д-р техн. наук, профессор кафедры технологий строительных конструкций, изделий и материалов Полтавского технического университета имени Юрия Кондратюка. Тел. (066) 2576802.

Ахмеднабиев Расул Магомедович, канд. техн. наук, доцент кафедры технологий строительных конструкций, изделий и материалов Полтавского технического университета имени Юрия Кондратюка. Тел. (067) 532-36-40. E-mail: akhmednabiev4@gmail.com.

Ахмеднабиев Расул Расулович, аспирант кафедры технологий строительных конструкций, изделий и материалов Полтавского технического университета имени Юрия Кондратюка. Тел. (050) 999-59-67. E-mail: bimconstructio@gmail.com.

Bondar Viktor, Dr. sc. Sciences Professor, Department of building constructions, Products and Materials of Poltava National Technical Yuri Kondratyuk University. Tel. (066) 2576802.

Akhmednabiyev Rasul, PhD. Sc. Associate Professor, Department of building constructions, Products and Materials of Poltava National Technical Yuri Kondratyuk University. Tel. (067)532-36-40. E-mail: akhmednabiev4@gmail.com.

Akhmednabiyev Rasul, post-graduate student, Department of building constructions, Products and Materials of Poltava National Technical Yuri Kondratyuk University. Tel. (050) 999-59-67. E-mail: bimconstructio@gmail.com.

Статтю прийнято 17.03.2018 р.