

УДК 666.972.12

**МОДЕЛИРОВАНИЕ И АНАЛИЗ РЕОЛОГИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ
САМОУПЛОТНЯЮЩИХСЯ ЛЕГКИХ БЕТОННЫХ СМЕСЕЙ
С ЦЕЛЬЮ ПОВЫШЕНИЯ ИХ ТЕХНОЛОГИЧНОСТИ**

Асист. М. В. Острыжнюк, кандидаты техн. наук С. В. Савченко,
С. И. Гедулян, Н. Р. Антонюк (ОГАСА)

**МОДЕЛЮВАННЯ ТА АНАЛІЗ РЕОЛОГІЧНИХ ПОКАЗНИКІВ
ЛЕГКИХ БЕТОННИХ СУМІШЕЙ, ЩО САМОУЩІЛЬНЮЮТЬСЯ,
З МЕТОЮ ПІДВИЩЕННЯ ЇХ ТЕХНОЛОГІЧНОСТІ**

Асист. М. В. Острижнюк, кандидати техн. наук С. В. Савченко,
С. І. Гедулян, Н. Р. Антонюк (ОДАБА)

**MODELING AND ANALYSIS OF RHEOLOGICAL INDICATORS
OF SELF-COMPACTING LIGHTWEIGHT CONCRETE
TO INCREASE THEIR PROCESSABILITY**

Assistant M. Ostryzniuk, cand. of techn. sciences S. Savchenko, S. Gedulyan, N. Antoniuk

DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.178.2018.139009>

В статье предложен способ повышения технологических показателей самоуплотняющихся бетонных смесей на основе легкого керамзитового заполнителя посредством управления реологическими параметрами их цементной матрицы, за счет применения функциональных групп модифицирующих добавок и мелкодисперсной минеральной добавки с использованием аналитических методов компьютерного материаловедения. Этот подход позволяет решить основную проблему при применении бетонов на легком заполнителе – вытеснение зерен керамзита жидкой растворной фазой – с обеспечением требуемой подвижности и сохранением высокой стабильности.

Ключевые слова: самоуплотняющиеся легкие бетонные смеси, реология, параметры модели реологического поведения.

У статті запропоновано спосіб підвищення технологічних показників бетонної суміші, що самоущільнюється, на основі легкого керамзитового заповнювача за допомогою управління реологічними параметрами їх цементної матриці, за рахунок використання функціональних груп модифікувальних добавок та дрібнодисперсної мінеральної добавки з використанням аналітичних методів комп'ютерного матеріалознавства. Завданням дослідження було забезпечення в таких сумішах підвищеної пластичності і високої стабільності, що дасть змогу зберегти їх високу рухливість і вирішити проблему витиснення зерен легкого заповнювача. Запропоновано адекватну модель реологічної поведінки розчинів, що досліджувались. Встановлено вплив дрібнодисперсної мінеральної добавки, пластифікувальної добавки карбоксилатного типу та стабілізатора на реологічні параметри (коефіцієнт в'язкості k та граничне напруження зсуву τ_0) легкої бетонної суміші, що самоущільнюється. Показано, що введення пластифікувальної добавки та золи-винесення в кількості до 15% у значній мірі знижує індекс течії, що забезпечує зростання коефіцієнта в'язкості, підвищуючи пластичність суміші. Підвищення опірності рідкої фази розчину тиску, спливаючих при більш низькій щільності зерен заповнювача, досягається за рахунок введення золи-винесення, яка ущільнює

цементну матрицю, і добавки-стабілізатора до 0,035 %. Даний підхід, що базується на аналізі однофакторних залежностей впливу факторів, що варіюються, на коефіцієнти моделі реологічної поведінки, дає змогу вирішити основну проблему при застосуванні бетонів на легкому заповнювачі – витиснення керамзитових зерен рідкою розчинною фазою – з забезпеченням необхідної рухомості та збереженням високої стабільності. В результаті аналізу отриманих теоретичних та практичних даних зроблено припущення, що, балансує між показниками коефіцієнтів k і τ_0 , теоретично є можливим отримати бетонну суміш на легкому заповнювачі, що самоущільнюється, із забезпеченням її рухливості і однорідності.

Ключові слова: легкі бетонні суміші, що самоущільнюються, реологія, параметри моделі реологічної поведінки.

In this paper we propose way to improve the technological performance of self-compacting concrete based on lightweight expanded clay aggregate by control of rheological parameters of their cement matrix by purposeful modifying of additives' functional groups and microfine mineral filler using analytical methods of computer materials science. The aim of the study was to ensure in such mixtures an increased plasticity and high stability, which can allow them to retain their high mobility and solve the problem of displacing grains of lightweight aggregate. During the analyze the results of rheometry of the investigated solution mixtures the most appropriate model describing their rheological behavior has been determined. The effect on the rheological parameters of the self-compacting lightweight concrete mixes (viscosity coefficient and yield point) of a finely dispersed fly ash excipient, a carboxylate superplasticizer, and a stabilizer additive was established. It has been shown that the adding of a plasticizing additive and fly ash in an amount of up to 15% significantly reduces the flow index, which provides an increase in the viscosity coefficient, increasing the plasticity of the mixture, and an increase in the resistance of the liquid phase of the solution to the pressure of floating at a lower density aggregate grain is achieved by adding fly ash, sealing cement matrix, and stabilizer additives up to 0.035%. This approach of analyze of monofactorial dependencies of variable factors' influence on coefficients of rheological behavior models allows to solve the main problem when using concrete on lightweight aggregate – crowding out expanded clay grains by solution liquid phase – with providing the necessary fluidity (workability, passing and filling ability, flowability) and maintaining high stability (structure viscosity, segregation resistance). As a result of the analysis of the theoretical and practical data obtained, it was assumed that balancing between the coefficients k and τ_0 , it is theoretically possible to obtain a concrete mixture on a self-compacting lightweight aggregate, ensuring its mobility and homogeneity.

Keywords: self-compacting lightweight concrete mixes, rheology, parameters of rheological behavior models.

Введение. Самоуплотняющийся бетон на легком заполнителе является высокоэффективным материалом, который сочетает в себе преимущества конструкционного легкого бетона (LWC), такие как: снижение постоянных нагрузок, высокая тепло- и звукоизоляционная способность, повышенная долговечность, устойчивость к температурному и химическому воздействию [1] с характеристиками самоуплотняющихся

бетонных смесей (SCC), выраженных в улучшенной заполняемости опалубки и высокой проходимости, а также устойчивости к сегрегации [2]. Очевидный контраст между свойствами, такими как низкая «плотность» (низкая динамическая энергия смеси во время течения) и самоуплотняемость, которая зависит от динамических характеристик, делает производство самоуплотняющихся легких бетонов (SCLWC) весьма неблагоприятным

ятным. Тем не менее, опыт, полученный зарубежными учеными [3-5], показал, что правильно спроектированные и приготовленные смеси SCLWC отвечают всему комплексу требований при производстве работ с обеспечением высокого уровня качества, что является значительным шагом вперед в изучаемой технологии.

Анализ последних исследований и публикаций. Над проблемами технологии SCC работают такие зарубежные исследователи, как Okamura H., Andreas L., Bram D., Nai-Qian F., Hao-Wen Y., Sahmaran M., Yun Wang C. и др. Внедрению технологии SCC в украинскую практику способствуют работы Коваля С. В., Болотских О. Н., Полякова Д. М. и др. Из анализа данных работ следует вывод, что тип и характеристики легковесных заполнителей являются основными факторами, влияющими на качественные показатели как бетонной смеси, так на физико-механические свойства затвердевшего бетона, а характеристики таких заполнителей разнятся не только от типа материала, но и в границах того же типа, произведенного на разных заводах.

Среди основных проблем при разработке самоуплотняющегося керамзитобетона следует выделить его низкий объемный вес вследствие характеристик применяемого заполнителя.

Основным компонентом смесей SCLWC является керамзитовый заполнитель фракции до 10 мм, что влечет за собой проблему вытеснения его зерен жидкой фазой, снижая однородность их распределения по объему. Решением может являться тщательное регулирование зернового каркаса смеси (минимизация разности «плотностей» между цементной пастой, наполнителем и заполнителем) и обеспечение оптимальных реологических свойств на уровне растворной матрицы.

При сравнительном анализе классических SCC смесей и SCLWC, полученных с использованием методики,

разработанной в Uniwersytet Warmińsko-Mazurski w Olsztynie (UWM) при участии проф. Коваля С. В. [6], на основе компонентов, подобранных при изучении работ по этому направлению, отмечается явное увеличение доли золы-уноса и песка (легкого или тяжелого, либо их комбинации). Также при необходимости получения высокопрочного бетона может наблюдаться повышение расхода цемента.

Определение цели и задания исследования. Целью данной работы являлось изучение влияния на реологические параметры растворной матрицы SCLWC активной минеральной добавки золы-уноса, стабилизатора и пластифицирующей добавки поликарбоксилатного типа. Задачей исследования было обеспечение в таких смесях повышенной пластичности и высокой стабильности, что может позволить сохранить их высокую подвижность и решить проблему вытеснения зерен легковесного заполнителя.

Основная часть исследования. Придание смеси качественных показателей по технологичности (подвижность, сегрегация) возможно посредством регулирования параметров моделей реологического поведения (рис. 1), а именно вязкостного коэффициента k , $\text{Па}\cdot\text{с}^{1/n}$, и предела текучести τ_0 , Па [7, 8]. Анализ результатов реометрии исследуемых растворных смесей показал, что наиболее целесообразным является использование модели Гершеля-Балкли.

Так, повышенная пластичность смеси (и, следовательно, подвижность) достигается повышением k за счет снижения индекса течения n при увеличении концентрации твердой фазы в растворе (уплотнение ее структуры мелкодисперсной минеральной добавкой), а высокая стабильность смеси (снижение риска вытеснения керамзита на поверхность) может быть достигнута ограниченным повышением предельного напряжения сдвига растворной фазы τ_0 .



Рис. 1. Схема зависимости технологичности от реологических показателей растворной матрицы SCLWC

Балансируя между этими показателями коэффициента k и τ_0 , теоретически является возможным получить самоуплотняющуюся бетонную смесь на легком заполнителе с обеспечением его подвижности и однородности.

Как показывают многочисленные исследования [9, 10], для управления в значительной мере индексом течения в суспензиях на основе портландцементного вяжущего применяют различной природы полимерные редиспергируемые порошки (поливинилацетатные, винилацетатэтиленовые и др.), которые за счет образования в цементном растворе пленок вокруг частиц способны значительно изменять данный реологический показатель. Однако применение таких довольно дорогостоящих

полимерных добавок в составе самоуплотняющихся бетонных смесей нецелесообразно.

Для этого проведен эксперимент на уровне цементной матрицы по D-оптимальному трехфакторному плану (табл. 1) с 15 опытными точками. В составе цементных паст варьировались следующие рецептурные факторы: содержание золы-уноса Ольштынской ТЭС (дисперсность $2700 \text{ см}^2/\text{г}$) (FA) $X_1 = 15 \pm 15 \%$, состав активной минеральной добавки приведен в табл. 2; пластифицирующая добавка Sika ViscoCrete-20 Gold на основе поликарбосилатных эфиров (плотность $1,06 \text{ г}/\text{см}^3$; содержание $\text{Cl} \leq 0,10 \%$; Na_2O эквивалент $\leq 1,50 \%$; $\text{pH} = 4$) (SP) $X_2 = 0,15 \pm 0,15 \%$; стабилизатор смеси CX ISOSTAB 6003 на

основе натурального полисахарида (плотность $1,01 \pm 0,02 \text{ г/см}^3$; содержание $\text{Cl} \leq 0,10 \%$; Na_2O эквивалент $\leq 0,50 \%$) (ST)

$X_3 = 0,03 \pm 0,03 \%$. В качестве вяжущего использовался цемент СЕМ I 52,5 R (С).

Таблица 1

План эксперимента и уровни варьирования факторов

№ п/п	X ₁	X ₂	X ₃	FA, %	SP, %	ST, %	FA, г	SP, мл	ST, мл	C, г	W, мл
1	-1	-1	-1	0	0	0	0	0	0	3000	1140
2	-1	-1	1	0	0	0,06	0	0	1,8		
3	-1	0	0	0	0,15	0,03	0	4,5	0,9		
4	-1	1	-1	0	0,3	0	0	9	0		
5	-1	1	1	0	0,3	0,06	0	9	1,8		
6	0	-1	0	15	0	0,03	450	0	0,9	2550	
7	0	1	0	15	0,3	0,03	450	9	0,9		
8	0	0	-1	15	0,15	0	450	4,5	0		
9	0	0	1	15	0,15	0,06	450	4,5	1,8		
10	0	0	0	15	0,15	0,03	450	4,5	0,9		
11	1	-1	-1	30	0	0	900	0	0	2100	
12	1	-1	1	30	0	0,06	900	0	1,8		
13	1	0	0	30	0,15	0,03	900	4,5	0,9		
14	1	1	-1	30	0,3	0	900	9	0		
15	1	1	1	30	0,3	0,06	900	9	1,8		

Таблица 2

Состав активной минеральной добавки

% массы	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	CaO	K ₂ O	TiO ₂	MnO	Na ₂ O
Зола-уноса (черный уголь)	59,2	24,3	8,1	0,5	2,6	2,3	1,0	0,1	0,63

Эксперимент проводился в Варминско-Мазурском университете (Ольштын, Польша) на современном оборудовании, в частности на абсолютном реометре Rheotest RN 4, позволяющем в обоих режимах измерения (CS/CR) производить построения кривых вязкости и течения в широких деформационных диапазонах и проводить их комплексный реологический анализ. Прибор имеет множество измерительных систем: конус – пластина, пластина – пластина, концентрические цилиндры, и оборудован модулем контроля температуры Пельтье.

По результатам анализа полученных экспериментальных данных в системе COMPEX были построены модели влияния используемых добавок на индекс течения n (рис. 2).

Видно, что введение пластифицирующей добавки Sika Gold (за счет снижения поверхностного натяжения и стерического эффекта добавки [2]), а также наличие золы-уноса (в результате создания прослоек и блокирования зерен цемента) в количестве до 15 % в значительной степени снижает индекс течения, что обеспечивает рост коэффициента вязкости, повышая пластичность смеси. Дальнейшее введение

твердой фазы требуется только в случае, если увеличение k не сопровождается соответствующим снижением n , тем самым приводя к увеличению вязкости системы и, как следствие, потере пластичности [11],

что приводит к необходимости введения в смесь значительного количества воды [12]. В нашем же случае введение золы-уноса выше указанной дозировки нецелесообразно.

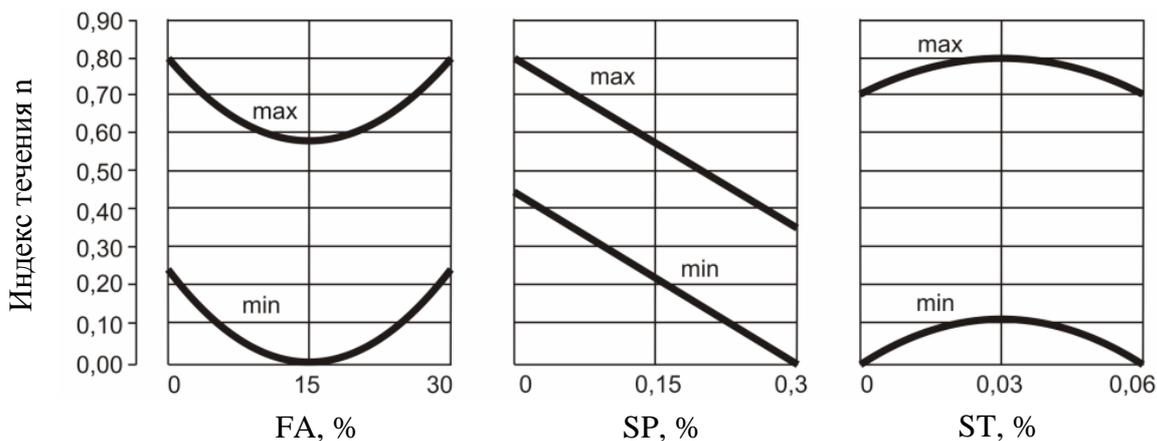


Рис. 2. Влияние факторов состава на индекс течения n в зонах максимума и минимума

Как показывают однофакторные зависимости (рис. 3), повышение сопротивляемости жидкой фазы раствора давлению всплывающих при более низкой плотности зерен заполнителя достигается за счет

введения золы-уноса, уплотняющей цементную матрицу, и добавки ISOSTAB до 0,035 %, обладающей высоким стабилизирующим эффектом.

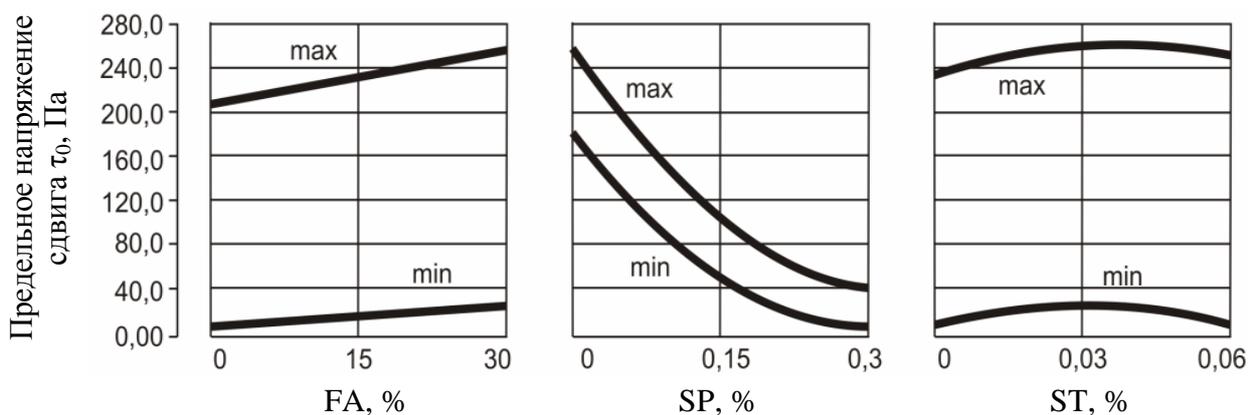


Рис. 3. Влияние факторов состава на предельное напряжение сдвига τ_0 в зонах максимума и минимума

Выводы. Таким образом, в работе показана возможность получения самоуплотняющихся легких бетонов на керамзитовом заполнителе с обеспечением повышенной подвижности и стабильности с позиции управления реологическими показателями цементной матрицы бетон-

ных смесей, за счет целенаправленного модифицирования пластифицирующей добавки Sika ViscoCrete-20 Gold, стабилизатора CX ISOSTAB 6003 и введения в состав активной минеральной добавки золы-уноса.

Список использованных источников

1. Попов, К. Н. Строительные материалы и изделия [Текст] : учебник / К. Н. Попов, М. Б. Каддо. – М. : Высшая школа, 2001. – 367 с.
2. Коваль, С. В. Моделирование и оптимизация состава и свойств модифицированных бетонов [Текст] / С. В. Коваль. – Одесса : Астропринт, 2012. – 264 с.
3. Maghsoudi, A. A. Mix design and mechanical properties of self-compacting lightweight concrete [Text] / A. A. Maghsoudi, Sh. Mohamadpour, M. Maghsoudi // Int. Journal of Civil Eng. – 2011. – V. 9, № 3. – P. 230-236.
4. Hubertova, M. Development and experimental study on the properties of light-weight self-compacting concrete [Text] / M. Hubertova, R. Hela // In 5th RILEM Symposium on SCC. Ghent, Belgium, 2007. – P. 851-856.
5. Okamura, H. Self-Compacting Concrete [Text] / H. Okamura, M. Ouchi // Journal of Advanced Concrete Technology. – Tokyo: Japan Concrete Institute, 2003. – Vol. 1, № 1. – P. 5-15.
6. Острыжнюк, М. В. Самоуплотняющийся легкий бетон: состав и свойства [Текст] / М. В. Острыжнюк // Вісник ОДАБА. – Одеса : Зовнішрекламсервіс, 2015. – Вип. 57. – С. 335-340.
7. Поляков, Д. М. Самоуплотняющиеся бетоны с карбонатным наполнителем [Текст] : дисс. ... канд. техн. наук : 05.23.05 / Поляков Дмитрий Михайлович. – Одесса : ОГАСА, 2010. – 201 с.
8. Гедулян, С. И. Эффективные полимерцементные растворы для ремонта железобетонных конструкций [Текст] : дисс. ... канд. техн. наук : 05.23.05 / Гедулян Сергей Иванович. – Одесса : ОГАСА, 2016. – 199 с.
9. Влияние полимерной фибры на эффективную вязкость полимерминеральных композиций при разных скоростях сдвига [Текст] / В. А. Вознесенский, Т. В. Ляшенко, С. А. Крюковская, Т. И. Пищева // Вісник ДНАБіА. – Макіївка : ДНАБіА, 2010. – Вип. №1(81). – С. 226-232.
10. Попов, О. А. Реологические параметры трехкомпонентных полимерных эмульсий на основе жидкой фазы, насыщенной гидроксидом кальция [Текст] / О. А. Попов, К. М. Москалева, А. В. Рожнюк // Вісник ОДАБА. – Одеса : Зовнішрекламсервіс, 2015. – Вип. 52. – С. 335-340.
11. Контроль реологических свойств буровых растворов по показателям k и n и эффективной вязкости при низких скоростях сдвига [Электронный ресурс] : [Веб-сайт]. – Электронные данные. – FTK NNov Company, 2012 . – Режим доступа: <http://www.ftk-nnov.ru/problemu-promyvki-skvazhin-s-gorizontalnymi/kontrol-reologicheskix-svoystv-burovyx-rastvorov.html> (дата звернення 23.10.2015).

12. Zaichenko, M. The influence of extra mixing water on the properties of structural lightweight aggregate concrete [Text] / M. Zaichenko, S. Lakhtaryna, A. Korsun // *Procedia Engineering*, 2015. – Vol. 117. – Pp. 1036-1042.

Острижнюк Максим Володимирович, асистент кафедри процесів та апаратів у технології будівельних матеріалів Одеської державної академії будівництва та архітектури. Тел.: (066) 202-78-81. E-mail: lightlyman@ukr.net.
Савченко Світлана Валентинівна, канд. техн. наук, доцент кафедри процесів та апаратів у технології будівельних матеріалів Одеської державної академії будівництва та архітектури. Тел.: (095) 682-84-28.
E-mail: koval_sv@ukr.net.

Гедулян Сергій Іванович, канд. техн. наук, доцент кафедри процесів та апаратів у технології будівельних матеріалів Одеської державної академії будівництва та архітектури. Тел.: (063) 450-08-05. E-mail: rio@ogasa.org.ua.
Антонюк Надія Романівна, канд. техн. наук, доцент кафедри процесів та апаратів у технології будівельних матеріалів Одеської державної академії будівництва та архітектури. Тел.: (067) 489-06-96.
E-mail: antonuk_nr@ukr.net.

Острижнюк Максим Владимирович, ассистент кафедры процессов и аппаратов в технологии строительных материалов Одесской государственной академии строительства и архитектуры. Тел.: (066) 202-78-81.
E-mail: lightlyman@ukr.net.

Савченко Светлана Валентиновна, канд. техн. наук, доцент кафедры процессов и аппаратов в технологии строительных материалов Одесской государственной академии строительства и архитектуры.
Тел. : (095) 682-84-28. E-mail: koval_sv@ukr.net.

Гедулян Сергей Иванович, канд. техн. наук, доцент кафедры процессов и аппаратов в технологии строительных материалов Одесской государственной академии строительства и архитектуры. Тел. : (063) 450-08-05.
E-mail: rio@ogasa.org.ua.

Антонюк Надежда Романовна, канд. техн. наук, доцент кафедры процессов и аппаратов в технологии строительных материалов Одесской государственной академии строительства и архитектуры.
Тел. : (067) 489-06-96. E-mail: antonuk_nr@ukr.net.

Ostryzniuk Maksym Volodymyrovych, assistant professor of the Department of Processes and Apparatus in the Building Materials Technologies of the Odessa State Academy of Civil Engineering and Architecture.
Tel.: (066) 202-78-81. E-mail: lightlyman@ukr.net.

Savchenko Svitlana Valentynivna, Candidate of technical sciences, Associate professor of Processes and Apparatus in the Building Materials Technologies of the Odessa State Academy of Civil Engineering and Architecture.
Tel.: (095) 682-84-28. E-mail: koval_sv@ukr.net.

Gedulyan Sergii Ivanovich, Candidate of technical sciences, Associate professor of Processes and Apparatus in the Building Materials Technologies of the Odessa State Academy of Civil Engineering and Architecture.
Tel.: (063) 450-08-05. E-mail: rio@ogasa.org.ua.

Antoniuk Nadiia Romanivna, Candidate of technical sciences, Associate professor of Processes and Apparatus in the Building Materials Technologies of the Odessa State Academy of Civil Engineering and Architecture.
Tel.: (067) 489-06-96. E-mail: antonuk_nr@ukr.net.

Статтю прийнято 7.06.2018 р.