

Таблиця 1

Зависимость констант скоростей реакций от температуры

Температура, °C		Константа скорости k, см ³ /моль·с						
		300	350	400	450	500	550	600
Температура, К		573	623	673	723	773	823	873
Реакции	OH+CO=CO ₂ +H	1,51·10 ¹²	1,71·10 ¹²	1,9·10 ¹²	2,08·10 ¹²	2,25·10 ¹²	2,42·10 ¹²	2,57·10 ¹²
	H+O ₂ =OH+O	7,28·10 ⁻¹	1,05·10 ¹	1,03·10 ²	7,35·10 ²	4,05·10 ³	1,82·10 ⁴	6,89·10 ⁴
	H+H ₂ O=H ₂ +OH	2,51·10 ⁻⁵	3,38·10 ⁻³	5,36·10 ⁻²	5,74·10 ⁻¹	4,67	2,88·10 ¹	1,44·10 ²

Литература

1. Панов, Е.Н. Определение состава газовых выбросов обжиговых печей при производстве электродов [Текст] / Е.Н. Панов, И.Л. Шилович, Е.И. Иваненко, В.В. Буряк // Вісник Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут». Серія «Хімічна інженерія, екологія та ресурсозбереження». – 2012. - №1(9). – С. 75-77.
2. Мальцев, В.М. Основные характеристики горения [Текст] / В.М. Мальцев, М.И. Мальцев, Л.Я. Кашпоров. – М.: Химия, 1977. – 320 с.

УДК 621.785:666.362

ВПЛИВ КОНФІГУРАЦІЇ ЗЕРЕН І ЗЕРНОВОГО СКЛАДУ ЗАПОВНЮВАЧА НА ВЛАСТИВОСТІ БЕТОНУ

Ю. А. Онасенко

Аспірант*

Контактний тел.: 066-438-72-08

E-mail: Juliany4@mail.ru

В. В. Пісчанська

Доцент*

Контактний тел.: 050-693-96-77

E-mail: v_peschanska@mail.ru

Л. Д. Пилипчатін

Доцент*

Контактний тел.: (056) 778-39-96

*Кафедра хімічної технології

кераміки і вогнетривів

Національна металургійна академія України

пр. Гагаріна, 4, м. Дніпропетровськ, Україна, 49005

З використанням симплекс-грантчастого методу планування експерименту досліджено вплив конфігурації зерен і зернового складу заповнювача на властивості вогнетривкого низькоцементного шамотного бетону. Встановлено оптимальний зерновий склад заповнювача із зернами різної конфігурації

Ключові слова: бетон, заповнювач, зерновий склад, властивості

С использованием симплекс-решетчатого метода планирования эксперимента исследовано влияние конфигурации зерен и зернового состава заполнителя на свойства огнеупорного низькоцементного шамотного бетона. Установлено оптимальный зерновой состав заполнителя с зернами различной конфигурации

Ключевые слова: бетон, заполнитель, зерновой состав, свойства

Has been researched the influence of the configuration the grain and granularity of the aggregate on the properties of the refractory low-cement of fireclay concrete by using simplex method of experiment planning. The optimum granularity of the aggregate with grains of different configurations was established

Keywords: concrete, aggregate, granularity, properties

1. Вступ

Пріоритетним напрямком розвитку вогнетривкої галузі є впровадження новітніх енергозберігаючих

технологій виготовлення вогнетривких матеріалів, до яких відносяться бетони «нового» покоління, зокрема низькоцементні. Збільшенню об'ємів виробництва цих бетонів сприяє можливість зниження витрат палив-

но-енергетичних ресурсів та скорочення тривалості технологічного циклу виготовлення, що у поєднанні з високими фізико-механічними та експлуатаційними властивостями бетонів обумовлює розширення галузей їх застосування для футеровок теплових агрегатів різного призначення [1 – 4].

Серед низькоцементних бетонів найбільше поширення знайшли корундові бетони на основі високовартісного електроплавненого корунду, які використовуються для виготовлення монолітних футеровок і виробів відповідального призначення з температурою експлуатації понад 1500 °С. Алюмосилікатні низькоцементні бетони, зокрема шамотні, застосовують для виготовлення виробів і монолітних футеровок елементів агрегатів з температурою служби до 1300 °С [1, 4, 5]. Особливу актуальність набуває використання низькоцементних бетонних виробів та монолітних футеровок різних зон обертових печей, які призначено для випалу глинистої сировини при виробництві вогнетривкого матеріалу масового виробництва – шамоту.

Основною задачею при виготовленні низькоцементних бетонів є необхідність отримання гранично щільної упаковки мінеральних складових бетонних мас у процесі їх вібраційного формування, що забезпечує створення щільної й міцної структури бетонів. Визначальним фактором ущільнення бетонних мас та їх реологічних характеристик при віброформуванні є зерновий склад заповнювача, ефективність вибору якого залежить від кількісного співвідношення заповнювача різних фракцій, морфологічних характеристик зерен – їх конфігурації та рельєфу поверхні [2, 6, 7].

При проектуванні оптимальних структур бетонів вибір зернового складу здійснюють за аналітичними залежностями Фуллера, Андреасена, Болеме, або за поліноміальними моделями, які отримано з використанням методів математичного планування експерименту [6 – 11]. Теоретичний і практичний досвід отримання щільних упаковок бетонних мас свідчить про ефективність використання зерен заповнювача сферичної форми, але практична реалізація отримання заповнювача сфероподібної форми ускладнюється необхідністю розробки технологій гранулювання та застосування спеціального обладнання [12]. Вирішення цієї проблеми може бути досягнуто шляхом використання існуючої технології виготовлення кускового шамоту при випалі глинистої сировини в обертовій печі. За рахунок обертання корпусу печі здійснюється переміщення кусків глинистого матеріалу з одночасним подрібненням й окоченням поверхонь зерен матеріалу. Діапазон фракційного складу шамоту після випалу дозволяє отримувати вогнетривкий матеріал переважно окотаної форми, який може бути використано в якості заповнювача бетонних сумішей. Крім того, такий шамот не потребує додаткового подрібнення, що суттєво знизить витрати енергоресурсів при підготовці заповнювача бетонних сумішей.

З метою оптимізації зернового складу заповнювача в роботі досліджено вплив геометричної конфігурації зерен шамоту після випалу в обертовій печі та його зерен після додаткового подрібнення на властивості шамотного низькоцементного бетону.

2. Використовувані матеріали та методики досліджень

При проведенні досліджень використовували заповнювач – шамот марки ШКВ-2 виробництва ПАТ «Великоанадольський вогнетривкий комбінат» фракцій 6–3 мм, 3–0,088 мм і менше 0,088 мм, високоглиноземистий цемент «Gorkal-70» (Польща). Шамот кусковий після випалу в обертовій печі розсіювали на фракції 6–3 мм і 3–0,088 мм, при цьому розподіл вузьких фракцій зерен відповідав даним, наведеним у табл. 1.

Таблиця 1

Гранулометричний склад шамоту

Фракція, мм	Вміст зерен розміром, мм, %						
	6–5	5–4	4–3	3–2	2–1	1–0,5	0,5–0,088
6–3	32,6	66,0	1,4	-	-	-	-
3–0,088	-	-	-	1,1	22,2	37,0	39,7

При проведенні досліджень також використовували шамот після подрібнення у кульовому млині, який розсіювали на вузькі фракції, і потім згідно до гранулометричного складу (табл. 1) готували заповнювач фракцій 6–3 мм і 3–0,088 мм. Тонкодисперсну фракцію заповнювача – менше 0,088 мм отримували після помелу у лабораторному вібраційному млині

Шамот, що відібрано після випалу в обертовій печі, представлено переважно зернами округлої (окотаної) форми та складної геометричної конфігурації з окотаними поверхнями (рис. 1а), а зерна шамоту після помелу у кульовому млині характеризуються кутастою формою (рис. 1б).



Рис. 1. Конфігурація зерен шамоту: (а) – після випалу у обертовій печі; (б) – після додаткового помелу у кульовому млині

Для попереднього визначення областей зернових складів заповнювача бетонних сумішей, з використанням симплекс-гратчастого методу планування експерименту визначали ступінь ущільнення шамоту у вигляді зерен різної геометричної конфігурації, який оцінювали за показником насипної щільності матеріалу у сухому стані при вібрації. У якості факторів прийняли вміст шамоту фракцій 6–3 мм (X_1), 3–0,088 мм (X_2), менше 0,088 мм (X_3). Для визначення насипної щільності застосовували воронку із отвором висотою 75 мм і верхнім та нижнім діаметрами 100 мм і 25 мм, яку закріплювали на висоті 100 мм над поверхнею циліндру об'ємом 145 см³. У воронку засипали матеріал, відкривали отвір і заповнювали циліндр при частоті вібрації 50 Гц протягом 30 сек. На-

сипну щільність заповнювача розраховували за формулою:

$$\gamma_{\text{нас}} = \frac{m_1 - m_2}{V}, \text{ г/см}^3, \quad (1)$$

де m_1 - маса циліндра з матеріалом, г;
 m_2 - маса циліндра, г;
 V - об'єм циліндра, см^3 .

Дослідження впливу зернового складу заповнювача з зернами різної конфігурації на показники властивостей шамотного бетону, що містить 5 % цементу проводили на симплексі. У якості факторів обрано: вміст заповнювача фракцій 6 – 3 мм – X_1 , 3 – 0,088 мм – X_2 , вміст тонкодисперсного заповнювача фракції менше 0,088 мм і високоглиноземистого цементу – X_3 .

При проведенні досліджень на симплексі визначення середніх значень насипної щільності заповнювача і показників властивостей бетонних зразків проводили за результатами 5 паралельних дослідів.

За умовами експерименту введення у склад бетонних сумішей водоредуруючих та пластифікуючих добавок непередбачено, тому для забезпечення необхідних формувальних властивостей композицій бетонних мас їх вологість була підвищена і складала 9,5 – 10,5 %. Приготування бетонних мас здійснювали у лабораторній мішалці за наступним режимом: сухе перемішування заповнювача й цементу 4 хв., зволоження водою і перемішування маси 4 хв. З отриманих мас формували зразки-куби з розміром ребра 40 мм за методом вібраційного формування в розбірних металевих формах при частоті 50 Гц. Експериментальні зразки після твердіння на повітрі протягом двох діб випалювали при максимальній температурі 1300 °С з витримкою при максимальній температурі 3 години. Показники властивостей низькоцементних бетонних зразків визначали згідно вимог стандартів: відкриту пористість (Π) і уявну щільність (ρ) відповідно до ГОСТ 2409 – 95, границю міцності при стиску (σ) – ГОСТ 4071.1 – 94.

3. Результати експерименту та їх обговорення

План експерименту та результати визначення насипної щільності заповнювача з зернами різної конфігурації наведено у табл. 2.

Таблиця 2

Матриця планування експерименту та насипна щільність заповнювача

номер	Фактори						Насипна щільність, γ , г/см ³	
	Кодовані значення			Натуральні значення, %			Зерна окотаної форми	Зерна кутастої форми
	X_1	X_2	X_3	X_1	X_2	X_3		
1	1	0	0	100	0	0	1,27	1,21
2	0	1	0	0	100	0	1,37	1,31
3	0	0	1	0	0	100	1,51	1,51
4	1/2	1/2	0	50	50	0	1,48	1,35
5	1/2	0	1/2	50	0	50	1,53	1,38
6	0	1/2	1/2	0	50	50	1,46	1,42
7	1/3	1/3	1/3	33,3	33,3	33,3	1,52	1,38

За результатами математичної обробки експериментальних даних отримано поліноміальні моделі другого порядку в системі «склад – властивість»:

$$\gamma = 1,27X_1 + 1,365X_2 + 1,505X_3 + 0,650X_1X_2 + 0,57X_1X_3 + 0,100X_2X_3 \quad (2)$$

для зерен окотаної форми

$$\gamma = 1,205X_1 + 1,305X_2 + 1,510X_3 + 0,360X_1X_2 + 0,090X_1X_3 + 0,030X_2X_3 \quad (3)$$

Порівняльний аналіз графічних інтерпретацій рівнянь регресії (рис. 2) щодо змінення насипної щільності сумішей заповнювача вказує, що шамот із зернами окотаної форми забезпечує більш високі значення щільності, ніж заповнювач із кутастими зернами.

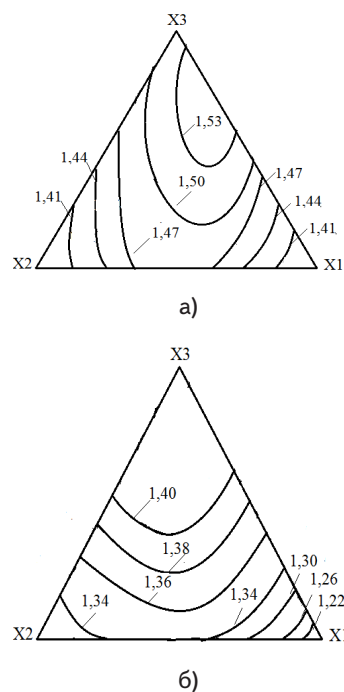


Рис. 2. Ізолнії насипної щільності заповнювача із зернами окотаної (а) та кутастої (б) форми

Аналіз ізолій концентраційних трикутників (рис. 2) показав, що незалежно від геометричної конфігурації зерен заповнювача, визначальний вплив на ступінь ущільнення здійснює шамот фр.<0,088 мм. Так, зменшення вмісту тонкодисперсного шамоту, при збільшенні вмісту зерен фракцій 6–3 мм або 3–0,088 мм супроводжується зниженням величини насипної щільності заповнювача із зернами кутастої та окотаної форми в межах 1,40 – 1,22 г/см³ і 1,53–1,41 г/см³ відповідно. Встановлено область оптимальних складів сумішей заповнювача, які забезпечують максимальне ущільнення при вібрації: фр. 6–3 мм – 18–23 %, фр. 3–0,088 мм – 37–45 %; фр. < 0,088 мм – 35 – 40 %.

Наступним етапом дослідження було визначення впливу зернового складу бетонних мас з використанням зерен заповнювача різної геометричної конфігурації на показники властивостей випалених зразків. Матриця планування експерименту та результати експерименту наведено в табл. 3.

За результатами математичної обробки експериментальних даних отримано рівняння регресії в системі "склад-властивість" (табл. 4) та побудовані їх графічні інтерпретації (рис. 3 – 5).

Аналіз отриманих графічних інтерпретацій в системі «склад-властивість» показав, що бетон, який містить заповнювач з зернами окотаної форми характеризується більш високими значеннями уявної щільності, границі міцності при стиску та низькою пористістю, ніж бетон на заповнювачі з кутастими зер-

нами. Це свідчить про більш щільну укладку зерен заповнювача окотаної форми в умовах вібраційного формування, що позитивно впливає на формування міцної структури бетону в процесі високотемпературного випалу. Встановлені області оптимальних зернових складів заповнювачів із різною конфігурацією зерен мають принципові відмінності щодо співвідношення фракцій шамоту (табл. 5).

Так, співвідношення вмісту фракцій 6 – 3:3 – 0,088 мм та 3 – 0,088 : < 0,088 мм

для заповнювача з окотаними та кутастими зернами знаходиться в межах 1,9 – 2,3 і 1,0 – 1,05 та 2,1–2,3 і 1,22–1,29 відповідно. Крім того, у разі заповнювача з кутастою формою зерен, краще ущільнення бетону забезпечується більш високим вмістом крупних і середніх фракцій шамоту.

Таблиця 3

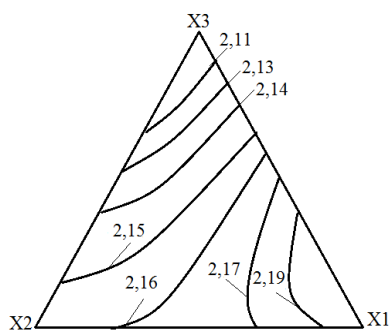
Матриця планування експерименту та показники властивостей бетону

Номер композиції	Фактори						Показники властивостей					
	Кодовані значення			Натуральні значення, %			Уявна щільність, г/см ³		Відкрита пористість, %		Границя міцності при стиску, Н/мм ²	
	X ₁	X ₂	X ₃	X ₁	X ₂	X ₃	Форма зерен		Форма зерен		Форма зерен	
							окотані	кутасті	окотані	кутасті	окотані	кутасті
1	1	0	0	18	42	40	2,2	1,96	21,38	23,65	27,8	17,3
2	0	1	0	23	37	40	2,16	1,92	23,58	25,13	23,4	15,1
3	0	0	1	20	45	35	2,09	2,14	24,00	21,21	20,7	21,8
4	1/2	1/2	0	20,5	39,5	40	2,17	2,04	21,74	22,07	29,3	20,0
5	1/2	0	1/2	19	43,5	37,5	2,19	2,09	20,42	21,84	27,4	19,7
6	0	1/2	1/2	21,5	41	37,5	2,12	2,00	23,80	22,52	22,1	16,4
7	1/3	1/3	1/3	22,9	41,3	38,8	2,18	2,12	24,40	21,43	25,5	16,8

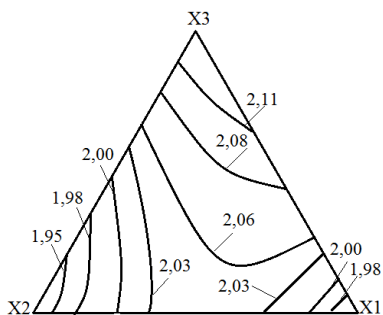
Таблиця 4

Поліноміальні моделі в системі "склад – властивість" шамотного бетону

Показники властивостей	Форма зерен заповнювача	Рівняння регресії
Уявна щільність, г/см ³	окотані	$\rho = 2,20X_1 + 2,16X_2 + 2,09X_3 - 0,04X_1X_2 + 0,18X_1X_3 - 0,02X_2X_3$
	кутасті	$\rho = 1,96X_1 + 1,92X_2 + 2,14X_3 + 0,40X_1X_2 + 0,16X_1X_3 - 0,12X_2X_3$
Відкрита пористість, %	окотані	$\Pi = 21,38X_1 + 23,58X_2 + 24,0X_3 - 2,96X_1X_2 - 9,08X_1X_3 + 0,04X_2X_3$
	кутасті	$\Pi = 23,65X_1 + 25,13X_2 + 21,21X_3 - 9,28X_1X_2 - 2,36X_1X_3 - 2,60X_2X_3$
Границя міцності при стиску, Н/мм ²	окотані	$\sigma = 27,80X_1 + 23,40X_2 + 20,70X_3 + 14,80X_1X_2 + 12,60X_1X_3 + 0,20X_2X_3$
	кутасті	$\sigma = 17,30X_1 + 15,10X_2 + 21,80X_3 + 15,20X_1X_2 + 0,60X_1X_3 - 8,20X_2X_3$

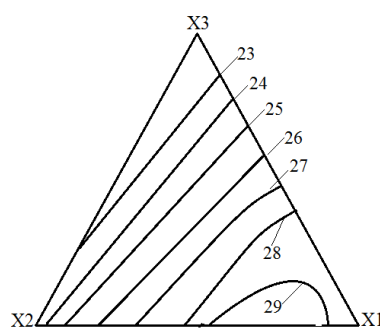


а)

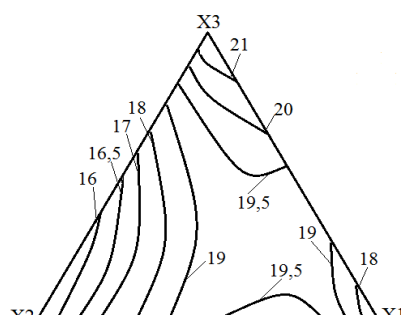


б)

Рис. 3. Ізолінії уявної щільності бетону: а) заповнювач із зернами окатаної форми; б) заповнювач із зернами кутастої форми

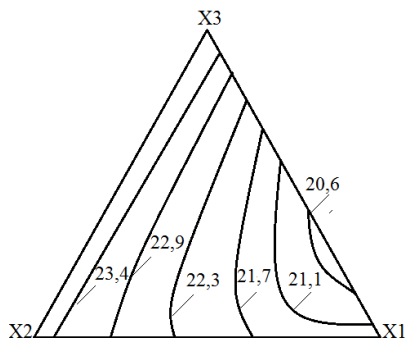


а)

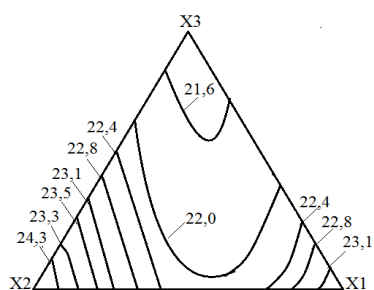


б)

Рис. 5. Ізолінії границі міцності при стиску бетону: а) заповнювач із зернами окатаної форми; б) заповнювач із зернами кутастої форми



а)



б)

Рис. 4. Ізолінії відкритої пористості бетону: а) заповнювач із зернами окатаної форми; б) заповнювач із зернами кутастої форми

Таблиця 5

Показники властивостей шамотного бетону оптимального зернового складу

Зерновий склад	Вміст, %	Уявна щільність, г/см ³	Відкрита пористість, %	Границя міцності при стиску, Н/мм ²
Зерниста складова:				
Шамот фр. 6 – 3 мм	<u>18–21</u> 20–21			
Шамот фр. 3 – 0,088 мм	<u>39–42</u> 44–45			
Дисперсна складова:		<u>2,19–2,20</u> 2,08–2,11	<u>21,2–20,6</u> 21,9–22,1	<u>27,6–28,6</u> 20,3–21,0
Шамот фр. < 0,088 мм, цемент (5%)	<u>39–40</u> 35–36			

* – чисельник – заповнювач із зернами окатаної форми; знаменник – заповнювач із зернами кутастої форми

4. Висновки

За результатами проведених досліджень виявлено суттєвий вплив геометричної конфігурації зерен заповнювача на ступінь ущільнення і показники властивостей низькоцементного шамотного бетону після випалу при 1300 °С. Встановлено доцільність використання в якості заповнювача низькоцементних бетонів шамоту, що отримано після випалу в обертовій печі, який характеризується окотаною формою зерен. Визначено оптимальний зерновий склад заповнювача з

зернами окотаної форми, який забезпечує ефективне поєднання взаємопов'язаних показників властивостей низькоцементного шамотного бетону.

Подальше удосконалення технології виготовлення низькоцементних шамотних бетонів з використанням заповнювача з зернами окотаної конфігурації, який не потребує додаткового подрібнення, в напрямку вибору ефективних дефлокулянтів та пластифікаторів дозволить зменшити витрати електроенергії на підготовку матеріалів і отримати вироби та монолітні футеровки з високими експлуатаційним ресурсом.

Література

1. Пивинский Ю.Е. Неформованные огнеупоры нового поколения [Текст] / Ю.Е. Пивинский, О.Г. Усъяров // Новые огнеупоры. – 2006. – №1. – С. 35 – 41.
2. Семченко Г.Д. Неформованные огнеупоры: учеб. Пособие [Текст] / Г.Д. Семченко. – Харьков: НТУ «ХПИ», 2007. – 304с.
3. Очагова И.Г. Огнеупоры и мировая черная металлургия [Текст] / И.Г. Очагова // Новые огнеупоры. – 2006. – №6. – С. 77 – 78.
4. Доррис В. Г. Низкоцементные огнеупорные бетоны: материал и опыт применения [Текст] / В.Г. Доррис, Л.М Аксельрод // Металлургическая и горнорудная промышленность. – 2001. – №1. – С. 67 – 72.
5. Аксельрод Л.М. Неформованные огнеупоры в футеровке вращающейся печи [Текст] / Л.М. Аксельрод, В.С. Комаров, В.Т. Хадыев // Цемент и его применение. – 2008. – № 6. – С. 72 – 74.
6. Пивинский Ю.Е. Неформованные огнеупоры [Текст] Т.1. Книга 1. Общие вопросы технологии: справоч. изд. / Ю.Е. Пивинский Ю.Е. – М.: Теплоэнергетик, 2004. – 448 с.
7. Пивинский Ю.Е. Огнеупорные бетоны нового поколения. Зерновой состав и объемные характеристики [Текст] / Ю.Е. Пивинский // Огнеупоры и техническая керамика. – 1992. – №11 – 12. – С. 22 – 27.
8. Анализ фракционного состава огнеупорных бетонов на шамотном заполнителе [Текст] / Н.К. Вернигора, С.М. Логвинков, Г.Н. Шабанова, А.Н. Корогодская // Сб. науч. тр. ОАО «УкрНИИО им. А.С. Бережного». – Харьков: Каравелла, 2006. – №106 – С. 71 – 77.
9. Вакуленко И.А. Влияние технологических параметров на свойства корундовых низкоцементных бетонов [Текст] / И.А. Вакуленко, В.В. Песчанская, Н.В. Шебанова и др // Вестник НТУ «ХПИ». – 2006. – № 30. – С. 63 – 67.
10. Шевцов Р.Н. Определение оптимального зернового состава низкоцементных огнеупорных бетонов с помощью планирования эксперимента [Текст] / Р.Н. Шевцов, Ю.А. Онасенко, Л.Д. Пилипчатин // Вопросы химии и химической технологии. – 2011 – №3. – С. 132 – 134.
11. Онасенко Ю.А. Моделивання зернового складу заповнювача низькоцементних алюмосилікатних бетонів [Текст] / Ю.А. Онасенко, Л.Д. Пилипчатін // Новости науки Приднепровья. – 2012. – № 1 – 2. – С. 11 – 44.
12. Felix Ballani. Modelling the microstructure of concrete with spherical grains. [Text] / Felix Ballani, Daryl J. Daley, Dietrich Stoyan // Computational materials science. – 2006. – №35. – P. 399 – 407.