

упорная промышленность России в фокусе общемировых тенденций [Текст] / Л.М. Аксельрод // Сб. докл. Междунар. конф. С элементами научной школы для молодежи «Керамика и огнеупоры: перспективные решения и нанотехнологии», Белгород, 9 – 12 нояб. 2010 г. – Белгород : И зд-во БГТУ, 2010. – С. 14 – 29. **5.** Скурихин, В. В. Традиционные и новые огнеупорные материалы для строительства и ремонта стекловаренных печей [Текст] / В. В. Скурихин, И. Н. Ермаков // Стекло и керамика. – 2004. – № 10. – С. 36–39. **6.** Семченко, Г. Д. Вогнетривкі виробі для футерування теплових технологічних агрегатів: навч. посіб. [Текст] / Г. Д. Семченко. – Харків: НТУ «ХПІ», 2009. – 176 С. **7.** Кащеев, И. Д. Химическая технология огнеупоров: учебное пособие [Текст] / И. Д. Кащеев, К. К. Стрелов, П. С. Мамыкин М.: – Интернет Инжиниринг, 2007. – 752 С. **8.** Копейкин, В. А. Материалы на основе металлофосфатов [Текст] / В. А. Копейкин, А. П. Перова, И. Л. Рашкован – М.: Химия, 1976. – 200 С. **9.** Хлыстов, А. И. Физико-химические основы определения составов жаростойких бетонов [Текст] / А. И. Хлыстов // Строительные материалы. – 1998. – № 8. – С. 8–9. **10.** Шаяхметов, У. Ш. Фосфатные композиционные материалы и опыт их применения [Текст] / У. Ш. Шаяхметов – Уфа: РИЦ «Старая Уфа», 2001. – 150 С. **11.** Попов, О. Н. Состояние и перспективы развития производства и рационального применения огнеупорных материалов в стекловаренных печах [Текст] / О. Н. Попов // Новые огнеупоры. 2002. № 1. С. 44–49. **12.** Семенов, Б. А. Методика и результаты оптимизации параметров системы обдува ограждений варочного бассейна стекловаренных печей [Текст] / Б. А. Семенов, Н. А. Озеров // Вестник СГТУ, 2011. № 4(59). Выпуск 1. **13.** Кононов, В. А. Производство огнеупорных материалов в России и перспективы его развития: в 2 ч. Ч. II. Анализ работы огнеупорных предприятий за 199–2001 гг. [Текст] / В. А. Кононов // Огнеупоры и техническая керамика. 2002. № 1. С. 40–47. **14.** Галдина, Н. М. Электроплавленные огнеупоры для стекловаренных печей [Текст] / Н. М. Галдина, Л. Л. Чернина М.: Стройиздат» 1975 - 181 С., ил.

*Поступила в редколлегию 20.01.2014*

УДК 666.768

**Безобжиговые муллитокорундовые огнеупоры на фосфатных связках/ Ю. В. Харыбина, Я. Н. Питак, О. Я. Питак** // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. – Х: НТУ «ХПІ», – 2014. – № 7 (1050). – С.141-146. – Бібліогр.:14 назв. ISSN 2079-5459

Розглянуто питання розробки безвипальних вогнетривів на фосфатних зв'язках для скловарних печей. Показані перспективи розширення розробки безвипальних мултікорундових вогнетривів для отримання конкурентоспроможних вогнетривких матеріалів. Узагальнення літературних даних дозволило встановити, що перспективною для отримання вогнетривких матеріалів з підвищеними експлуатаційними властивостями є композиції на основі системи  $\text{Al}_2\text{O}_3$  -  $\text{SiO}_2$  -  $\text{CaO}$  -  $\text{P}_2\text{O}_5$

**Ключові слова:** безвипальні вогнетриви, фосфатні зв'язки, скловарна піч

**Unburned mullite corundum refractories on the phosphate ligaments/ Y.V. Kharybina, Y.N. Pitak, O.Y. Pitak** // Bulletin of NTU “KhPI”. Series: New desicions of modern technologies. – Kharkov: NTU “KhPI”, 2014.-№ 7 (1050).- P.141-146. Bibliogr.:14. ISSN 2079-5459

Issue development unburned refractories on the phosphate ligaments for glass furnaces are considered. The prospects for expansion development unburned mullite corundum refractories for competitive refractory materials. Generalization of the literature dates that promising for refractory materials with improved performance characteristics based on composition system  $\text{Al}_2\text{O}_3$  –  $\text{SiO}_2$  –  $\text{CaO}$  –  $\text{P}_2\text{O}_5$  are revealed.

**Key words:** unburned refractories, phosphate ligaments, glass furnaces

УДК 661.152.4

**Р. О. ОСТРОГА**, аспірант, Сумський державний університет

## **КІНЕТИКА КАПСУЛЮВАННЯ ГРАНУЛЬОВАНИХ МІНЕРАЛЬНИХ ДОБРИВ ОРГАНІЧНОЮ ОБОЛОНКОЮ**

Розроблена математична модель процесу капсулювання мінеральних гранул органічною оболонкою в апараті псевдозрідженого шару. Отримані залежності для визначення товщини органічної оболонки та швидкості росту гранул. Запропоновано рівняння для визначення розміру отриманих в апараті

© Р. О. ОСТРОГА, 2014

гранул, що враховує швидкість росту гранул та зміну щільності розподілу гранул за розмірами в процесі плівкоутворення. Приведено порівняльний аналіз теоретичних результатів розрахунку з експериментальними даними.

**Ключові слова:** капсулювання, апарат псевдозрідженого шару, органічна оболонка, кінетика росту.

**Вступ.** Капсулювання гранульованих мінеральних добрив здійснюється для зниження непродуктивних втрат елементів живлення під час їх перебування у ґрунті. Нанесена на поверхню частинок органічна оболонка створює додатковий опір масоперенесенню в процесі розчинення добрив. Отримане таким чином добриво має пролонговану дію і більш продуктивно живить рослину протягом тривалого часу, а завдяки органічному походженню матеріалу оболонки – не забруднює ґрунт [1, 2].

Капсулювання дисперсних матеріалів у стані псевдозрідження (рис. 1) є поширеним фізичним методом нанесення оболонок. Механізм росту гранул неоднозначний і істотно залежить від специфіки суспензії та режиму процесу капсулювання, що визначають характер взаємодії диспергованої суспензії з дисперсною твердою фазою. Специфіка киплячого шару при капсулюванні складається з багаторазового змінення температури на поверхні гранул. Найбільш вагомим фактором, що впливає на кінетику росту гранул, є характер взаємодії між краплями суспензії та мінеральними гранулами. Температура під газорозподільною решіткою регулюється в межах 100-200°C, при цьому температура в шарі гранул змінюється від 50 до 100°C. Зниження температури в шарі є наслідком введення вологої суспензії, яка випаровується і тим самим відбирає тепло.

В залежності від різниці температур між прирешіточною зоною та зоною введення суспензії можна виділити чотири характерні режими, за якими відбувається капсулювання гранул (рис. 2) [3]. Функціональне призначення покриття є визначальним у виборі матеріалу плівкоутворювача із певними фізико-хімічними характеристиками. Тому основним показником якісного покриття у випадку капсулювання гранульованих мінеральних добрив є рівномірне розподілення по всій поверхні гранули оболонки визначеної товщини, яка сприяє повному залученню мінеральних ядер в шар органічної речовини. Таким чином, робочим є оболонковий режим, що дозволяє доростити всі гранули до товарного розміру (рис. 3).

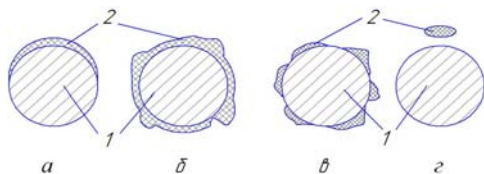


Рис. 1 – Схема та потоки апарату псевдозрідженого шару: 1 - корпус апарата; 2 - газорозподільна решітка; 3 - пневмофорсунка; 4 - патрубок для відводу запиленого газу; 5 - патрубок для виведення покритих гранул; I - зона сушіння; II - зона зрошення; III - зона сепарації

Рис. 2 – Режими приросту гранул: а – одиничний; б – оболонковий; в – нерівномірний з тріщинами; г – з утворенням нових центрів грануляції; 1 – мінеральна гранула; 2 – суха органічна речовина



Рис. 3 – Загальний вигляд органо-мінеральних гранул пролонгованої дії

**Постановка завдання.** Розробку та впровадження апаратів з киплячим шаром на багатьох виробництвах стримує відсутність надійних методів їх розрахунку. Одна з основних причин – недостатня вивченість складних і різноманітних процесів. Адже описувані математичні моделі дозволяють встановлювати межі такого саморегулювання процесів і мінімум заходів по застосуванню додаткового автоматичного регулювання. Тому останнім часом велика увага приділяється побудові та застосуванню принципових математичних моделей [4].

При побудові математичних моделей слід враховувати, що в реальному апараті киплячого шару одночасно знаходиться величезна кількість частинок. Ці частинки мають різні розміри і рухаються з різними швидкостями у будь-яких напрямках. В процесі періодичних переміщень плівка органічного розчину потрапляє на гранулу, висихає і залишає на цій поверхні зневоднений залишок. Нарощування значного шару осаду відбувається протягом багатьох таких циклів. Ці обставини дозволяють розглядати апарат киплячого шару як систему із зосередженими параметрами, тобто вважати, що всі частинки знаходяться в однакових умовах і вводити усереднені характеристики швидкості росту гранул [5].

Таким чином, виробництву добрив нового покоління передуює перш за все розробка математичної моделі процесу капсулювання гранульованих мінеральних добрив органічною оболонкою в апараті киплячого шару.

**Базова теоретична частина.** Розробка математичної моделі ґрунтується на гіпотезі рівномірно-поверхневого зростання гранул, згідно з якою матеріал відкладається на гранулах у вигляді кілець постійної товщини. Також приймається допущення, що всі частинки в шарі однакового розміру і мають правильну (сферичну) форму (рис. 4).

Збільшення маси шару органічної оболонки на поверхні сферичної частинки можна виразити наступним диференціальним рівнянням:

$$dM = G_0 d\tau, \quad (1)$$

де  $dM$  – приріст органічної маси, кг;

$G_0$  – витрата матеріалу оболонки, кг/с;

$d\tau$  – проміжок часу проведення процесу, с.

Загальна маса органічної плівки в шарі:

$$M = \rho_c \cdot n \cdot 4\pi R^2 \cdot (R - R_0), \quad (2)$$

де  $n$  – кількість частинок в шарі;

$\rho_c$  – густина органічної суспензії, кг/м<sup>3</sup>;

$4\pi R^2$  – площа поверхні частки, м<sup>2</sup>.

Для визначення зміни маси плівки на поверхні частинок продиференціюємо рівняння (2):

$$dM = \rho_c \cdot n \cdot 4\pi R^2 dR. \quad (3)$$

Розв'язуючи систему рівнянь (1) і (3), отримуємо залежність, яка дає змогу спрогнозувати значення товщини органічної оболонки в будь-який момент часу:

$$\delta = R_0 \cdot \left( \sqrt[3]{g_0 \cdot \frac{\rho_{GP}}{\rho_c} \cdot \tau + 1} - 1 \right). \quad (4)$$

де  $\rho_{GP}$  – щільність матеріалу гранул затравки, кг/м<sup>3</sup>;

$g_0$  – питома витрата матеріалу оболонки (віднесена до маси затравки) с<sup>-1</sup>.

Розглянемо весь об'єм киплячого шару як сукупність елементарних об'ємів (комірок). Із усієї сукупності гранул в сусідню комірку перейдуть частинки, розмір яких більший деякого критичного. Частинки розміром меншим критичного значення будуть продовжувати укрупнюватися в шарі або перейдуть у вище розташовані комірки за рахунок винесення їх газовим потоком. В такому випадку функція розподілу (щільність розподілу) гранул за розмірами виразиться:

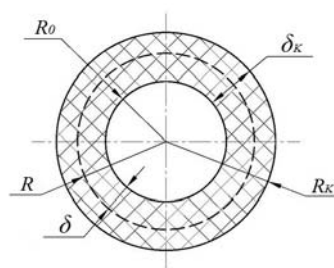


Рис. 4 – Розрахункова схема частинки покритої органічною плівкою:  $R_0$ ,  $R$ ,  $R_K$  – початковий, поточний і кінцевий радіуси часток відповідно;  $\delta$ ,  $\delta_K$  – поточна і кінцева товщини плівки

$$\frac{\partial f(R, \tau)}{\partial \tau} = \text{div}(u_r f(R, \tau)) + \frac{\partial(vf(R, \tau))}{\partial R} - \frac{\partial f(R, \tau)}{\partial G_y} \cdot \frac{dG_y}{d\tau}. \quad (5)$$

Згідно з рівнянням (5), функція зміни щільності розподілу гранул у будь-якій локальній області шару визначається переміщенням гранул з однієї точки робочого об'єму апарата в інший. Це відбувається за рахунок:

- 1) вимушеного руху потоку частинок (перший доданок враховує конвективний перенос гранул);
- 2) збільшення діаметра гранул (другий доданок враховує швидкість лінійного росту гранул);
- 3) винесення з шару дрібних частинок (третій доданок).

Нехтуємо зміною гранульованого складу за рахунок конвективного переносу, подрібнення та стирання. Також вважаємо, що швидкість росту гранул постійна ( $v = \text{const}$ ). У такому випадку рівняння (5) перетворюється:

$$\frac{\partial f(R, \tau)}{\partial \tau} = \frac{v \partial(f(R, \tau))}{\partial R}, \quad (6)$$

Перетворенням Лапласа вирішуємо рівняння (6):

$$R = R_0 + v \cdot [\ln f_K(R, \tau) - \ln f_H(R, \tau)]. \quad (7)$$

Рівняння (7) описує функцію збільшення розміру часток залежно від швидкості росту гранул і зміни щільності розподілу гранул за розмірами в киплячому шарі протягом часу  $\tau$ .

**Результати та обговорення.** Результати математичного моделювання кінетики нарощування органічної оболонки порівнювались із експериментальними дослідженнями процесу в апараті псевдозрідженого шару з форсунковим розпилюванням. В якості ядра використовувалося гранульоване мінеральне добриво – карбамід, яке в процесі досліджень покривалося суспензією пташиного посліду (рис. 3). Процес капсулювання має раціональні режимно-технологічні параметри (табл. 1).

Таблиця 1 – Режимно-технологічні параметри процесу капсулювання в апараті псевдозрідженого шару

| Параметр                                                    | Значення |     |
|-------------------------------------------------------------|----------|-----|
| Витрата суспензії (курячий послід), <i>мл/хв.</i>           | 10       | 20  |
| Маса гранул затравки в апараті, <i>кг</i>                   | 0,5      |     |
| Швидкість повітря, <i>м/с</i>                               | 4,8      |     |
| Гідравлічний опір, <i>Па</i>                                | 580      | 610 |
| Температура повітря в шарі дисперсного матеріалу, <i>°C</i> | 65       |     |
| Час проведення процесу, <i>хв.</i>                          | 50       |     |
| Доля органічної оболонки, <i>% мас.</i>                     | 0,35     | 0,5 |

Результати теоретичних розрахунків за формулою (4) і експериментальних досліджень кінетики нарощування органічної оболонки приведені на рис. 5 та 6.

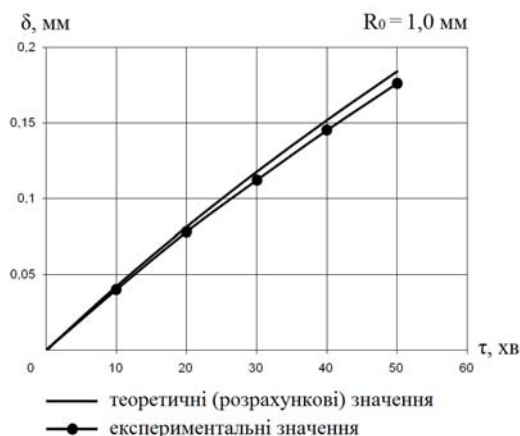


Рис. 5 – Порівняння теоретичних та експериментальних значень кінетики нарощування органічної оболонки при питомій витраті суспензії  $g_0 = 1,86 \cdot 10^{-4} \text{ с}^{-1}$

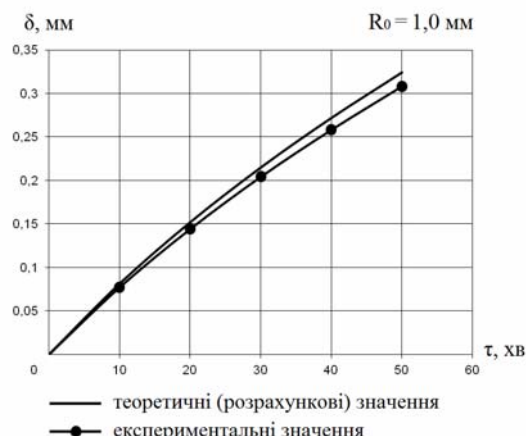


Рис. 6 – Порівняння теоретичних та експериментальних значень кінетики нарощування органічної оболонки при питомій витраті суспензії  $g_0 = 3,72 \cdot 10^{-4} \text{ с}^{-1}$

Як це видно з рис. 5 та 6, дослідні значення задовільно співпадають з теоретичними (розбіжність складає 5÷8 %). Така розбіжність пояснюється тим, що математична модель прораховує ідеальний випадок, коли вся волога, що вноситься з суспензією, випаровується. До того ж, у реальному апараті киплячого шару деякі краплі органічної суспензії разом з повітрям виносяться з робочої зони апарату.

Врівноважити теоретичні значення з експериментальними можна за рахунок коефіцієнта пропорційності, який у випадку капсулювання курячим послідом дорівнює 0,95. Відтак рівняння (4) буде мати наступний вигляд:

$$\delta = 0,95 \cdot R_0 \cdot \left( \sqrt[3]{g_0 \cdot \frac{\rho_{\text{ГР}}}{\rho_{\text{С}}} \cdot \tau + 1} - 1 \right). \quad (8)$$

Продиференціюємо рівняння (8):

$$\frac{d\delta}{d\tau} = \frac{d}{d\tau} \left[ 0,95 \cdot R_0 \cdot \left( \sqrt[3]{g_0 \cdot \frac{\rho_{\text{ГР}}}{\rho_{\text{С}}} \cdot \tau + 1} - 1 \right) \right]. \quad (9)$$

Як результат отримуємо рівняння для визначення швидкості росту часток в псевдо-зрідженому шарі:

$$v = \frac{d\delta}{d\tau} = \frac{0,95 \cdot R_0 \cdot g_0 \cdot \rho_{\text{ГР}}}{3 \cdot \rho_{\text{С}} \cdot \sqrt[3]{\left( g_0 \cdot \frac{\rho_{\text{ГР}}}{\rho_{\text{С}}} \cdot \tau + 1 \right)^2}}. \quad (10)$$

Кінетика росту гранул в псевдо-зрідженому шарі залежить від початкового розміру гранул, питомої витрати та густини суспензії, щільності матеріалу гранул затравки, які враховує формула (10). Результати теоретичних розрахунків за формулою (10) приведені на рис. 7.

Із рис. 7 видно, що оптимальний час нанесення органічної оболонки має обмежуватись 30-40 хвилинами.

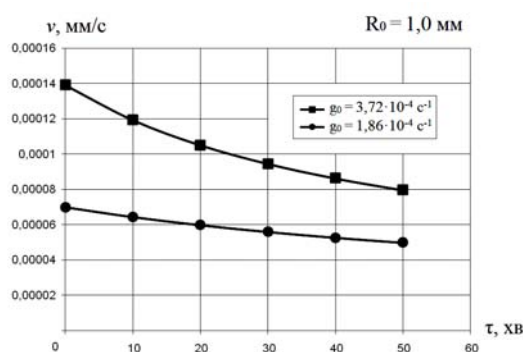


Рис. 7 – Зміна швидкості росту часток в псевдо-зрідженому шарі протягом процесу капсулювання

Більший час капсулювання при незмінній витраті суспензії призводить до значно вищих енергетичних затрат на одиницю готових гранул. Причому, із збільшенням питомої витрати суспензії зменшується оптимальний час проведення процесу.

Таким чином, розроблена математична модель може бути використана для теоретичного розрахунку процесу капсулювання гранул.

### Висновки

1. Розроблена математична модель процесу капсулювання мінеральних гранул органічною оболонкою в апараті псевдозрідженого шару.
2. Отримані теоретичні залежності для визначення товщини органічної оболонки та швидкості росту гранул.
3. Приведено порівняльний аналіз теоретичних результатів розрахунку з експериментальними даними.
4. Визначено оптимальний час нанесення органічної оболонки.
5. Отримані результати можуть бути використані для розрахунку апаратів капсулювання гранул органічною речовиною.

**Список літератури:** 1. *Нагурський О. А.* Капсульовані мінеральні добрива. Кінетика вивільнення компонентів із полідисперсних сумішей [Текст] / *О. А. Нагурський* // Хімічна промисловість України. – 2012. – №3 (110). – С. 69–73. 2. *Острога Р. О.* Гранульовані органо-мінеральні добрива пролонгованої дії [Текст] / *Р. О. Острога, С. І. Якушко, Є. С. Снівак* // Хімічна промисловість України. – 2012. – №3 (110). – С. 73–76. 3. *Острога Р. О.* Режимні параметри процесу капсулювання мінеральних добрив органічною оболонкою [Текст] / *Р. О. Острога, М. П. Юхименко* // Вісник Сумського державного університету. Серія Технічні науки. – 2013. – №1. – С. 56–60. 4. *Davidson J. F.* Fluidization [Текст] / *J.F. Davidson, D. Harrison*. – London: Department of Chemical Engineering University of Cambridge, 1971. – 728 p. 5. Обезвоживание растворов в кипящем слое [Текст] / *О.М. Тодес, Ю.Я. Каганович, С.П. Налимов [и др.]*. – М.: Металлургия, 1973. – 288 с.

Надійшла до редколегії 11.01.2014

УДК 661.152.4

**Кінетика капсулювання гранульованих мінеральних добрив органічною оболонкою/ Острога Р. О.** // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. – Х: НТУ «ХПІ», – 2014. – № 7 (1050). – С.146-151. – Бібліогр.: 5 назв. ISSN 2079-5459

Разработана математическая модель процесса капсулирования минеральных гранул органической оболочкой в аппарате псевдооживленного слоя. Получены зависимости для определения толщины органической оболочки и скорости роста гранул. Предложено уравнение для определения размера полученных в аппарате гранул, учитывающее скорость роста гранул и изменение плотности распределения гранул по размерам в процессе пленкообразования. Приведен сравнительный анализ теоретических результатов расчета с экспериментальными данными.

**Ключевые слова:** капсулирование, аппарат псевдооживленного слоя, органическая оболочка, кинетика роста.

**Kinetics of granulated mineral fertilizers capsulation with organic cover/ R. O. Ostroha** //Bulletin of NTU “KhPI”. Series: New desicions of modern technologies. – Kharkov: NTU “KhPI”, 2014.- № 7 (1050).- P.146-151. Bibliogr.:5. ISSN 2079-5459

Mathematical model of mineral granules capsulation process with organic cover in the device of fluidized bed was developed. The ratios were received for thickness test of organic layer and growth rate of granules. Equation of size determination of received granules in the device is proposed including granules growth rate and changes of density of granules distribution according to sizes in film forming process. A comparative analysis of theoretical measuring results with experimental data was introduced.

**Keywords:** capsulation, device of fluidized bed, organic cover, kinetics of growth.