

# Переробка сир'я и ресурсосбереження

УДК 666.9.04:66.011

DOI: <https://doi.org/10.33070/etars.1.2019.04>

**Колесник В.В.<sup>1</sup>**, канд. техн. наук, **Орлик В.М.<sup>2</sup>**, канд. техн. наук,  
**Хвастухін Ю.І.<sup>2</sup>**, докт. техн. наук, проф.,  
**Костоґриз К.П.<sup>2</sup>**, канд. техн. наук, **Жайворонок В.А.<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> Державний університет інфраструктури та технологій, Київ  
вул. Кирилівська, 9, 04071 Київ, Україна, e-mail: [kolesnyk@email.ua](mailto:kolesnyk@email.ua)

<sup>2</sup> Інститут газу НАН України, Київ  
вул. Дегтярівська, 39, 03113 Київ, Україна, e-mail: [orlykvol@gmail.com](mailto:orlykvol@gmail.com).

## Кальцинація дрібнодисперсного вапняку в псевдозрідженому шарі інертного зернистого матеріалу. 2. Результати обчислювальних експериментів

Наведено результати числових експериментів стосовно процесу кальцинації дрібнодисперсних частинок вапняку при контакті з газовою фазою псевдозрідженого шару інертного зернистого матеріалу для отримання високореакційного сорбенту. Представлено характер зміни основних якісних показників отриманого сорбенту: пористості, питомої поверхні, маси – у залежності від часу перебування вихідних вапняків діаметром 80–200 мкм з початковою порожністю  $\varepsilon_0 = 0,03\text{--}0,1$  та діаметром пор  $d_{\text{por}} = 3,84\text{--}17$  нм у високореакційній зоні при зміні температури газової фази псевдозрідженого шару в межах 900–1200 °С. Отримані результати дають можливість у подальшому на етапі проектування визначити оптимальне апаратурно-технологічне оформлення процесу кальцинації у залежності від вихідних параметрів вапняку, що забезпечуватиме бажану якість вапнякового сорбенту відповідно заданої потужності установки. *Бібл. 1, рис. 10.*

**Ключові слова:** вапняк, оксид кальцію, питома поверхня, пористість, псевдозріджений шар.

Основним показником якості сорбенту є його адсорбційна ємність, яка визначається порожністю, розміром пор та питомою внутрішньою поверхнею. Усі ці характеристики сорбенту є кінцевими параметрами процесу кальцинації вихідного вапняку, які визначаються умовами перебігу процесу: температурою та часом перебування в реакційному об'ємі, а також залежать від дисперсного складу вихідного вапняку, початкової порожності, розміру пор то-

що. Переважний вплив на час кальцинації частинок вапняку, маса яких змінюється у процесі обробки, має гідродинаміка псевдозрідженого шару (ПШ).

Таким чином, досягнення необхідних якісних характеристик сорбенту при обробці його у ПШ залежить від багатьох взаємопов'язаних параметрів, пошук оптимального співвідношення яких експериментальним шляхом є проблематичним. На основі побудованого матема-

тичного опису [1] було створено математичне забезпечення для проведення числових експериментів з варіюванням технологічних параметрів у можливому на практиці діапазоні їх змін, результатом яких є досить повна картина перебігу процесу активації вапняку в ПШ.

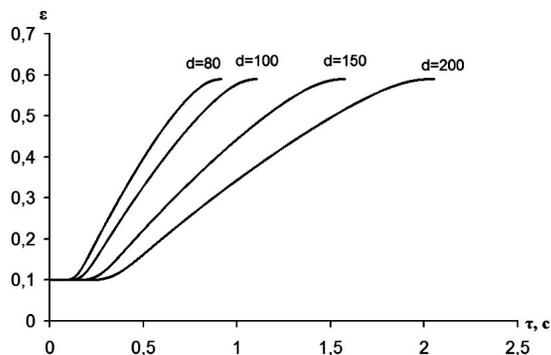


Рис.1. Зміна в часі загальної порожності частинок різного діаметра  $d$  з вихідним діаметром пор 17 нм та початковою порожністю 0,1 при температурі газової фази ПШ  $t = 1000$  °С.

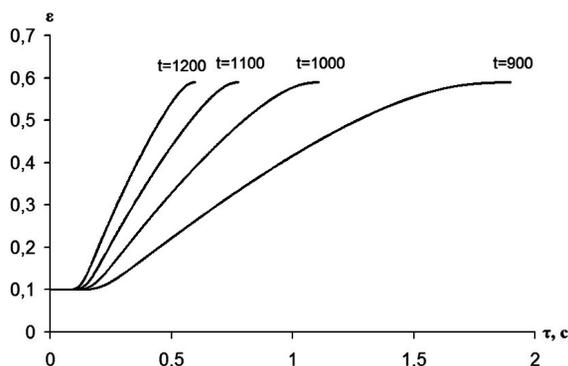


Рис.2. Зміна в часі загальної порожності частинки діаметром  $d = 100$  мкм з вихідним діаметром пор 17 нм та початковою порожністю 0,1 для різних значень температури газової фази ПШ.

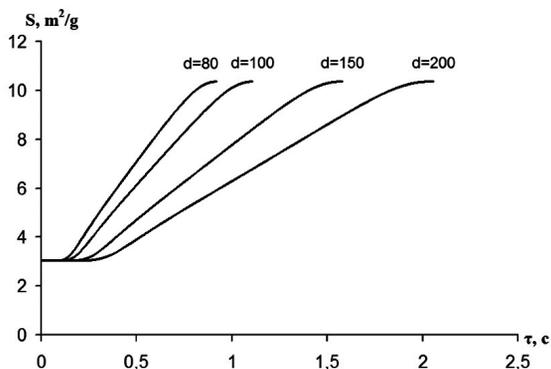


Рис.3. Зміна в часі загальної питомої поверхні частинок різного діаметра  $d$  з вихідним діаметром пор 17 нм та початковою порожністю 0,1 при температурі газової фази ПШ  $t = 1000$  °С.

На рис.1–6 представлена динаміка зміни в часі загальної порожності, питомої поверхні та маси частинок вихідного вапняку діаметром 80–200 мкм, діаметр пор якого 17 нм та порожність 0,1, при зміні температури газової фази ПШ у діапазоні 900–1200 °С.

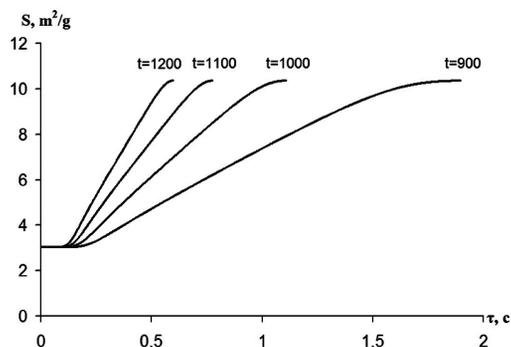


Рис.4. Зміна в часі загальної питомої поверхні частинки діаметром  $d = 100$  мкм з вихідним діаметром пор 17 нм та початковою порожністю 0,1 для різних значень температури газової фази ПШ.

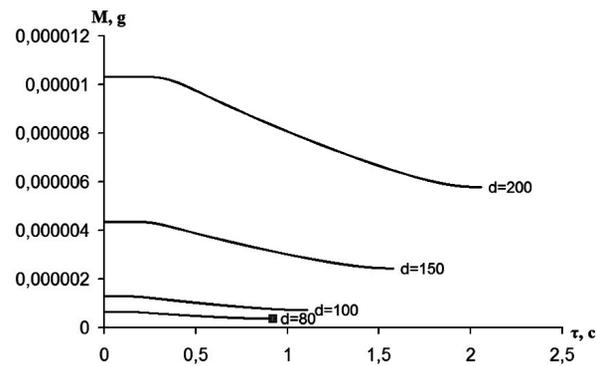


Рис.5. Зміна в часі маси частинок різного діаметра  $d$  з вихідним діаметром пор 17 нм та початковою порожністю 0,1 при температурі газової фази ПШ  $t = 1000$  °С.

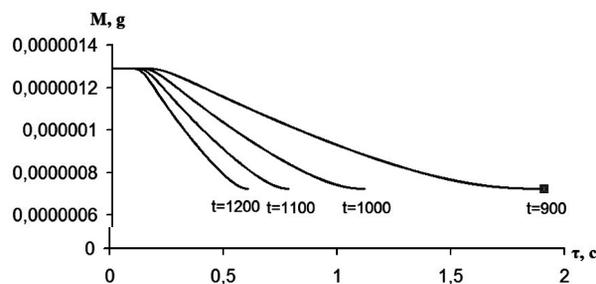


Рис.6. Зміна в часі маси частинки діаметром  $d = 100$  мкм з вихідним діаметром пор 17 нм та початковою порожністю 0,1 для різних значень температури газової фази ПШ.

Отримані в результаті числових експериментів динамічні характеристики основних показників якості цільового продукту, представлені на рис.1–6, відображають теоретично можливі питому поверхню та порозність при забезпеченні відповідної температури, часу перебування та характеристик вихідної сировини. Час перебування повністю визначається швидкістю псевдозріджуючого агента, нижня та верхня границі якого обмежені розмірами та масою сировинного вапняку, яка змінюється в процесі кальцинації. Очевидно, що організація процесу кальцинації при згаданій взаємозалежності параметрів та обмеженнях на технологічні параметри без детального дослідження процесу на основі числових експериментів потребувала б значних матеріальних та часових витрат без впевненості у оптимальності кінцевого результату. Для частинки з вихідним діаметром пор 17 нм та початковою порозністю 0,1 на рис.7, 8 зображена залежність необхідного часу досягнення ступеня кальцинації  $x = 1$  від діаметра частинок при температурі газової фази

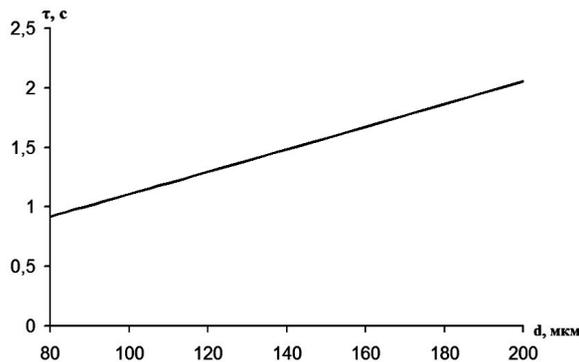


Рис.7. Залежність необхідного часу кальцинації для досягнення ступеня кальцинації  $x = 1$  від діаметра частинок з вихідним діаметром пор 17 нм та початковою порозністю 0,1 при температурі газової фази ПШ  $t = 1000$  °C.

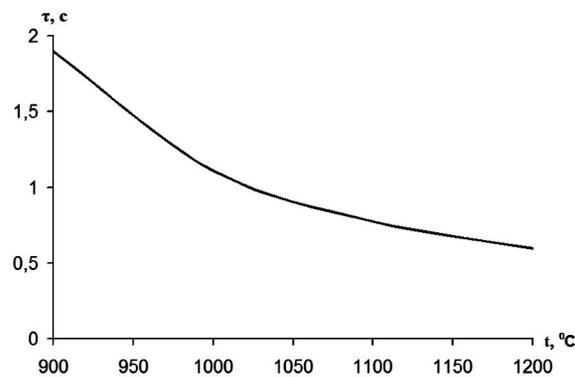


Рис.8. Залежність необхідного часу кальцинації частинки  $d$  з вихідним діаметром пор 17 нм та початковою порозністю 0,1 для досягнення  $x = 1$  від температури кальцинації.

ПШ  $t = 1000$  °C, та, відповідно, для частинки діаметром  $d = 100$  мкм при зміні температури газової фази.

Отриманні залежності дозволяють в подальшому на етапі проектування установки киплячого шару визначити режимні характеристики процесу випалювання, при яких дрібно-дисперсні частинки виносяться із шару інертного матеріалу з максимальним ступенем перетворення та максимальними якісними показниками питомої пористості та питомої поверхні.

Як видно з рис.1–4 та 8, основні параметри вапнякового сорбенту: порозність, його питома поверхня та час досягнення максимального ступеня кальцинації — суттєво залежать від температури газової фази. Ця обставина накладає обмеження на загальний час перебування частинок у ПШ. Треба враховувати, що надмірне перебування частинки вапняку в зоні високих температур у подальшому може призводити до спікання контактної поверхні з відповідним зменшенням питомої поверхні навіть при збереженні загаль-

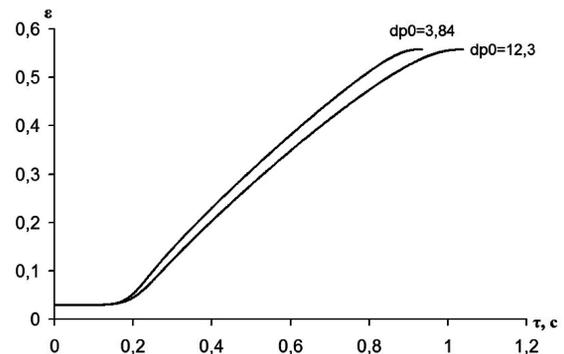


Рис.9. Зміна у часі загальної порозності частинок діаметром  $d = 100$  мкм з початковою порозністю 0,03 від вихідного діаметра пор при температурі газової фази ПШ  $t = 1000$  °C.

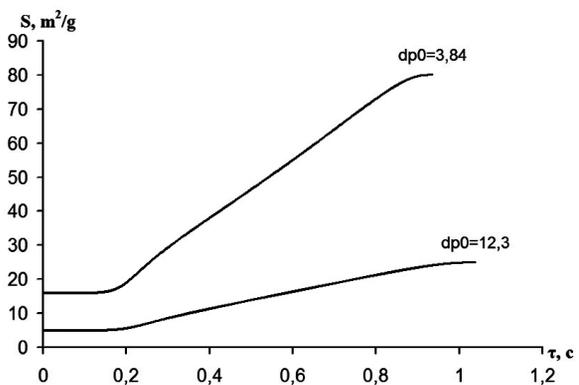


Рис.10. Зміна загальної питомої поверхні сорбенту діаметром  $d = 100$  мкм з початковою порозністю 0,03 від вихідного діаметра пор при температурі газової фази ПШ  $t = 1000$  °C.

ної порожності та, як наслідок, до втрати реакційної здатності сорбенту. З іншого боку, недостатній час перебування дрібнодисперсної частинки в реакційній зоні призводить до недостатнього перетворення вапняку, винесення необробленого матеріалу, зниження якості кінцевого продукту.

З метою дослідження впливу внутрішніх початкових характеристик вапняку на параметри отриманого сорбенту були проведені розрахунки для щільного вапняку з початковою порожністю 0,03 та різними значеннями вихідного діаметра пор (початковою питомою поверхнею), результати яких відображені на рис.9, 10.

З рис.9 видно, що при значній різниці діаметрів початкових пор двох зразків вапняку одного розміру ( $d = 100$  мкм) та однакової початковій порозності ( $\epsilon = 0,03$ ) кінцева порозність зразків сорбенту близька. Згідно розрахунків, представлених на рис.10 для тих самих зразків вихідного вапняку, за питомою поверхнею кінцеві продукти значно відрізняються.

### Висновки

Отримані результати докладного числового моделювання процесу кальцинації на основі за-

пропонованого математичного опису та розробленого математичного забезпечення дають можливість на етапі проектування установок кальцинування вапняку заданої потужності визначити оптимальне апаратурно-технологічне оформлення процесу кальцинації у залежності від вихідних параметрів сировинного вапняку, що забезпечуватиме бажану якість отриманого вапнякового сорбенту.

Переваги такого підходу особливо суттєві при реалізації процесу кальцинації вапняку у псевдозрідженому шарі, коли має місце жорстка залежність часу перебування частинок вапняку в реакційній зоні, маса яких безперервно змінюється, від конструктивних та аеродинамічних параметрів псевдозрідженого шару, які взаємозалежні та мають суттєві обмеження.

### Список літератури

1. Колесник В.В., Орлик В.М., Хвастухін Ю.І., Костогряз К.П., Жайворонок В.А. Кальцинація дрібнодисперсного вапняку в псевдозрідженому шарі інертного зернистого матеріалу. 1. Математичний опис процесу кальцинації частинки вапняку. *Энерготехнологии и ресурсосбережение. 2017. № 2. С. 49–58.*

Надійшла до редакції 02.01.19

**Колесник В.В.<sup>1</sup>**, канд. техн. наук, **Орлик В.М.<sup>2</sup>**, канд. техн. наук,  
**Хвастухин Ю.И.<sup>2</sup>**, докт. техн. наук, проф.,  
**Костогряз К.П.<sup>2</sup>**, канд. техн. наук, **Жайворонок В.А.<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> *Государственный университет инфраструктуры и технологий, Киев*  
*ул. Кирилловская, 9, 04071 Киев, Украина, e-mail: kolesnyk@email.ua*

<sup>2</sup> *Институт газа НАН Украины, Киев*  
*ул. Дегтяревская, 39, 03113 Киев, Украина, e-mail: orlykvol@gmail.com*

## Кальцинация мелкодисперсного известняка в псевдооживленном слое инертного зернистого материала. 2. Результаты вычислительных экспериментов

Приведены результаты численных экспериментов относительно процесса кальцинации мелкодисперсных частиц известняка при контакте с газовой фазой псевдооживленного слоя инертного зернистого материала для получения высокорекреакционного сорбента. Представлены характер изменения основных качественных показателей полученного сорбента: пористости, удельной поверхности, массы — в зависимости от времени пребывания выходных известняков диаметром 80–200 мкм с начальной порозностью  $\epsilon_0 = 0,03–0,1$  и диаметром пор  $d_{\text{пор}} = 3,84–17$  нм в высокорекреакционной зоне при изменении температуры газовой фазы псевдооживленного слоя в пределах 900–1200 °С. Полученные результаты позволяют в дальнейшем на этапе проектирования определить оптимальное апаратурно-технологическое оформление процесса кальцинации в зависимости от исходных параметров известняка, обеспечивающее желаемое качество известнякового сорбента соответственно заданной мощности установки. *Библ. 1, рис. 10.*

**Ключевые слова:** известняк, оксид кальция, удельная поверхность, пористость, псевдооживленный слой.

**Kolesnyk V.V.**<sup>1</sup>, Candidate of Technical Sciences,  
**Orlyk V.M.**<sup>2</sup>, Candidate of Technical Sciences,  
**Khvastukhin Yu.I.**<sup>2</sup>, Doctor of Technical Sciences, Profesor,  
**Kostohryz K.P.**<sup>2</sup>, Candidate of Technical Sciences, **Zhaivoronok V.A.**<sup>2</sup>

<sup>1</sup> State University of Infrastructure and Technology, Kyiv

9, Kyrlyvska Str., 04071 Kyiv, Ukraine, e-mail: kolesnyk@email.ua

<sup>2</sup> The Gas Institute of National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv

39, Degtyarivska Str., 03113 Kyiv, Ukraine, e-mail: orlykvool@gmail.com

## Calcination of Finely Dispersed Limestone in a Fluidized Bed of Inert Material. 2. Numerical Simulation Results

The results of numerical experiments concerning the process of calcination of small grained limestone particles in contact with the gas phase of a fluidized bed of inert grainy material for obtaining a high-performance sorbent are given. The character of the change of the basic qualitative parameters of the obtained sorbent – droopiness, surface area, mass is presented depending on the time of residence of the initial limestones with a diameter of 80–200 nm with initial porosity  $\varepsilon_0 = 0,03\text{--}0,1$  and pore diameter  $d_{\text{por}} = 3,84\text{--}17$  nm in the high-reaction zone when the temperature of the gas phase of the fluidized bed is changed within 900–1200 °C. The obtained results allow further in the design stage to determine the optimum hardware and process design of the process of calcination, depending on the initial parameters of the limestone, which will provide the desired quality of the limestone sorbent in accordance with the given power installation. *Bibl. 1, Fig. 10.*

**Key words:** limestone, calcium oxide, surface area, porosity, fluidized bed.

### References

1. Kolesnyk V.V., Orlyk V.M., Khvastukhin Yu.I., Kostohryz K.P., Zhaivoronok V.A. Kalcinacija dribnodispersnogo vapnjaku v psevdorzidzhenomu shari inertnogo zernistogo materialu. 1. Matematichnij opis procesu kal'cinacii chastinki vapnjaku [Kalcinacija dribnodispersnogo vapnjaku v psevdor-

zridzhenomu shari inertnogo zernistogo materialu. 1. Matematichnij opis procesu kal'cinacii chastinki vapnjaku] *Energotehnologii i resursoberezhennje [Energy Technologies and Resource Saving]*. 2017. No. 2. pp. 49–58. (Ukr.)

Received January 2, 2019