

УДК 66.04

**Крот О.П.**

Харківський національний університет будівництва та архітектури

**Вінниченко В.І.**

Харківський національний університет будівництва та архітектури

## МОДЕЛЮВАННЯ ТА ВИБІР РАЦІОНАЛЬНОЇ КОНСТРУКЦІЇ УСТАНОВКИ ТЕРМІЧНОЇ ОБРОБКИ ФОСФОГІПСУ

*У статті моделюються процеси термічної обробки техногенного відходу – фосфогіпсу – у звислому стані в шахті-дегідраторі, використання якої значно інтенсифікує процеси тепло- і масообміну завдяки збільшенню поверхні контакту. Поставлена задача з вибору раціональної конструкції установки. Розрахована теоретична швидкість руху частинок фосфогіпсу в дегідраторі, витрата палива та кількість повітря для спалювання. Вибрана необхідна форма та розміри ділянок установки для досягнення раціональних швидкостей. Виконане комп'ютерне моделювання установки для термічної обробки фосфогіпсу у зваженому стані дозволило визначити недоліки конструктивного виконання основних вузлів та запропонувати раціональні параметри.*

**Ключові слова:** фосфогіпс, термічна обробка, енергоємність, інжекційний пальник, моделювання потоків.

**Постановка проблеми.** Багато як промислових, так і побутових відходів не утилізуються, а складуються на полігонах. Так, фосфогіпс складається у відвалах, погіршуючи санітарний стан всього промислового комплексу й екологічний стан прилеглої території. Для створення відвалів фосфогіпсу необхідно постійно відчужувати великі ділянки земель, часто родючих [1]. Перспективним методом утилізації фосфогіпсу є його безвідходна термохімічна утилізація з отриманням для виробництва в'язучих будівельних матеріалів і виробів [2].

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Останнім часом поширився суміщений помел і термічна обробка гіпсових в'язучих, коли теплова обробка відбувається безпосередньо в помольному агрегаті в результаті інтенсивного теплообміну між гарячими газами і подрібненим матеріалом. У млини подаються гази з температурою 700–800°C із зовнішньої топки. Витрата умовного палива становить 40–50 кг на 1 т в'язучого [3]. Млини оснащені сепараторами прохідного типу, після яких подрібнений і дегідратований продукт надходить до пиловловлювачів.

Схеми виробництва із сумісним помелом і обпалом відрізняються насамперед за типом млинів (використовуються шахтні, кульові, аеро-

більні). Іноді млини працюють з одноразовим використанням теплоносія, а іноді – з поверненням у млин частини газів після пилоочищення. Застосування рециркуляції газів підвищує споживання електроенергії, але суттєво знижує витрату палива. Один із варіантів виробництва гіпсових в'язучих за поєднання їх помелу й обпалювання представлений на рис. 1. Недоліком цієї установки є короткий час впливу газів, внаслідок чого найбільш великі частки не встигають цілком дегідратуватися, а частина дрібних частинок перепалюється. Отриманий в'язучий матеріал швидко схоплюється і має невелику міцність.

У термічній обробці гіпсу розрізняють такі стадії процесу: підведення теплоти до поверхні частинок або шматків вихідного матеріалу, випаровування фізичної вологи, нагрівання матеріалу до температури дегідратації та хімічна реакція дегідратації гіпсу. Для того щоб почався процес дегідратації гіпсу, що лежить в основі технології отримання всіх гіпсових в'язучих речовин, необхідно до початкового гіпсу підвести теплоту і передати її.

Випаровування фізичної вологи починається вже за незначного нагрівання, починаючи із 60–70°C, водночас від молекул відщеплюється кристалізаційна вода. За цих температур процес

відбувається дуже повільно. Інтенсивна дегідратація починається за температури матеріалу 97–105°C. У стандартній заводській технології для отримання напівгідрату підтримується температура 120–170°C. Подальше підвищення температури до 210°C приводить до утворення зневодненого гіпсу [4].

Деякими підприємствами вже застосовуються установки для термічної обробки гіпсової сировини в завислому стані [5; 6]. Проте вони не поширилися, оскільки не вдається отримати гіпсове в'язуче високої якості. Це пов'язано з відсутністю досліджень із термічної обробки гіпсових часточок у завислому стані в потоці теплоносія. Тому досі не створено обладнання для дегідратації гіпсу в завислому стані, яке б враховувало всі особливості процесів, що відбуваються.

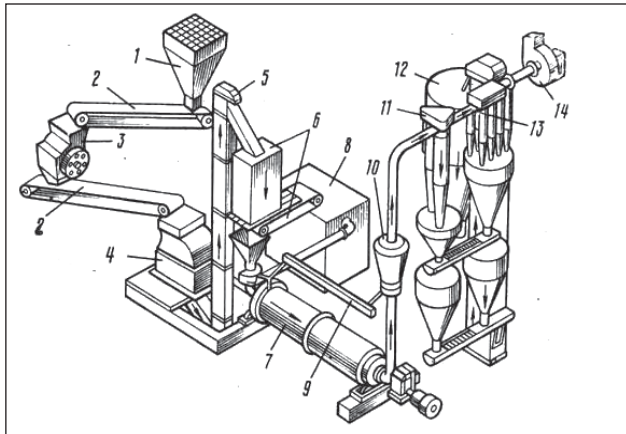


Рис. 1. Технологічна схема виробництва гіпсу за сумісного помелу та обпалювання [3]

1 – приймальний бункер, 2 – стрічковий конвеєр, 3 – шочкова дробарка, 4 – молоткова дробарка, 5 – елеватор, 6 – дозатор, 7 – кульовий млин, 8 – топка, 9 – шнек повернення матеріалу, 10 – повітряно-прохідний сепаратор, 11 – система пилоосадження першого ступеня, 12 – бункер готової продукції, 13 – система пилоосадження другого ступеня, 14 – вентилятор

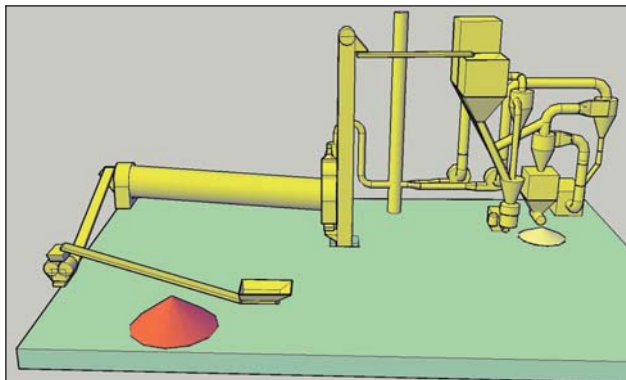


Рис. 2. Схема для моделювання руху потоків

Сучасним інструментом дослідження руху потоків середовищ є комп'ютерні системи моделювання, що застосовують закони механіки суцільних середовищ і методи кінцевих елементів.

**Формулювання цілей статті.** Розробка більш ефективного обладнання для дегідратації гіпсу, в якому б зменшувалась витрата енергоресурсів на отримання продукту без зниження якості останнього та дослідження випалу гіпсової сировини в завислому стані з подальшою розробкою обладнання для раціонального здійснення такого процесу.

**Постановка завдання.** У Харківському національному університеті будівництва та архітектури запропоновано спосіб переробки фосфогіпсу в гіпсове в'язуче, створено лабораторно-дослідну установку [7] та підтверджено можливість використання відвального фосфогіпсу для виготовлення будівельного гіпсу у зваженому стані. Для вибору оптимальних параметрів установки виконано її моделі в системі комп'ютерного моделювання газових потоків. У системі моделювалася установка продуктивністю 5 т/год. Передбачалися витрати 40–50 кг умовного палива на 1 т в'язучого (за аналогом [3]). За годину – 250 кг умовного палива, або

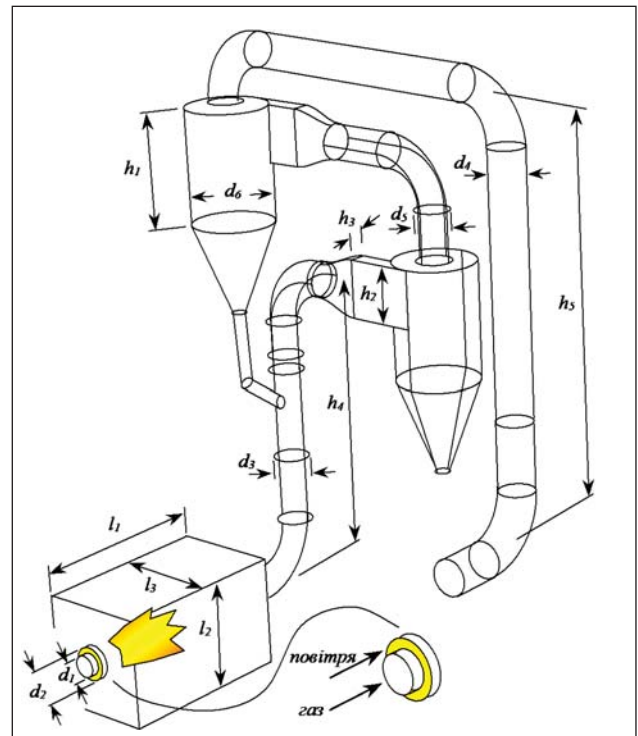


Рис. 3. Конструкція та розміри установки для моделювання

$h_1 = 1,59$  м;  $h_2 = 0,78$  м;  $h_3 = 0,24$  м;  $h_4 = 8,79$  м;  $h_5 = 4,6$  м;  
 $d_1 = 0,291$  м;  $d_2 = 0,443$  м;  $d_3 = 0,477$  м;  $d_4 = 0,456$  м;  
 $d_5 = 0,477$  м;  $d_6 = 1,112$  м;  $l_1 = 2,385$  м;  $l_2 = 1,449$  м;  $l_3 = 1,449$  м.

250/1,14 = 220 м<sup>3</sup>/год природного газу. Створена масштабна 3D-модель – на рис. 2.

Розрахунок кількості повітря для спалювання.

За спалювання природного газу питома витрата повітря V (м<sup>3</sup> повітря/м<sup>3</sup> палива) може розраховуватися за відомою формулою:

$$V = (H_2 \cdot 0,5 + CH_4 \cdot 2 + C_2H_6 \cdot 3,5 + C_3H_8 \cdot 5 + C_4H_{10} \cdot 6,5 + C_5H_{12} \cdot 8 + \dots) / 0,21, \quad (1)$$

де H<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>, C<sub>3</sub>H<sub>8</sub> і т.д. – об'ємні частки водню, метану, пропану, бутану тощо в природному газі.

Якщо висока точність не потрібна, можна орієнтовно прийняти для газу V = 10 (м<sup>3</sup> повітря/м<sup>3</sup> газу). Важали, що з урахуванням коефіцієнта надлишку повітря 1,2, на спалювання необхідних 220 м<sup>3</sup>/год потрібно 220 \* 10 \* 1,2 = 2640 м<sup>3</sup>/год повітря за нормальних умов.

Приймали густину природного газу 0,75 кг/м<sup>3</sup>; повітря – 1,3 кг/м<sup>3</sup>.

Масова витрата становить:

– для газу: (220 м<sup>3</sup>/год) \* (0,75 кг/м<sup>3</sup>) = 165 кг/годину; 0,046 кг/с;

– для повітря: (2640 м<sup>3</sup>/ч) \* (1,3 кг/м<sup>3</sup>) = 3432 кг/год.; 0,95 кг/с.

Конструкція та розміри установки ділянки, де реалізується зважений стан, – на рис. 3. Площі перерізу для входу газу і повітря на вході в умовний інжекційний пальник:

$$S_1 = \frac{\pi \cdot d_1^2}{4} = \frac{\pi \cdot 0,291^2}{4} = 0,0665 \text{ м}^2 \text{ – через цей отвір подається газ;}$$

$$S_2 = \frac{\pi \cdot d_2^2}{4} - \frac{\pi \cdot d_1^2}{4} = \frac{\pi \cdot 0,443^2}{4} - \frac{\pi \cdot 0,291^2}{4} =$$

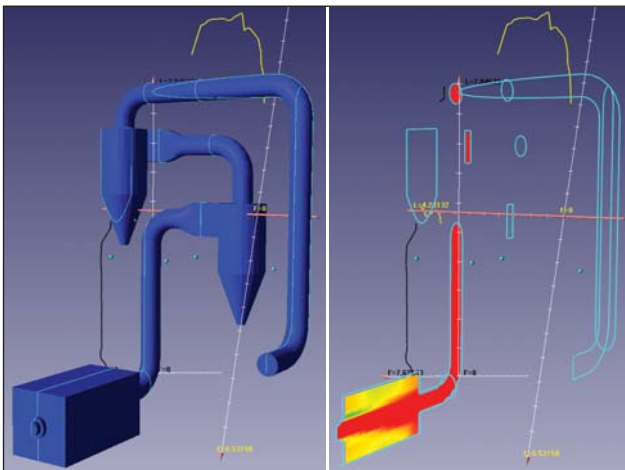


Рис. 4. Моделювання варіанта 1



Рис. 5. Швидкість потоку у вертикальній шахті дегідрататора (вар. 1)

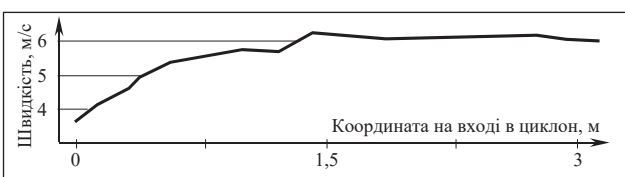


Рис. 6. Швидкість потоку на вході у відцентровий циклон (вар. 1)

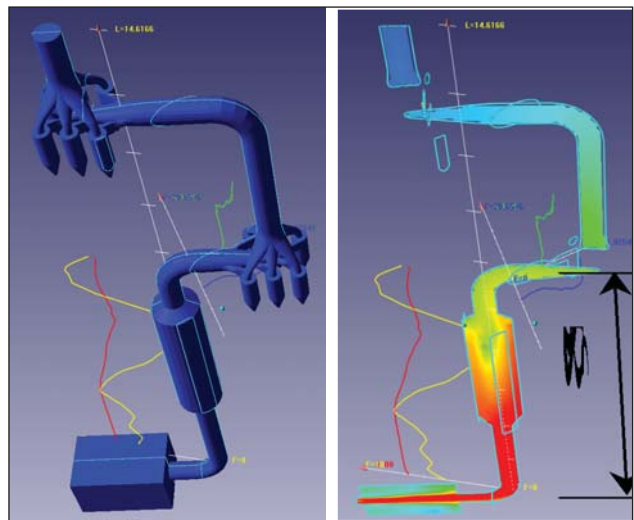


Рис. 7. Моделювання варіанта 2

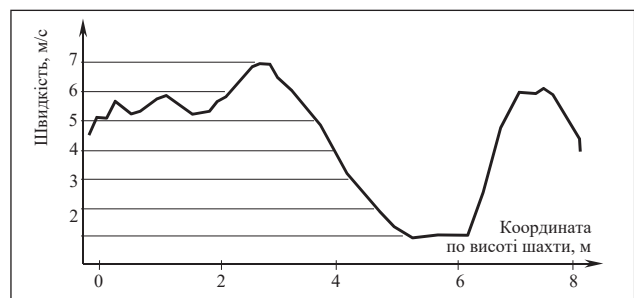


Рис. 8. Швидкість потоку у вертикальній шахті дегідрататора (вар. 2)

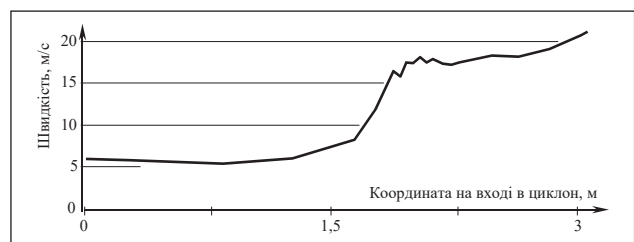


Рис. 9. Швидкість потоку на вході у відцентровий циклон (вар. 2)

$= 0,154 - 0,0665 = 0,0875 \text{ м}^2$  – через цей отвір подається повітря.

Нормальні масові швидкості для цих отворів для заданих потужностей:

$$0,046 \frac{\text{кг}}{\text{с}} = 0,692 \frac{\text{кг}}{\text{м}^2 \cdot \text{с}} \text{ – газу,}$$

$$0,95 \frac{\text{кг}}{\text{с}} = 10,86 \frac{\text{кг}}{\text{м}^2 \cdot \text{с}} \text{ – повітря.}$$

Цей параметр використано в системі моделювання руху потоків.

На частинку, що перебуває в потоці газу, діють нижчезазначені сили.

Сила повітряного потоку:

$$P = cKF \frac{\rho_{\text{повітря}} \cdot v^2}{2} = cK \frac{\pi d^2 \cdot v^2 \cdot \rho_{\text{повітря}}}{4 \cdot 2}, \quad (2)$$

де  $c$  – коефіцієнт аеродинамічного опору перерізу,  $c \approx 0,5$  – залежить від критерію Рейнольдса;  $K$  – коефіцієнт, що враховує форму частинки;  $K = 1$  для сферичної частинки;

$F = \frac{\pi d^2}{4}$  – площа міделева перерізу частинки.

Вага частинки:

$$G = \frac{\pi d^3}{6} \rho_{\text{матер}}. \quad (3)$$

Прирівнявши (2) та (3), знайдемо швидкість витання частинки:

$$cK \frac{\pi d^2 \cdot v^2 \cdot \rho_{\text{повітря}}}{4 \cdot 2} = \frac{\pi d^3}{6} \rho_{\text{матер}}. \quad (4)$$

Для нашого прикладу:

$$v = \sqrt{\frac{8 \cdot \rho_{\text{об'єкт}} \cdot c \cdot d}{6 \cdot \rho_{\text{повітря}} \cdot c \cdot K}} = \sqrt{\frac{8 \cdot 2500 \cdot 0,0002}{6 \cdot 1,3 \cdot 0,5 \cdot 1}} = 1,013 \text{ м/с},$$

отже, за теоретичним розрахунком необхідно, щоб у вертикальній шахті дегідрататора швидкість потоку становила 1 м/с. Тут 0,0002 м – середній розмір частинки фосфогіпсу, 2500 кг/м<sup>3</sup> – справжня густина матеріалу, 1,3 кг/м<sup>3</sup> – густина повітря за нормальних умов.

Приклад візуалізації в системі моделювання – на рис. 4.

На рис. 5. – швидкість потоку у вертикальній шахті дегідрататора, швидкість потоку становить до 5,5–6 м/с, на рис. 6 швидкість потоку на вході у відцентровий циклон – 6 м/с.

Для зменшення швидкості потоку частинок фосфогіпсу в шахті дегідрататора вона була збільшена в діаметрі (з 0,48 м до 1 м), а замість одного великого циклону встановлено 6 маленьких циклонів із суттєвим зменшенням перерізу каналів на вході. На рис. 7. – моделювання варіанта 2.

Для варіанта 2 швидкість у вертикальній шахті (рис. 8) дегідрататора відповідає умові витання частинки у газовому потоці (швидкість майже 1 м/с). Швидкість потоку на вході у відцентровий циклон становить приблизно 20 м/с (рис. 9). Така швидкість вважається оптимальною для циклону.

**Висновки.** Виконане комп'ютерне моделювання установки для обпалення фосфогіпсу у зваженому стані дозволило визначити недоліки конструктивного виконання основних вузлів і запропонувати раціональні параметри.

#### Список літератури:

1. Bisone S., Gautier M., Chatain V., Blanc D. Spatial distribution and leaching behavior of pollutants from phosphogypsum stocked in a gypstack: Geochemical characterization and modeling. Journal of environmental management. 2017. Vol. 193. № 15. P. 567–575. URL: [org/10.1016/j.jenvman.2017.02.055](http://org/10.1016/j.jenvman.2017.02.055).
2. Vinnichenko V., Krot A., Vitsenko N. Theoretical and experimental research into manufacturing of silicate products without thermal treatment. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. Technology organic and inorganic substances. 2016. Vol. 5. № 6 (83). P. 29–36. URL: <http://journals.uran.ua/eejet/article/view/79465>.
3. Бутт Ю., Дудеров Г., Матвеев М. Общая технология силикатов: учебник для техникумов. М.: Стройиздат, 1976. 600 с.
4. Frankovic M. Waste Phosphogypsum – Toward Sustainable Reuse in Calcium Sulfoaluminate Cement Based Building Materials. Chemical and biochemical engineering quarterly. 2013. Vol. 27. № 2. P. 219–226.
5. Гипсовые материалы и изделия (производство и применение): справочник / под общей ред. А. Феронской. М.: АСВ, 2004. 488 с.
6. Воробьев Х. Гипсовые вяжущие и изделия: зарубежный опыт. М.: Стройиздат, 1983. 200 с.
7. Спосіб переробки фосфогіпсу у гіпсове в'язуче: пат. на корисну модель 39919 Україна: МПК C04B 28/14 (2009.01). № а200811066; заяв. 11.09.08; опубл. 25.03.09. Бюл. № 6. 3 с.

## МОДЕЛИРОВАНИЕ И ВЫБОР РАЦИОНАЛЬНОЙ КОНСТРУКЦИИ УСТАНОВКИ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ФОСФОГИПСА

*В статье моделируются процессы термической обработки техногенного отхода – фосфогипса – во взвешенном состоянии в шахте-дегидрататоре, использование которой значительно интенсифицирует процессы тепло- и массообмена благодаря увеличению поверхности контакта. Поставлена задача по выбору рациональной конструкции установки. Рассчитана теоретическая скорость витания частиц фосфогипса в дегидрататоре, расход топлива и количество воздуха для сжигания. Выбрана необходимая форма и размеры участков установки для достижения оптимальных скоростей. Выполненное компьютерное моделирование установки для термической обработки фосфогипса во взвешенном состоянии позволило определить недостатки конструктивного исполнения основных узлов и предложить оптимальные параметры.*

**Ключевые слова:** фосфогипс, термическая обработка, энергоемкость, инжекционная горелка, моделирование потоков.

## MODELLING AND CHOOSING THE RATIONAL DESIGN OF HEAT TREATMENT UNIT FOR PHOSPHOGYPSUM

*In this article modelled processes of heat treatment of the technogenic waste – phosphogypsum – in a suspended state in a dehydrator mine. Its use greatly intensifies the processes of heat and mass transfer, due to the increase in the contact surface. The objective is to choosing a rational design of the installation. The theoretical velocity of the particles of phosphogypsum in the dehydrator, the fuel consumption and the amount of air for combustion are calculated. The necessary shape and dimensions of the plant sections were chosen to achieve optimum speeds. A computer simulation of the installation for heat treatment of phosphogypsum in suspension has been performed. This allowed us to determine the shortcomings of the design of the main units and to propose optimal parameters.*

**Key words:** phosphogypsum, heat treatment, energy intensity, injection burner, flow simulation.