

**НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
«ПОЛТАВСЬКА ПОЛІТЕХНІКА
ІМЕНІ ЮРІЯ КОНДРАТЮКА»**

**ЕКОЛОГІЯ. ДОВКІЛЛЯ.
ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ – 2024**

Колективна монографія

Полтава 2024

**ПЕРСПЕКТИВИ ОТРИМАННЯ ЕКОЛОГІЧНО БЕЗПЕЧНОЇ
ПРОДУКЦІЇ З ФОСФОГІПСУ
OPPORTUNITY TO OBTAIN AN ENVIRONMENTALLY
FRIENDLY PRODUCT OF PHOSPHORGYPSUM**

¹**Крот О.П.**, доктор технічних наук, доцент, професор кафедри теплогазопостачання, вентиляції та теплоенергетики,

²**Пуховой О.В.**, аспірант

¹**Krot O.P.**, Doctor of Technical Sciences, Docent, Professor of the Department of heat and gas supply, ventilation and heat energy

²**Pukhvoi O.V.**, graduate student

¹Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка», Україна

²Харківський національний університет міського господарства імені О. М. Бекетова, Україна

¹National University «Yuri Kondr aspirant atyuk Poltava Polytechnic», Ukraine

²O.M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv, of the Department of urban ecology engineering, Ukraine

Анотація. В Україні спостерігається накопичення значного обсягу промислових та побутових відходів, які акумулюються на спеціальних місцях – полігонах чи відвалах. Ці місця для вивантаження відходів стають джерелами некерованого забруднення навколишнього середовища, негативно впливаючи на неї протягом тривалого часу. Прикладом одного з найбільш масових видів твердих відходів, що утворюються у процесі виробництва мінеральних добрив, є фосфогіпс. Найбільш рентабельним використанням фосфогіпсу є перетворення його на напівводяний (будівельний) гіпс шляхом випалу в тонко дисперсному стані. Запропонована нова технологія є важливим і актуальним завданням як з енергетичної, так і з екологічної точок зору. Розробка більш ефективного способу утилізації тепла відхідних газів сміттєспалювальних печей дозволить більш раціонально використовувати теплову енергію, що виділяється при спалюванні відходів. Така установка має кілька важливих переваг, а саме: значно інтенсифікуються процеси тепло- і масообміну, що пов'язано зі збільшенням поверхні контакту фаз і коефіцієнтів тепло- і масообміну;

безперервний введення і виведення твердої фази; простота і компактність конструкції, можливість автоматизації процесу.

Abstract. In Ukraine, there is an accumulation of a significant volume of industrial and household waste, which is accumulated in special places - landfills or dumps. These waste disposal sites become sources of uncontrolled pollution of the environment, causing negative impacts on the environment over a long period of time. An example of one of the most widespread types of solid waste generated during the production of mineral fertilizers is phosphogypsum. The most cost-effective use of phosphogypsum is to convert it into semi-water (building) gypsum by firing it in a finely dispersed state.

The proposed new technology is an important and urgent task from both the energy and environmental points of view. The development of a more effective way of heat utilization of waste gases of waste incinerators will allow more rational use of thermal energy released during waste incineration. Such an installation has several important advantages, namely: heat and mass exchange processes are significantly intensified, which is associated with an increase in the contact surface of phases and coefficients of heat and mass exchange; continuous input and output of the solid phase; simplicity and compact design, the possibility of automating the process.

В Україні накопичилася велика кількість промислових та побутових відходів. Відходи складуються на полігонах чи відвалах. Місця поховання відходів є джерелом безконтрольного забруднення навколишнього середовища, які негативно впливають протягом тривалого часу. Одним із найбільш багатотонних твердих відходів виробництва мінеральних добрив є фосфогіпс. Фосфогіпс – побічний продукт, що утворюється при виробництві фосфорної кислоти з апатитових і фосфоритових руд:



В Україні є чотири різновиди фосфогіпсу: відвальний фосфогіпс з апатитового концентрату з терміном зберігання (10-30) років (рис.1), відвальний фосфогіпс з фосфоритів з терміном зберігання менше десяти років, сформований у найближчий час фосфогіпс із фосфоритів і відвальний фосфогіпс з урановмісних фосфоритів.

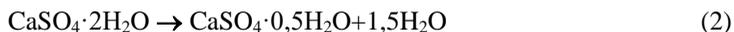
Фосфогіпс у своєму складі містить понад 90 % кристалів $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, але також містить домішки, такі як фосфати, фториди та сульфати, радіонукліди, які зустрічаються в природі, важкі метали та інші мікроелементи. Все це призводить до негативного впливу на довкілля при зберіганні фосфогіпсу у відвалах [1].

Біодоступність радіонуклідів оцінювали [2] у бразильських виробників фосфорної кислоти. Результати показують, що хоча всі ці елементи збагачені у зразках фосфогіпсу, вони не пов'язані з самим CaSO_4 і тому не становлять загрози для навколишнього водного середовища. Тому радіоактивність фосфогіпсу слід вимірювати та враховувати у кожному конкретному випадку. При виробництві фосфорної кислоти з апатитового концентрату на 1 т корисного продукту одержують 4 ÷ 6 т відходів, що містять гіпс. Питання переробки гіпсовмісних відходів є особливо актуальним.



Рисунок 1 – Відвальний фосфогіпс

При цьому фосфогіпс може служити сировиною для виробництва будівельного гіпсу:



Існують різні напрями використання фосфогіпсу: використання фосфогіпсу при виробництві будівельних матеріалів [3, 4]; застосування у будівництві автомобільних доріг [5, 6]; утилізація як добрива у сільському господарстві [7].

Найбільш рентабельним використанням фосфогіпсу є перетворення його на напівводяний (будівельний) гіпс шляхом випалу в тонко дисперсному стані. Основна проблема переробки фосфогіпсу в напівводяний гіпс, на думку авторів, полягає не стільки в екологічній небезпеці домішок, що входять у фосфогіпс відвальний, скільки в його тонко дисперсності, наявності в ньому фізичної вологи, а також у відмінності кристалічної структури в порівнянні з використовуваним

двох водяним гіпсом. Вологість фосфогіпсу у відвалах висока і змінна, змінюється від 20 до 40% в залежності від пори року і кількості опадів, що випадають. Вологість природного гіпсового каменю зазвичай не перевищує 5-8%. Цим пояснюється менша енергоємність і більша стабільність процесу виробництва будівельного гіпсу саме з викопного природного двоугідрату.

Проблема зниження енергоємності виробництва має першорядне значення не тільки в плані енергетичної незалежності, але і з точки зору забезпечення конкурентоспроможності продукції як на зовнішньому, так і на внутрішньому ринках. Виробництво гіпсу вимагає вдосконалення технологічного процесу термічної обробки з метою зменшення затрат енергетичних ресурсів з урахуванням екологічних проблем. Однак енергоємність гіпсових в'язків на підприємствах вище аналогічних показників іноземних держав, тому необхідно шукати шляхи зниження витрат енергії на термічну обробку гіпсових в'язків. І в умовах постійно зростаючих цін на паливні ресурси вирішення проблем енергозбереження набуває все більшої актуальності. Теоретична енергетична потреба хімічних реакцій у процесі одержання гіпсових в'язучих, в середньому, в чотири рази менша в порівнянні з отриманням цементного клінкеру, але фактичні витрати теплової енергії в промислових умовах виявляються на одному рівні, а іноді і перевищують витрати на отримання цементного клінкеру. Розробка комплексу, що дозволяє переробляти вологий і високоадгезійний фосфогіпс, використовуючи тепло згоряння альтернативного палива.

При тепловій обробці фосфогіпсу розрізняють такі стадії процесу: підведення теплоти до поверхні частинок або шматків вихідного матеріалу, випаровування фізичної вологи, нагрівання матеріалу до температури дегідратації та хімічна реакція гіпсу дегідратації. Аналіз наукових досліджень [9] з утилізації фосфогіпсу для отримання з нього будівельного гіпсу та інших будівельних матеріалів та виробів розкриває проблему енергоємності цих технологій [10].

Для того щоб почався процес дегідратації гіпсу, що лежить в основі технології отримання всіх гіпсових в'язучих речовин, необхідно до вихідного гіпсу підвести теплоту і передати її. Випаровування фізичної вологи починається вже при незначному нагріванні, одночасно, починаючи з 60-70 °С, від молекул відщеплюється кристалізаційна вода. За цих температур процес протікає дуже повільно. Інтенсивна дегідратація починається при температурах матеріалу 97-105 °С. У стандартній заводській технології для одержання напівгідрату підтримується температура 120-170 °С. Подальше підвищення температури до 210 °С призводить до появи зневоднених напівгідратів.

Як сировина для виробництва гіпсових в'язучих в експериментальних дослідженнях використовувався відхід хімічної промисловості – фосфогіпс з відвалів заводу мінеральних добрив із фосфоритової сировини. Фосфогіпс є тонкодисперсний порошок (рис.2), частково скомкований, легко набирає вологу.



Рисунок 2 – Фосфогіпс для експериментів

У роботі вперше запропоновано спосіб утилізації теплоти, що утворюється в процесі термічного знешкодження відходів, в якому одержувана тепла енергія використовується для термічної обробки промислового відходу – фосфогіпсу.

Нами запропоновано використовувати тепло відхідних газів перед тканинним фільтром для термічної обробки гіпсу (фосфогіпсу). Перед подачею матеріалу в установку для обпалу теплоносії повинен мати певну строго визначену температуру. Теплова енергія, яка необхідна для обпалу, приходить з газами, що відходять з сушильної ділянки і продуктами згоряння палива, у даному випадку згоряння ТБВ. Для зниження температури продуктів згоряння палива необхідно їх змішати з повітрям. Цю частку повітря визначають при розв'язанні рівняння змішування газів.

Розглянемо основні стадії процесу теплової обробки фосфогіпсу, а саме: підведення теплоти до поверхні частинок або шматків початкового матеріалу, випаровування фізичної вологи, нагрівання матеріалу до температури дегідратації і 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 при незначному нагріванні. Одночасно, починаючи з 60-70 °С, від молекул відщеплюється кристалізаційна вода. При цих температурах процес протікає дуже повільно. Інтенсивна дегідратація починається при температурах матеріалу 97-105 °С, кінцевим продуктом в цьому випадку є напівгідрат сульфату кальцію. Подальше підвищення температури до 210 °С призводить до появи зневоднених напівгідратів. За даними різних авторів розчинний ангідрид утворюється при температурах 220- 450 °С. При підвищенні температури до 450 °С і більше розчинні ангідриди переходять у нерозчинні.

На рис. 3 представлена діаграма термічної обробки фосфогіпсу, на якій видно усі стадії обпалу фосфогіпсу. У технологічних лініях із використанням гіпсоварочних котлів сировинний матеріал піддається помелу та сушінню в шахтному млині-сушарці, потім завантажується в гіпсоварочний котел періодичної або безперервної дії. В котлі гіпс нагрівається до температури дегідратації і дегідратується. З котла матеріал направляється в бункер томління, де він витримується при сталій температурі від трьох до п'яти годин для поліпшення якості в'язучого.

Новим є те, що з метою підвищення ефективності використання теплоти згорання твердих побутових відходів потік газів установки підхоплює фосфогіпсову сировину і за час руху вгору по шахті матеріал сприймає тепло газів та піддається обпалу у зваженому стані. Потім газовий потік разом з гіпсовим в'язучим спрямовується в циклон, де відбувається відділення гіпсового в'язучого від газів. Гази безпосередньо контактують з матеріалом, якому передають тепло. Поверхня контакту має велику площу тому, що матеріал дрібнодисперсний і частинки матеріалу маленькі. Для реакції перетворення у такому дисперсному стані кілька секунд часу контакту з гарячим газом є достатнім.

Наведено приклад теплоутилізуючого комплексу продуктивністю 1000 кг/год (за ТПВ) (рис. 4).

Запропонована нова технологія, є важливим і актуальним завданням як з енергетичної, так і з екологічної точок зору.

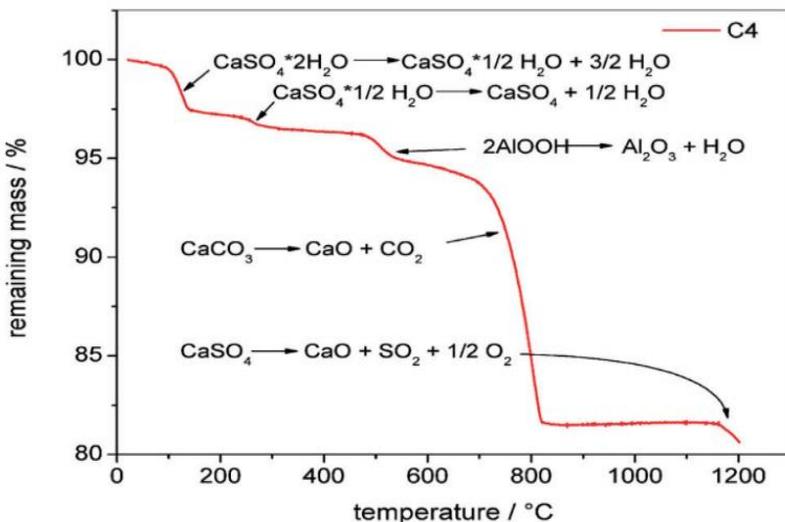


Рисунок 3 – Діаграма термічної обробки фосфогіпсу [8]

Розробка більш ефективного способу утилізації тепла відхідних газів сміттєспалювальних печей дозволить більш раціонально використовувати теплову енергію, що виділяється при спалюванні відходів. Така установка має кілька важливих переваг, а саме: значно інтенсифікуються процеси тепло- і масообміну, що пов'язано зі збільшенням поверхні контакту фаз і коефіцієнтів тепло- і масообміну; безперервний введення і виведення твердої фази; простота і компактність конструкції, можливість автоматизації процесу.

Закон збереження масистосується, в тому числі й систем термічного знешкодження відходів. Отже, сума всіх вхідних потоків дорівнює сумі всіх вихідних потоків, а саме:

- загальні масові потоки (кг/год);

- будь-який окремий елемент, що надходить до установки і залишає її, виражений або в одиницях маси (кг/год), або в кількості молей (моль/год). В горючих відходах основними елементами є: вуглець (С, 12), водень (Н, 1), кисень (О, 16), сірка (S, 32), азот (N, 14) та хлор (Cl, 35,5).

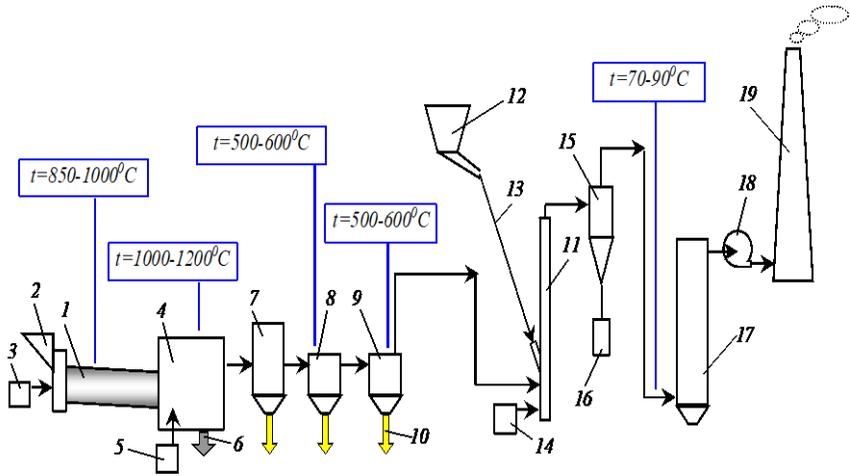


Рисунок 4 – Комплексна технологія переробки ТПВ та фосфогіпсу: 1 – обертається піч; 2 – завантажувальний пристрій; 3 – паливник печі паливна; 4 – камера допалювання; 5 – паливник паливної камери дожганія; 6 – шлак; 7 – теплоутилізатор; 8 – інерційно-вихровий коаксіальний пиловловлювач; 9 – каталітичний реактор; 10 – зола виносу; 11 – шахта випалу; 12 – бункер фосфогіпсу; 13 – трубопровід матеріалу; 14 – догрівач газу (при необхідності); 15 – циклон сушки; 16 – бункер готового продукту; 17 – рукавний фільтр; 18 – димосос; 19 – димова труба

Вхідні потоки зазвичай: ТПВ, додаткове паливо для розігріву відходів та первинний і вторинний повітря для горіння. Для підвищення ефективності очищення газів, що утворюються в процесі термічної обробки відходів, можна додавати лужний розчин або гашене вапно, вапняк, аміак для основних органічних забруднювачів (очищення від димових газів). Типовими вихідними потоками є: шлак, зола виносу, залишки газу нейтралізації і очищений газ, що скидається в атмосферне повітря.

Традиційне розташування підприємств виробництв будівельних матеріалів та підприємств збору, переробки та утилізації сміття на віддаленні від житла зумовлює можливість розглядання суміщення цих виробництв. Тепло, одержуване від спалювання сміття, може бути використано для термообробки при виробництві будівельних матеріалів.

На рис. 5 наведено можливу структуру потоків тепла та ресурсів для розрахунку теплового балансу обпалу фосфогіпсу з отриманням напівводяного гіпсу. У цьому випадку гарячий газ з температурою до 1200⁰С, отриманий в установці для спалювання, віддає частину тепла у теплоутилізаторі, охолоджуючись до температури 500-600⁰С. Після цього до газу підмішується атмосферне повітря, газ охолоджується до 400⁰С.

Тепловий баланс сумісної технології термічного знешкодження побутових і промислових відходів.

Прихід тепла з газами, що приходять із камери змішувача топки:

$$q_1 = V_{газу} \cdot C_{г} \cdot t_{г}, \text{кДж/кг} \quad (1)$$

де $V_{газу}$ – об'єм газу, м³ на 1 кг фосфогіпсу;

$C_{г}; t_{г}$ – відповідно теплоємність і температура газів.

$$q_1 = V_{газу} \cdot 1,366 \cdot 400 = 546,4 \cdot V_{газу}. \quad (2)$$

Прихід тепла з сировиною (двохводяним гіпсом), який надходить на термообробку.

$$q_2 = (G_c \cdot C_c + G_W^{физ} \cdot C_{H_2O}) \cdot t_c, \text{кДж/кг} \quad (3)$$

де G_c – відносна витрата сухої сировини з урахуванням безповоротного уносу (на 1 кг продукту), кг/кг;

C_c – питома теплоємність сухої сировини, кДж/(кг·⁰С); $C_c = 1,09$ кДж/(кг·⁰С).

$G_W^{физ}$ – відносний вихід фізично зв'язаної вологи (на 1 кг продукту), кг/кг;

$G_W^{физ} = 0,012$ кг/кг (тобто відносна вологість початкового продукту 1,2%).

C_{H_2O} – питома теплоємність води при нормальних умовах, кДж/(кг·⁰С).

$$C_{H_2O} = 4,18 \text{кДж/(кг·}^{\circ}\text{С)}$$

$$G_c = a_{унос} \frac{M_{CaSO_4 \cdot 2H_2O}}{M_{CaSO_4 \cdot 1,5H_2O}} = 1,02 \frac{172,14}{145,14} = 1,21, \text{кг/кг}; M_{CaSO_4 \cdot 2H_2O}$$

$a_{унос}$ – коефіцієнт уносу пилу з газами, що відходять в частинках від маси сировини; якщо $a_{унос} = 1,02$, то 2% матеріалу несеться у вигляді пилу.

t_c – температура сировини, °C; наприклад, $t_c = 20^\circ\text{C}$.
 $q_2 = (1,21 \cdot 1,09 + 0,012 \cdot 4,18) \cdot 20 = 27,381$ кДж/кг.

W_c – початкова вологість сировини, %.

Сумарний прихід тепла:

$$\sum q_{прих} = q_1 + q_2, \text{ кДж/кг.} \quad (4)$$

Витрата тепла (кДж/кг)

1) Витрати на випаровування вологи

$$Q_1 = G_W^{физ} (I_{II} + C_{II} \cdot t_{II}), \quad (5)$$

де I_{II} , C_{II} , t_{II} – відповідно ентальпія, теплоємність і температура пара.

$I_{II} = 2491,3$ кДж/кг пари – ентальпія пари; C_{II} – теплоємність водяних парів при температурі пароутворення $1,9$ кДж/(кг·°C); t_{II} – температура пароутворення (110°C) (температура пароутворення умовно прийнята більш ніж 100°C умовно; завдяки цьому не буде необхідності вводити ще одну складову – на перегрів пара від 100°C до 110°C – саме з такою температурою відводяться відпрацьовані гази з установки).

$G_W^{физ}$ – відносний вихід фізично зв'язаної вологи (на 1 кг продукту), кг/кг;

$G_W^{физ} = 0,012$ (тобто відносна вологість надходить продукту 1,2%).

$$Q_1 = G_W^{физ} (I_{II} + C_{II} \cdot t_{II}) = 0,012 \cdot (2491,3 + 1,9 \cdot 110) = 32,4 \text{ кДж/кг.} \quad (6)$$

2) Витрати тепла з матеріалом, що відходить

$$Q_2 = 1 \cdot C_{гінсу} \cdot t_{гінсу} \text{ на виході}$$

(7)

“1” тому, що зміни вологості тут не відбувається.

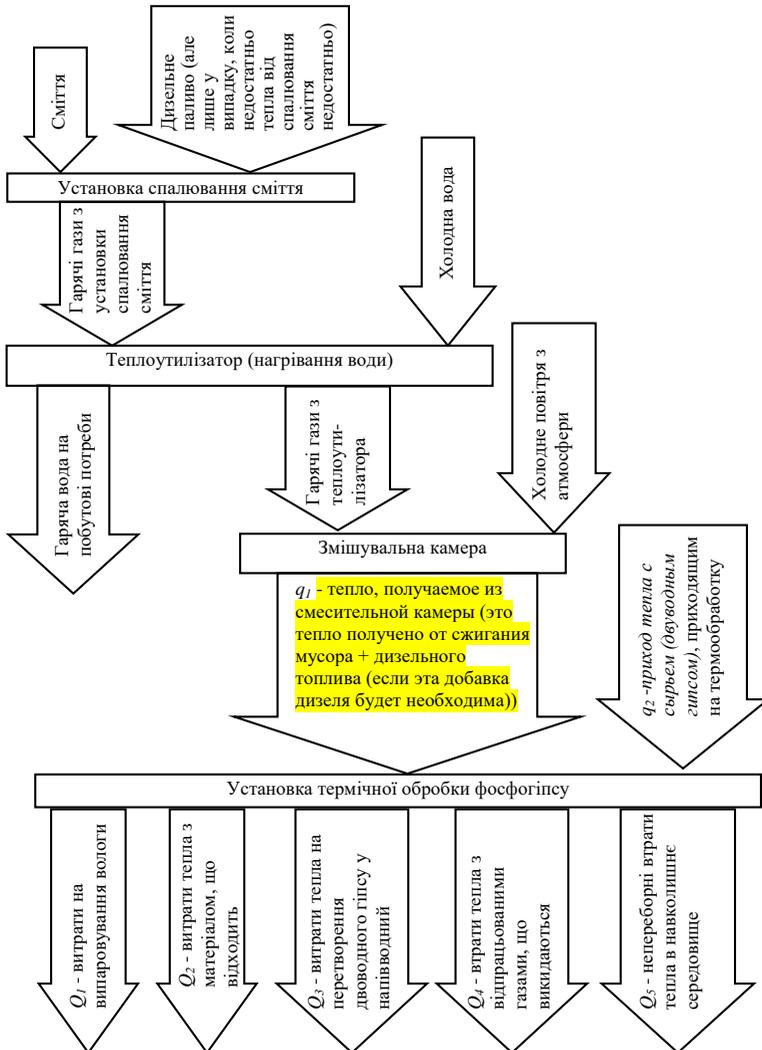


Рисунок 5 – Структура потоків для розрахунку теплового балансу об'єкту фосфогіпсу

$$C_{\text{гіпсу}} = 1,09 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot ^\circ\text{C}).$$

$$t_{\text{гіпсу на виході}} = 110^\circ\text{C}.$$

$$Q_2 = 1 \cdot 1,09 \cdot 110 = 119,9 \text{ кДж}/\text{кг}.$$

3) Витрати тепла на перетворення двоводного гіпсу у напівводний.

Тепловий ефект дегідратації гіпсу $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ до $\text{CaSO}_4 \cdot 0,5\text{H}_2\text{O}$:

$$Q_3 = \frac{\Delta H_{298}}{M_{\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}}} \quad (8)$$

Визначаємо ентальпію реакції при 298 К:

- на моль речовини:

$$\Delta H_{298} = \Sigma H^{\circ}_{298} \text{ продуктів} - \Sigma H^{\circ}_{298} \text{ вихідних речовин} \quad (9)$$

Значення теплоти утворення приведені в табл. 1.

Дегідратація двоводяного гіпсу до напівводяного гіпсу проходить за реакцією $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O} = \text{CaSO}_4 \cdot 0,5\text{H}_2\text{O} + 1,5\text{H}_2\text{O}$

Розраховуємо ентальпію реакції на моль:

$$\Delta H_{298} = 376 + 1,5 \cdot 57,8 - 483 = -20,3 \text{ ккал/моль (або } -85 \text{ кДж/моль)}.$$

Таблиця 1

Теплота утворення з елементів

Формула сполуки	Стан	Теплота утворення з елементів - ΔH°_{298} ккал/моль (кДж/моль)
H_2O	газ	57,8 ккал/моль (242 кДж/моль)
$\text{CaSO}_4 \cdot 0,5\text{H}_2\text{O}$	тверд.	376 ккал/моль (1573 кДж/моль)
$\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	тверд.	483 ккал/моль (2022 кДж/моль)
$\text{CaSO}_4 - \beta$ - розчинний ангідрит	тверд.	334 ккал/моль (1397 кДж/моль)

Молекулярна маса:

$$M_{\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}} = 40,08 + 32,064 + 4 \cdot 15,999 + 2(2 \cdot 1 + 15,999) = 172,14$$

а.е.м.

Відповідно, молярна маса 172,14 г/моль.

172,14 = 145,14 + 27 (баланс реакції за молекулярними масами).

$$Q_3 = \frac{20,3 \frac{\text{ккал}}{\text{моль}}}{172,14 \frac{\text{г}}{\text{моль}}} = 0,118 \frac{\text{ккал}}{\text{г}} \text{ (або 118 ккал/кг (494 кДж/кг))}.$$

Вихід хімічно зв'язаної вологи:

$$G_W^{xim} = \frac{M_{1,5H_2O}}{M_{CaSO_4 \cdot 1,5H_2O}}, \text{ кг/кг.}$$

Молекулярна маса речовин:

$M_{CaSO_4 \cdot 1,5H_2O} = 145,14$ а.е.м. (Відповідно, молярна маса 145,14 г/моль).

$M_{1,5H_2O} = 27$ а.е.м. (Відповідно, молярна маса 27 г/моль).

$$G_W^{xim} = \frac{27}{145,14} = 0,186, \text{ кг/кг (це є витрати маси при}$$

прокалюванні).

Загальний вихід водяних парів:

- за масою:

$$G_{\text{водяних парів}} = G_W^{fiz} + G_W^{xim}, \text{ кг/кг.} \quad (10)$$

$$G_{\text{водяних парів}} = 0,012 + 0,186 = 0,198, \text{ кг/кг.}$$

- за об'ємом:

$$V_{\text{водяних парів}} = \frac{G_{\text{водяних парів}}}{\rho_{\text{водяних парів}}}, \text{ м}^3/\text{кг.} \quad (11)$$

$$\rho_{\text{водяних парів}} = 0,825, \text{ кг/м}^3 \text{ (при температурі } 110^\circ\text{C)}.$$

$$V_{\text{водяних парів}} = \frac{0,198}{0,825} = 0,24, \text{ м}^3/\text{кг.}$$

4) Втрати тепла з відпрацьованими газами, що викидаються.

$$Q_4 = V_{\text{газу}} \cdot C_{\text{відх газів}} \cdot t_{\text{відх газів}} + V_{\text{водяних парів}} \cdot C_{\text{П}} \cdot t_{\text{П}}, \quad (12)$$

де $C_{\text{відх газів}}$ – приблизна питома теплоємність газів, що

відходять, кДж/(кг·°C); $C_{\text{відх газів}} = 1,24$ кДж/(кг·°C).

$$t_{II} = 110^{\circ}\text{C}.$$

C_{II} – теплоємність водяних парів при температурі пароутворення $1,9 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot ^{\circ}\text{C})$;

$$Q_4 = V_{газу} \cdot 1,24 \cdot 110 + 0,24 \cdot 1,9 \cdot 110 = V_{газу} \cdot 136,4 + 50,16 \text{ кДж}/\text{кг}.$$

5) Нереалізовані технологією втрати тепла в навколишнє середовище (через теплопровідності стінок установки, наприклад):

$$Q_5 = (0,05 \div 0,1) \cdot q_1, \text{ кДж}/\text{кг}.$$

$$Q_5 = 0,1 \cdot 546,4 \cdot V_{газу} = 54,64 \cdot V_{газу}.$$

Загальна витрата тепла має вигляд:

$$\sum Q = Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 + Q_5, \text{ кДж}/\text{кг}. \quad (13)$$

Розраховуємо для комплексу термічного знешкодження відходів:

$$\begin{aligned} \sum Q &= 32,4 + 119,9 + 494 + V_{газу} \cdot 136,4 + 50,16 + 54,64 \cdot V_{газу} = \\ &= 696,46 + 191,04 \cdot V_{газу} \end{aligned}$$

$$\sum q_{прих} = q_1 + q_2 = 546,4 \cdot V_{газу} + 27,381$$

$$\sum q_{прих} = \sum Q$$

$$546,4 \cdot V_{газу} + 27,381 = 696,46 + 191,04 \cdot V_{газу}$$

$$355,36 \cdot V_{газу} = 669,079$$

$$V_{газу} = 1,883 \frac{\text{М}^3}{\text{кг}} - \text{питома витрата газу з температурою}$$

400°C , що приходить з камери змішування.

Таким чином, питомі витрати тепла на 1 кг одержуваного гіпсу:

$$q_1 = V_{газу} \cdot C_e \cdot t_e, \text{ кДж}/\text{кг}$$

$$q_1 = 546,4 \cdot V_{газу} = 546,4 \cdot 1,883 = 1029 \text{ кДж}/\text{кг}.$$

Список використаних інформаційних джерел

1. Tayibi H., Choura M., Lo'pez F.A., Alguacil F.J. and Lo'pez-Delgado A., «Environmental impact and management of phosphogypsum», *Journal of Environmental Management*, Vol. 90, (2009), pp. 2377-2386, <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2009.03.007>.
2. Santos A.J.G., Mazzilli B.P, Fávares D.I.T., Silva P.S.C. «Partition-ing of radionuclides and trace elements in phosphogypsum and its source materials based on sequential extraction methods», *Journal of environmental radioactivity*, Vol.87, Is.1, (2006), pp.52–61, <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2005.10.008>.
3. Gorakh S. Bandgar, Madhav B. Kumthekar, Amarsinh B. Landage, «A Review of Effective Utilization of Waste Phosphogypsum as a Building Material», *International Journal of Engineering Research*, Vol.5, Is.1, (2016), pp:277-280, <http://dx.doi.org/10.17950/ijer/v5is1/065>.
4. Mohammad A. Aliedeh and Nabeel A. Jarrah, «Application of full factorial design to optimize phosphogypsum beneficiation process (P2O5 Reduction) by using sulfuric and nitric acid solu-tions», Sixth Jordanian International Chemical Engineering Con-ference, Amman, Jordan, (2012), pp:1-10, available online: <http://www.jeaconf.org/>.
5. Paige-Green, P., Gerber, S. «An Evaluation of the Use of By-product Phosphogypsum as a Pavement Material for Roads», *South African Transport Conference «Action In Transport for the New Millenium»*, (2000), Conference papers.
6. Stanisław Folek, Barbara Walawska, Bożena Wilczek and Jolanta Miśkiewicz, «Use of phosphogypsum in road construction», *Polish Journal of Chemical Technology*, Vol.13, Is.2, (2011), pp:18–22, <https://doi.org/10.2478/v10026-011-0018-5>.
7. C. Papastefanou, S. Stoulos, A. Ioannidou, M. Manolopoulou, «The application of phosphogypsum in agriculture and the radiological impact», *Journal of Environmental Radioactivity*, Vol.89, Is.2, (2006), pp:188–198, <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2006.05.005>.
8. Frankovic M. N., Ukrainczyk N., Leakovic S., Juraj Sipusic. *Waste Phosphogypsum – Toward Sustainable Reuse in Calcium Sulfoaluminate Cement Based Building Materials. Chemical and biochemical engineering quarterly*. 2013. Vol.27. №.2. P. 219–226.