

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
«ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ»

КАНСО ВІССАМ АЛІ

УДК 66.047.45.661.2/6.001.2

**Моделювання і інтенсифікація процесів термічного розкладу дисперсного
вапняку у обертових печах**

Спеціальність 05.17.08 – Процеси та обладнання хімічної технології

АВТОРЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Харків – 2008

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана на кафедрі хімічної техніки та промислової екології Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут» Міністерства освіти і науки України, м. Харків

Науковий керівник:

доктор технічних наук, професор
Шапорев Валерій Павлович
НТУ«ХПІ» – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», завідувач кафедрою хімічної техніки та промислової екології

Офіційні опоненти:

доктор технічних наук, професор
Семенишин Євген Михайлович
Національний університет «Львівська політехніка» Міністерства освіти і науки України, професор кафедри хімічної інженерії

кандидат технічних наук, доцент
Посторонко Анатолій Іванович
Українська інженерно-педагогічна академія Міністерства освіти і науки України, м. Слов'янськ, завідувач кафедрою хімічної технології неорганічних речовин

Захист відбудеться «5» червня 2008 року о 10 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.050.05 у Національному технічному університеті «Харківський політехнічний інститут» за адресою: 61002, м. Харків, вул. Фрунзе, 21.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»

Автореферат розісланий 5.06.2008 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради

В.К. Тимченко

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Багато сучасних хімічних і суміжних виробництв в технологічних процесах використовують вапняк і його продукти випалювання – вапно. Наприклад, виробництво кальцинованої соди, будівельних матеріалів та інші. В багатьох виробничих процесах вищезначені реагенти проходять технологічний цикл і виділяються у виді відходів – дисперсні шлами або пил. Вищезначені відходи нагромаджуються в шламонакоплювачах, териконах та інших місцях. Останні займають сотні гектарів орних земель, а, крім того, є екологічно небезпечними об'єктами. В даний час у всесвітній практиці поставлена задача організації рециклінгу вапняних відходів з їх утилізацією і промисловою переробкою. Реалізація цієї задачі забезпечить зниження витрат початкової сировини, збільшить конкурентну спроможність виробництв, забезпечить суттєве підвищення рівня санітарно-епідеміологічного стану довкілля. Враховуючи специфіку властивостей вапнякових відходів, основним технологічним процесом, що покладений в основу рециклінгу, є сушіння і випалювання відходів у обертових печах.

В відомих публікаціях щодо процесу випалювання дисперсних вапнякових відходів відсутні: системний аналіз процесу, недостатньо коректно розглянуті питання руху матеріалу в печі, умови тепло- масопереносу, а також відсутні дослідження щодо динаміки процесу випалювання і його математичного опису. Визначення цих питань дає можливість науково обґрунтовано підійти щодо параметрів процесу випалювання і на основі математичного опису процесу забезпечити удосконалення конструкції печі, підвищити продуктивність обладнання і якість продукту випалювання, а також зменшити енергоємність процесу. Тому дослідження процесу випалювання дисперсних вапнякових відходів є актуальними і мають суттєве економічне і народногосподарське значення, що визначило напрям дисертаційного дослідження.

Зв'язок дисертації з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота виконана на кафедрі хімічної техніки та промислової екології НТУ «ХП» відповідно до напрямку наукових досліджень кафедри:– «Розробка концепцій і нових технологій рекультивации полігонів і переробки промислових і побутових відходів». Здобувач брав участь у виконанні госпдоговору «Технічні заходи, напрямки на зниження собівартості 1 т соди кальцинованої» (ВАТ «Кримський содовий завод»), та договору про науково-технічне співробітництво з фірмою «Karzonn engineering Contracting» (Республіка Ліван).

Мета і задачі дослідження. *Метою роботи* є дослідження гідродинаміки руху матеріалу в печі і динаміки тепло- масообмінних процесів при випалюванні дисперсних вапнякових відходів, створення математичної моделі цих процесів, їх експериментальне підтвердження і удосконалення конструкції печі. Для досягнення поставленої мети необхідно було вирішити такі *задачі*:

– провести моделювання процесу змішування дисперсного матеріалу в перерізі обертового барабану, встановити зв'язок між кінетичними

параметрами, які характеризують модель змішування і руху матеріалу уздовж печі;

- обґрунтувати і розробити фізичну і математичну модель процесів, що протікають у обертовій печі, вибрати алгоритм розрахунку процесу відповідно з розробленою моделлю;

- провести аналіз процесів випалювання дисперсних відходів за допомогою математичної моделі, з'ясувати раціональні режими і довести адекватність цих режимів;

- обґрунтувати зміни конструкції печі і апаратурно-технологічної схеми процесу рециклінгу вапнякових відходів;

- напрацювати дослідні партії продуктів випалювання і виявити відповідність їх вимогам до таких продуктів.

Об'єкт дослідження – процес термічної дисоціації дисперсних вапнякових відходів у обертовій печі.

Предмет дослідження – одиночна частка, шар дисперсного матеріалу і рух шару по печі, фізичні і математичні моделі процесу термічної дисоціації рухомого матеріалу, кінетика і динаміка процесу випалювання.

Методи дослідження. В роботі використані методи фізичного і математичного моделювання процесу термічної дисоціації дисперсного матеріалу у обертовій печі. Для визначення структури шару матеріалу і визначення моделі його руху використаний метод трасера. Дослідження тепломасообміну проводили з використанням методу теплофізичного моделювання. Обробку експериментальних даних проводили за допомогою комп'ютерної техніки і відповідних програм. Для рішення системи диференціальних рівнянь моделі використовували метод, заснований на ідеї ітераційного пошуку в функціональному просторі.

Наукова новизна отриманих результатів:

- запропоновано математичну модель, яка описує характер змішування і руху випалюваного дисперсного матеріалу вздовж печі з одночасною агломерацією часток матеріалу і його гранулювання;

- встановлено, що критерієм якості змішування матеріалу є коефіцієнт неоднорідності рухомого шару, а в якості критерію ефективності процесу гранулювання – функція розподілу гранул по розміру і часу перебування в печі; доведено, що характер руху матеріалу в печі суттєво впливає на умови тепло- і масопереносу;

- розроблено математичну модель процесів сушіння, термічного розкладу дисперсного матеріалу і спікання продуктів розкладу, яка адекватно описує всі стадії процесу;

- на основі аналізу математичної моделі виконано класифікацію параметрів процесу випалювання в обертовій печі на збурюванні і керовані параметри, в результаті визначені раціональні режими процесу випалювання дисперсних вапнякових відходів у обертовій печі; запропоновані конструктивні зміни в печі і апаратурно-технологічній схемі;

– реалізація процесу в реконструйованій печі з використанням раціональних параметрів вперше в обертових пічах дозволило провести рівномірне випалювання вапнякових відходів і досягти ступеня перетворення в цільовий продукт 99,8%, досягти в продукті відсоткового змісту $\text{CaO}_{\text{общ}}$ – 97–98%, а $\text{CaO}_{\text{св (активне)}}$ – 94–95%. При цьому зменшити витрати природного газу на випалювання в 1,3 рази, зменшити пилонос в 3 рази і досягти теплового ККД печі до 25%;

– виконані дослідження процесу сушіння шламу сатурації цукрового виробництва в апараті з зустрічними струменями і горизонтальному роторно-плівковому апараті встановлені параметри процесу сушіння, напрацьовані дослідні партії продуктів, які відповідають вимогам до продукту «меліорант-добриво».

Практичне значення одержаних результатів. Одержані в роботі наукові результати мають практичне значення для розробки процесів рециклінгу вапнякових відходів в хімічній, металургійній та переробній промисловості.

1. Здобуті аналітичні залежності, що представляють математичну модель процесу випалювання, дали можливість виконувати прогнозовані розрахунки раціональних технологічних режимів процесу випалювання і, відповідно, довести економічну доцільність процесу рециклінгу вапнякових відходів.

2. Проведено удосконалення конструкції печі і апаратурно-технологічної схеми процесу, які забезпечують реалізацію раціональних режимів роботи і управління ними.

3. Практична реалізація здобутих результатів досліджень полягає в напрацюванні дослідних партій продуктів, що відповідають світовим стандартам, та передачі результатів досліджень Державному науково-дослідному і проектному інституту основної хімії «НІОХІМ» (м. Харків), а також фірмі «Karzonn engineering Contracting» (Республіка Ліван) для впровадження у хімічної промисловості.

Особистий внесок здобувача полягає в самостійному проведенні аналізу стану питання, участі в розробці методик і проведенні досліджень, математичному моделюванні процесів термічної дисоціації дисперсних вапнякових відходів й обробці експериментальних даних.

Апробація результатів дисертації. Загальні положення дисертації і її результати доповідались і обговорювались на: Міжнародній конференції «Молодь у вирішенні регіональних та транскордонних проблем екологічної безпеки. Перспективи формування пан'європейської екологічної мережі», (м. Чернівці, 2004 р.); Міжнародній науково-практичній конференції «Інтелектуальні системи прийняття рішень та інформаційні технології», секція математичне моделювання, (м. Чернівці, 2004 р.); Міжнародній науково-практичній конференції «Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я», (м. Харків, 2004, 2005 р.); Міжнародній науково-практичній конференції «Інтегровані технології і енергозбереження – ІТЕ–2006», (Крим, м. Маяк, 2006 р.); Науково-технічних семінарах викладачів, співробітників, аспірантів і студентів на кафедрі хімічної техніки та промислової екології НТУ«ХП» (2003, 2004, 2005, 2006 р.р.).

Публікації. По темі дисертації опубліковано 7 статей, в тому числі 5 статей у фахових виданнях ВАК України і 1 деклараційний патент України.

Структура і обсяг роботи. Дисертаційна робота складається зі вступу, 5 розділів, висновків та додатків. Повний обсяг дисертації складає 132 сторінки, з яких 20 ілюстрацій по тексту, 13 таблиць по тексту, список використаних джерел літератури з 127 найменувань на 12 сторінках, додатки на 3 сторінках.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовано актуальність роботи, сформульовано основну мету та завдання для її досягнення, відображено наукову новизну і практичну цінність.

Розділ 1 присвячено розгляданню відомих даних щодо характеристики процесу і конструкцій печей для випалювання вапнякових відходів, проведено аналіз існуючих даних щодо теоретичних основ процесу. Розглянуто відому на даний час інформацію щодо рециклінгу вапнякових відходів. На основі здобутої інформації та аналізу сформульовано цілі та задачі досліджень.

Розділ 2 «Об'єкти, предмети, методи досліджень і установки». Розглянуто характеристики вапнякових відходів і методів їх підготовки до процесу випалювання, їх хімічний склад. Наведено опис експериментальних установок для дослідження процесу випалювання вапнякових відходів у обертовій печі, а також опис апаратів для сушіння відходів: апарат з зустрічними струменями і горизонтальний роторно-плівковий апарат. В розділі наведені методи вимірювання і контролю за основними параметрами досліджуваних процесів, устаткування для пило-, газоочищення, методи фізико-хімічних досліджень сировини, напівпродуктів і продуктів процесу. Наведені методи моделювання процесів, що вивчаються, і методи обробки й аналізу експериментальних досліджень. Всі використані методи досліджень і експериментальні установки відповідають сучасним вимогам щодо дослідження таких процесів. Крім того, процеси випалювання і сушіння вапнякових відходів досліджуються на вищезначених установках, які є напівпромисловими. Останнє дозволяє стверджувати про достовірність і надійність здобутих результатів.

Розділ 3 «Реальне моделювання роботи обертової промислової печі». Наведені дані щодо моделювання процесу змішування і руху дисперсного матеріалу в перетині обертового барабану, моделювання процесів сушіння, термічного розкладу і спікання в обертовій печі, а також модель сушіння в рухомому шарі матеріалу.

При моделюванні розглянуто спочатку якісну сторону процесу змішування. Доведено, що змішування матеріалу в перетині обертового барабана проходить за рахунок переміщення часток у радіальному і кутовому напрямках. Переміщення у радіальному напрямку проходить за рахунок того, що товщина шару, що згортається, менше товщини шару, що підіймається. За рахунок цього між прошарками спостерігається переміщення часток, тобто змішування.

При розробці моделі було покладено, що шари, які підіймаються і згортаються, складаються з (n) підшарів рівної об'ємної продуктивності.

Після (m) переходів часток стала система описується вектором $E(m)$

$$\begin{aligned} E(1) &= E(0)P_1; \\ E(2) &= E(1)P_2; \\ &\dots \dots \dots ; \\ E(m) &= E(m-1)P_m, \end{aligned} \quad (1)$$

де P_m – матриця перехідних ймовірностей, що відповідають m -му переходу; $E(0)$ – вектор початкового стану системи, координати якого відповідають ймовірностям знаходження трасера (при $m = 0$) відповідно в 1-му, 2-му і т. п. елементарних об'ємах.

Аналіз цієї моделі дозволив визначити критерій якості змішування – коефіцієнт неоднорідності системи, який розраховується по рівнянню

$$\hat{V}(\tau) = \frac{k \cdot 100}{\sum_{i=1}^k C_i(\tau)} \sqrt{\frac{1}{k-1} \sum_{i=1}^k \left[C_i(\tau) - \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k C_i(\tau) \right]^2}, \quad (2)$$

де $C_i(\tau)$ – концентрація трасера в i -му елементарному об'ємі в момент часу τ ; k – кількість елементарних об'ємів.

В роботі виконана експериментальна перевірка моделі на лабораторному обертовому барабані, а також теоретичні розрахунки $\hat{V}(\tau)$ на ЕОМ.

На рис. 1 наведені експериментальні дані і результати розрахунків.

Рис. 1. Змінення коефіцієнта неоднорідності суміші за часом

1 – частинки відрізняються по кольору; 2 – частинки відрізняються по густині.

Суцільні криві – розрахунок, крапки – експеримент.

З даних, наведених на рис. 1 видно, що запропонована модель досить адекватно описує процес змішування в обертовій печі. Крім того, очевидно, що вже на перших метрах обертової печі за час 5–8 хв. коефіцієнт неоднорідності (\hat{V}) прямує до мінімального значення. Тому було прийнято, що модель змішування матеріалу у перетині обертового барабану близька до моделі ідеального змішування. Далі в розділі була проведена оцінка можливості гранулювання матеріалу при його русі вздовж апарату. Для оцінки була використана детерміновано-стохастична модель грануляції дисперсних матеріалів, яка розроблена колективом авторів М.І. Мамедовим, Г.І. Кербалієвим та іншими. Відповідно моделі, якщо на початку руху проходить повне змішування, далі частки рухаються по спіральної траєкторії вздовж барабану і в результаті окатування проходить грануляція часток. Згідно моделі її адекватність визначається ступенем приближення теоретичних і експериментальних функцій розподілу по розмірам гранул. Останнє представлено наступним рівнянням

$$Q = \int_0^{\tau_M} [P(a, \tau) - P_{\text{Э}}(\dot{a}, \tau)]^2 d\tau, \quad (3)$$

де P – теоретичні криві розподілу; $P_{\text{Э}}$ – експериментальні криві розподілу по розмірам (a); τ_M – час відбору проби.

На рис. 2 представлені функції розподілу гранул по розмірам на різній довжині вздовж барабану.

Рис. 2. Функції розподілу по розмірам вздовж барабану

$a, б, в, г, д$ – відповідно довжина 1, 2, 4, 6, 8 м.

Суцільні криві – теорія, крапки – експеримент.

Ці криві здобуті для початкового розміру часток $a_0 = 0,0015$ м, пунктиром на рис. 2 визначений інтервал середніх розмірів. Таким чином, при русі матеріалу вздовж барабану проходить процес його грануляції до серединного розміру гранул 0,002–0,004 м. На основі цих досліджень було прийнято, що в якості моделі руху матеріалу в обертовій печі – комбінована модель повного змішування-витиснення.

Як вже відмічалось попередньо, в якості моделі потоку матеріалу в обертовій печі можна прийняти модель змішування-витиснення. Виходячи з цього, для такого потоку для елементарного об'єму шару рухомого матеріалу, з урахуванням потоків газів (теплоносія), який має модель потоку – витиснення, були розглянуті матеріальні і теплові баланси, а також кінетичні моделі процесів: горіння палива, сушіння, термічний розклад, спікання продукту. Вищезначені баланси складались для випадків, коли теплоносій і матеріал рухаються в одному напрямку, а також коли матеріал і теплоносій рухаються назустріч один іншому. За своєю суттю матеріальні і теплові баланси не відрізняються для обертових печей, в яких паливом є природний газ, що наведені в роботах М.Ш. Ісламова. Новим підходом є те, що при розрахунку балансів враховується модель руху матеріалу, а також кінетичні моделі, які теж враховують моделі потоків. Останнє враховувалось при розрахунку перетину рухомого шару і елементарного об'єму (або маси) матеріалу в цьому перетині. Відповідно було здобуто рівняння для маси матеріалу, що знаходиться в печі, і перетину рухомого шару:

$$M = 0,798 n_0 d_n \cdot \left(\frac{\alpha}{\beta} \right)^{-0,85}; \quad (4)$$

$$S_M = \frac{1}{4} \varphi d_n^2, \quad (5)$$

де n_0 – частота обертів барабану печі, об/с; d_n – внутрішній діаметр печі, м; α – кут нахилу печі до горизонту; β – коефіцієнт ковзання матеріалу; φ – кут, що характеризує сектор рухомого матеріалу.

Час перебування матеріалу в той чи іншій зоні печі визначався за залежністю

$$\tau = \frac{2,66L}{n_0 d_n \left(\frac{\alpha}{\beta} \right)^{0,85}}, \quad (6)$$

де L – довжина зони, м.

В першій зоні печі – зоні сушіння матеріалу, – згідно класичних уявлень, процес протікає у дві стадії. В першому періоді кількість утворення сухої маси на елементарній дільниці в одиницю часу визначається рівнянням:

$$K_{Mi}^1 = \Delta l S_M \frac{du_1}{d\tau} M_i, \quad (7)$$

а у другому:

$$K_{Mi}^2 = \Delta l S_M \frac{du_2}{d\tau} M_i,$$

тут $du_1/d\tau$ і $du_2/d\tau$ – швидкість сушіння на кожному етапі.

В зоні термічного розкладу дисперсного вапняку з урахуванням, що проходить грануляція матеріалу, було прийнято кінетичне рівняння:

$$\frac{dG_M}{d\tau} = K_0 \left(1 - \frac{G_{M(i+1)}}{G_{Mi}} \right)^{2/3}; \quad \frac{dx_A}{d\tau} = K_0 (1 - x_A)^{2/3}, \quad (8)$$

де G_M , $G_{M(i+1)}$, G_{Mi} – відповідно масова кількість утворюваного продукту в перетині i , $i+1$, або відповідних елементарних об'ємах за одиницю часу; x_A – ступень перетворення.

Коефіцієнт K_0 враховує тепловий ефект реакції ΔH , товщину шару рухомого матеріалу n_i , розмір частинок (гранул) a , коефіцієнт тепловіддачі від газової фази до матеріалу α_T :

$$K_0 = \frac{M_i B}{G_{Mi} \Delta H}; \quad B = \pi a^2 n_i \alpha_T (T_0 - T), \quad (9)$$

де T_0 – температура, при якій починається процес дисоціації. T_0 розраховується по рівнянню

$$T_0 = \frac{A_1}{\vartheta - \lg k}, \quad (10)$$

де (A_1) і (ϑ) – кут нахилу прямої в координатах T – τ , або T – L , аналог швидкості нагріву; k – константа швидкості процесу, яка враховує співвідношення констант швидкості хімічної реакції – k_x і константи дифузії – D :

$$k = k_0 \exp\left(-\frac{E_{x,T}}{RT}\right); \quad E_{x,T} = \frac{k_x a_0 x_A E_D - D E_x}{k_x a_0 x_A + D}, \quad (11)$$

тут a_0 – початковий розмір гранул; E_X і E_D – відповідно енергії активації хімічного процесу і дифузії.

Відповідно кількість утвореного компонента в зоні термічної дисоціації буде

$$K_{M_i} = \Delta S_M \frac{dx_A}{d\tau} M_i. \quad (12)$$

В зоні спікання матеріалу було прийнято, що хімічних і фазових перетворень не проходить, в зоні протікають два процеси: квазів'язка течія в кристалах продукту під впливом дефектів і їх анігіляція. Для опису цих процесів були визначені рівняння:

$$\frac{dZ}{d\tau} = -\chi N \exp\left(-\frac{E_z}{RT}\right) Z; \quad (13)$$

$$\frac{dN}{d\tau} = -\nu \exp\left(-\frac{E_v}{RT}\right) N^2,$$

де Z – параметр в процесі стягування пор, змінюється від 0 до 1; N – кількість дефектів; ν , χ – предекспоненційні множини; E_z , E_v – відповідно енергії активації.

Для опису кінетики згоряння палива було використане рівняння, яке описує ступень вигорання палива по довжині печі

$$\frac{dX}{dl} = -2m \exp[-m(L-l)^2] (L-l), \quad (14)$$

де X – ступень вигорання палива; L – довжина печі; l – довжина, де розглядається елементарний об'єм; m – емпіричний коефіцієнт.

З урахуванням рівнянь (5–14) були складені матеріальні і теплові баланси по кожному компоненту твердої і газової фази. Повна математична модель з урахуванням граничних умов складалась з системи із 43 диференціальних рівнянь. Ці рівняння описують розподіл температур, концентрацій компонентів в кожній фазі по довжині печі, витрат останніх. При цьому математичний опис враховує розмір часток матеріалу, характер їх руху вздовж печі і вплив цих факторів на умови теплопередачі і кінетику процесу.

На основі здобутої математичної моделі процесу термічної дисоціації дисперсних вапнякових відходів проведено дослідження режиму переробки вапнякового шламу в обертовій печі довжиною $L = 12$ м і внутрішнім діаметром – 1,2 м. Середній час перебування матеріалу в печі склав 2,5 години, лінійна швидкість матеріалу в печі – 4,8 м/год. Вапняковий шлам мав наступні показники: $\text{CaCO}_3=96,08\%$, вологість 20...36%. Температура T_0 , при якій починався процес дисоціації, складала 750°C .

Дослідження проводили аналізом рівнянь моделі обертової печі і їх рішення методом ітераційного пошуку у функціональному просторі. Попередня

оцінка визначила, що управляючими діями, які необхідно було досліджувати, є витрати палива G_T , швидкість обертання печі n_0 . збурювальними діями, які необхідно розглядати, є витрати матеріалу G_T , його вологість \bar{w} . За показник якості матеріалу на виході з печі прийняті концентрації CaO і CO_2 . При аналізі враховували можливість подачі і згоряння палива в довгопламенній горілці (Б) і в комбінації горілок довго- і короткопламенних (А, Б).

На рис. 3 представлені зміни якісних показників процесу – температури матеріалу і газу по довжині печі.

Рис. 3. Розподіл температур газу T_G , матеріалу T_M і концентрації цільового продукту C_{CaO} по довжині печі
Суцільні лінії – сопло Б, пунктирні – сопло А, Б.

Як свідчить рис. 3, вплив довжини факелу, температура якого збільшується в напрямку горіння, і повітря, що подаються на горіння, є головною причиною, яка пояснює екстремальний характер змін параметрів, що досліджуються. Очевидно, що комбінація горілок для спалювання газу при сумарній витраті газу на дві горілки в 1,3 рази менше, ніж для довгопламенної, і дозволяє зменшити час сушіння і термічного випалювання, тобто інтенсифікувати процеси. При цьому швидкість газу в вільному перетині обертової печі складає 2,04 м/с, що майже в 3 рази менше швидкості уносу гранул (з урахуванням парусності – 6,8 м/с).

Це свідчить про те, що пилонос повинен зменшитись майже в 2 рази в порівнянні з довгопламенною горілкою. При цьому розрахунки довели, що корисно затрачене тепло при довгопламенному спалюванні газу складає ~ 15,31% від загальних витрат, а при комбінованому спалюванні ~ 28,3%. Це, можливо, пов'язано зі зменшенням втрат з газами, що відходять, за рахунок переміщення зон сушіння і випалювання ближче до гарячої зони печі.

На рис. 4 представлені зміни якісних показників процесу в залежності від управляючих діянь, що збурюють.

Рис. 4. Залежність якісних показників від витрат палива G_T (А), швидкості обертів печі (В) та фракційного складу матеріалу

- 1 – G_T – розмір часток $a = 30\text{--}60$ мкм, вологість 33%; 2 – шлам механічно гранульований, $a=10$ мм, вологість 28%; 3 – шлам з добавкою 3% $\text{CaO}_{\text{св}}$, $a=10\text{--}15$ мм, вологість 18%;
4, 5, 6 – $\tilde{N}_{\tilde{N}_2}$ відповідно 1, 2, 3.

Дані, наведені на рис. 4, свідчать, що G_T можна вважати ефективним управляючим діянням, причому з ростом витрат палива збільшуються концентрації S_{CaOM} і $\tilde{N}_{\tilde{N}_2, \tilde{A}}$. Не менш ефективним управляючим діянням є фізико-хімічні властивості G_M , що подається в піч, особливо фракційний склад. Очевидно, що при розмірі часток $a=40\text{--}60$ мкм і вологості – 33% процес протікає менш інтенсивно, і для досягнення ступеня розкладу $\text{CaCO}_3 \sim 98\%$ необхідні витрати палива становлять $0,005\text{--}0,006$ кг/с. Гранульований шлам дисоціює інтенсивно за рахунок покращання умов теплообміну, і для досягнення тих же показників по ступеню випалювання необхідно палива в $1,3\text{--}1,4$ рази менше. Ще більш інтенсивно протікає процес при введенні в сировину каталізатора – продукту реакції. Продукт реакції при введенні в шлам гідратується до $\text{Ca}(\text{OH})_2$, при $400\text{--}450^\circ\text{C}$ він знову розкладається і утворює реакційну поверхню розділу $\text{CaCO}_3 - \text{CaO}$, що знижує енергію активації ($E_{X,T}$) і інтенсифікує процес. Аналіз також свідчить, що витрати матеріалу G_{MT} і його вологість \bar{w} є безперечними збуджуючими діяннями, які дуже впливають на концентрації продуктів. Тому необхідно шукати оптимальні співвідношення між цими діяннями. Визначено, що швидкість обертів печі n_0 не є ефективним управляючим діянням і повинна бути стабільною на мінімальному рівні, при якому не змінюються якісні показники процесу (для умов, що розглядаються, $n_0 = 0,04\text{--}0,05$ об/с).

Проведений аналіз довів, що в якості управляючих діянь необхідно обирати витрати палива G_T , фракційний склад сировини G_{MT} і можливість введення каталізатора в шихту. На основі цього були визначені раціональні параметри процесу випалювання вапнякового шламу, а також запропоновані конструктивні зміни в печі і апаратурно-технологічній схемі.

Розділ 4 «Дослідження процесу випалювання вапнякового шламу в дослідно-промисловій печі».

Дослідно-промислова установка наведена на рис. 5.

Рис. 5. Технологічна схема установки

- 1, 2 – бункера шламу і продукту CaO ; 3 – течки; 4 – конвеєр гвинтовий; 5 – обертова піч; 6 – топка печі; 7 – горілки; 8 – вентилятор дуттьовий; 9 – холодильник барабанного типу; 10 – пилоуловлювач; 11 – труба Вентурі; 12 – завихрювач; 13 – проміжна ємкість; 14 – димосос; 15 – перфорований барабан, жорстко закріплений з корпусом печі.

Згідно схеми удосконаленнями є установка двох горілок для спалювання газу (поз. 7, типу ГНП-7 з коротко факельними і довго факельним соплом) в печі; установка в печі вузла (15) – шпательний перфорований барабан для інтенсифікації сушіння і гранулювання вапнякового шламу, а також зменшення температури газів, що відходять; бункер (2) для введення каталізатора в вапняковий шлам і течка (3) для утилізації пилоуносу, який уловлюється на стадії сухої очистки (10). При дослідженнях витрати вапнякового шламу G_{MT} були в інтервалі від 500 до 2000 кг/год. Аналізувалися дані щодо хімічного, фракційного складу продуктів, величин пилоуносу, складався і аналізувався матеріальний і тепловий баланси вироблення 1 т натурального продукту, аналізувалися температурні і гідродинамічні режими.

В розділі доведено, що внесені вдосконалення в конструкцію печі і апаратурну схему процесу при зменшених витратах палива на вироблення одиниці продукції в 1,3 рази дозволяють вперше провести процес випалювання, результатом якого є ступень перетворення CaCO_3 в CaO – 99,8%, при цьому в продукті досягнута концентрація $\text{CaO}_{\text{св (активна)}}$ – 94...95%, а $\text{CaO}_{\text{общ}}$ – 97...98%. При максимальній продуктивності пилоунос не перевищував 8–9%, що в 2...3 рази менше, ніж відомо з літературних джерел і практики. Теплове ККД печі досягнуто – 27%, що теж більше у 1,5...1,8 рази, ніж відомі дані для такого процесу. Були вироблені дослідні партії продуктів, які по своїм показникам якості перевищували світові вимоги для таких продуктів. Дослідні партії у замовників здобули позитивні відклики.

Таким чином, у четвертому розділі було доведено, що раціональні режими процесу випалювання вапнякового шламу і конструктивні зміни в печі і схемі процесу, які були запропоновані в результаті аналізу створеної математичної моделі процесу випалювання вапнякового шламу в обертовій печі, є дійсними і підтверджують адекватність моделі. Крім цього, запропоновані рішення дозволяють інтенсифікувати процес, зменшити енергозатрати і витрати сировини на вироблення одиниці продукції.

Розділ 5 «Вироблення дослідних партій меліоранта-добрива при сушінні шламу сатурації». В розділі наведений склад шламу сатурації і його властивості, доведено, якщо його висушити до вологості 0,5% при температурах 140–160°C, то здобутий продукт по змісту органіки, а також азоту, фосфору, калію і сахарози не поступається навозу. Крім того, в шламі при цих умовах сушіння вапняк (CaCO_3) має практично рентгеноаморфну структуру, що забезпечує ефективність його використання в якості меліоранту. Таким чином, якщо провести «м'який» процес сушіння, то буде здобуте органомінеральне добриво – «меліорант-добриво».

Далі в розділі наведені результати експериментальних досліджень процесу сушіння шламу в сушарках з зустрічними струменями і в горизонтальному роторно-плівковому апараті.

Були визначені параметри процесу сушіння в цих сушарках, які дозволяли виробляти «меліорант-добриво» відповідно відомих вимог до цього продукту. В результаті були напрацьовані дослідні партії «меліоранта-добрива», які знайшли позитивний відклик від замовників. По результатам цих

досліджень був здобутий деклараційний патент на використання продукту сушіння.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

В роботі наведено перспективні рішення науково-практичної задачі переробки вапнякових шламів хімічної та переробної промисловості на органо-мінеральні добрива. Зроблено висновок про можливість удосконалення процесу випалювання вапнякових шламів.

1. Встановлено, що визначаючим процесом, покладеним в рециклінг вапнякових відходів, є процес сушіння і випалювання в обертових печах з контактом теплоносія і матеріалу. Але для цього процесу не досліджені моделі руху матеріалу в печі, умови тепло- і масообміну, відсутня модель термічного розкладу матеріалу в обертовій печі, а також не визначено зв'язок між тепловими режимами і якістю продукту. Ці недоліки не дозволяють розробити ефективний процес рециклінгу.

2. В роботі вперше запропонована математична модель, яка адекватно описує характер змішування і руху дисперсних вапнякових відходів вздовж печі з одночасною грануляцією часток матеріалу. Визначені критерії якості цього процесу: коефіцієнт неоднорідності рухомого шару і функція розподілу гранул за розміром і часом перебування в печі. Доведено вплив моделі руху матеріалу в печі на умови тепло- і масопереносу.

3. Вперше розроблена математична модель сушіння, термічного розкладу і спікання матеріалу в обертовій печі з урахуванням моделі руху матеріалу, умов горіння палива і кінетичних закономірностей процесу дисоціації CaCO_3 ; вибрано алгоритм розрахунку процесу по рівнянням моделі.

4. При аналізі моделі процесу в обертовій печі було встановлено, що небезпечними збуджуючими діями на процес в цілому є витрати сировини, та її вологість, а в якості управляючих діянь – витрати палива, фракційний склад сировини і каталітичне прискорення процесу. Виконана оцінка впливу кожного з діянь і визначені раціональні режими процесу і конструктивні зміни в печі, які забезпечують реалізацію режимів.

5. Проведені дослідно-промислові випробування процесу випалювання вапнякових шламів у реконструйованій обертовій печі з використанням раціональних режимів, доведена адекватність технічних рішень і напрацьовані дослідні партії продуктів випалювання, які відповідають вимогам до них.

6. Впровадження в виробництво результатів дисертаційної роботи по процесу випалювання вапнякових шламів порівняно з відомими даними дозволяє підвищити тепловий ККД печі з 15 до 27%, зменшити витрати природного газу на випалювання одиниці відходів в 1,3 рази, зменшити пилоунос з 30 до 8...9%. Вперше у обертовій печі промислового типу вдалось провести рівномірне випалювання матеріалу, яке забезпечує ступінь перетворення CaCO_3 в CaO – 99,8%, при цьому в продукті досягти $\text{CaO}_{\text{общ}}$ – 97...98%, $\text{CaO}_{\text{св (активна)}}$ – 94...95% і питому поверхню продукту по BET – 45–50 $\text{m}^2/\text{г}$.

7. Досліджені процеси сушіння шламу сатурації з метою вироблення продукту, що відповідає властивостям органо-мінерального добрива. На різних

сушарках встановлені режими, які дозволяють виробляти продукт такої якості. Напрацьовані дослідні партії, які відповідають вимогам замовника.

8. Результати досліджень впроваджені на фірмі «Karzonn engineering Contracting», (Республіка Ліван), а також прийняті до впровадження при проектуванні обертових печей Державним науково-дослідним і проектним інститутом основної хімії «НІОХІМ», (м. Харків).

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Шапоров В.П., Лопухина О.А., Жабер М.А., Кансо В.А., Шапоров П.В. Проблемы, возникающие при обращении с твердыми бытовыми отходами и возможные пути их решения //Інтегровані технології та енергозбереження.– Харків: НТУ«ХПІ», 2005. – №1. – С. 3–9.

Здобувачем зроблено вибір і аналіз літературних джерел, обґрунтовані деякі висновки.

2. Шапоров В.П., Жабер М.А., Кансо В.А., Шапоров П.В. Методы , технологии и концепции утилизации твердых бытовых отходов и осадков сточных вод, образуемых при биологической очистке //Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут».– Харків: НТУ«ХПІ», 2005. – №4. – С. 3–30.

Здобувачем на основі аналізу літературних джерел, обґрунтовані перспективні напрямки утилізації твердих будівельних відходів.

3. Кансо В.А., Райко В.Ф., Шапоров В.П. Математическое моделирование процесса обжига во вращающихся печах //Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут».– Харків: НТУ«ХПІ», 2006. – №10. – С. 118–133.

Здобувачем розроблена математична модель процесу випалювання вапнякових шлаків в обертових печах з урахуванням моделей руху матеріалу та його гранулювання.

4. Кансо В.А., Лопухина О.А., Шапоров В.П., Шапоров П.В. Промышленные кальцийсодержащие твердые отходы, перспективы переработки //Східно-Європейський журнал передових технологій. – Харків: Технологічний центр, 2006. – №1/2(19). – С. 156–163.

Здобувач провів дослідження зразків відходів на дериватографі й проаналізував результати досліджень.

5. Райко В.Ф., Кансо В.А., Шапоров В.П. Теплообмен между стенкой и дисперсной системой «газ-твердое» в процессе сушки //Інтегровані технології та енергозбереження.– Харків: НТУ«ХПІ», 2006. – №1. – С. 71–83.

Здобувач виконав експериментальні дослідження процесу і виконав обробку результатів дослідження.

6. Харченко А.М., Тенденко С.А., Жабер М.А., Кансо В.А., Шапоров В.П. Способы, состав для хранения сельскохозяйственной продукции //Тези доп. Третьої Міжнародної наукової конференції «Молодь у вирішенні регіональних та транскордонних проблем екологічної безпеки. Перспективи формування пан'європейської Екологічної мережі». – Чернівці: Зелена Буковина, 2004. – С. 312-314.

Здобувачем запропоновано висушені вапнякові дисперсні відходи використовувати як антисептик при збереженні сільгосппродукції.

7. Деклараційний патент України 69320 А, А01F25/00 «Спосіб збереження сільськогосподарської продукції», авт. Тенденко С.О., Шапоров В.П., Жабер М.А., Кансо В.А. Заявл. НТУ«ХПІ» 25.12.2003; Опубл. 16.08.2004. Бюл. №8.

Авторами запропоновано висушені вапнякові дисперсні відходи використовувати як препарат для обробки коренеплодів при закладці їх на збереження.

АНОТАЦІЇ

Кансо В.А. Моделювання і інтенсифікація процесів термічного розкладу дисперсного вапняку у обертових пічах. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.17.08 – Процеси й обладнання хімічної технології. – Державний вищий навчальний заклад Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків, 2008 р.

Дисертацію присвячено моделюванню і інтенсифікації процесів термічного розкладу і сушіння дисперсного вапняку у обертових пічах. Доведено, що цей процес може бути покладений в основу рециклінгу дисперсних вапнякових шламів – відходів багатьох виробництв хімічної промисловості, будівельних матеріалів, цукрової промисловості та інших. Встановлено, що із-за відсутності наукових знань щодо моделей руху матеріалу в обертовій печі, математичного опису процесів, що протікають в печі, та інших чинників неможливо ефективно організувати процеси рециклінгу вапнякових відходів. В роботі були поставлені задачі дослідження, основною метою яких було створення адекватної математичної моделі процесів, що протікають у обертовій печі, з урахуванням моделей руху матеріалу в ній і його гранулювання. Відповідно задач дослідження розглянуті і обґрунтовані методи і методики досліджень, а також експериментальні установки. В результаті проведених досліджень була побудована нова математична модель процесу випалювання вапнякового шламу у обертовій печі, або по класифікації Ісламова – знакова модель. Ця модель базується на рівняннях матеріальних і теплових балансів і розглядає процес в єдиній хіміко-технічній пічній системі «матеріал-осередок-футеровка». Модель враховує особливості руху матеріалу вздовж печі і можливість його гранулювання, а також умови тепло- і масопередачі в залежності від моделей руху матеріалу, кінетику термічного розкладу вапняку і кінетику й особливості горіння газоподібного палива. Для конкретного випадку визначені граничні умови і метод рішення рівнянь моделі, який заснований на методі ітераційного пошуку у функціональному просторі. Аналіз і рішення рівнянь моделі дозволив визначити раціональні режими процесу випалювання вапнякових шламів, реалізація яких дозволила суттєво інтенсифікувати процес, зменшити витрати палива в 1,3 рази на виробництво одиниці продукції, зменшити пилоунос в 2,5÷3 рази. Результати роботи впроваджені в будівельній фірмі Лівану і прийняті до використання в проектну частину НІОХІМ, Україна.

Ключові слова: сушіння, термічний розклад, вапнякові відходи, рециклінг, обортова піч, математична модель.

Кансо В.А. Моделирование и интенсификация процессов термического разложения дисперсного карбоната кальция во вращающихся печах. – Рукопись.

Диссертация на соискание научной степени кандидата технических наук по специальности 05.17.08 – Процессы и оборудование химической технологии. – Государственное высшее учебное заведение Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», Харьков, 2008 г.

Диссертация посвящена решению одной из актуальных задач современности – рециклингу твердых кальцийсодержащих отходов. Многие производства химической, перерабатывающей, металлургической и других отраслей промышленности после проведения основных технологических процессов имеют в качестве отходов кальцийсодержащие шламы, которые в основном состоят из CaCO_3 и $\text{Ca}(\text{OH})_2$. Количество этих отходов исчисляется миллионами тонн (например, производство кальцинированной соды). Эти отходы складываются в шламонакопителях, терриконах или других объектах и представляют экологическую опасность. С другой стороны, по мнению многих исследователей, эти отходы являются возобновляемыми источниками сырья и могут быть возвращены в производство. Однако чтобы организовать рециклінг кальцийсодержащих отходов необходимо разработать аппаратурно-технологическую схему и подобрать основное оборудование. Анализ состояния по данному вопросу показал, что наиболее перспективным направлением при реализации рециклинга есть процесс сушки и обжига во вращающихся печах. Однако для того, чтобы процесс рециклинга был эффективен, необходимо усовершенствование конструкции печей обжига и оптимизация процесса с определением рациональных параметров. Эти исследования и являются основой данной диссертации.

В результате исследований была создана математическая модель процесса обжига кальцийсодержащих шламов во вращающейся печи, которую по классификации Исламова можно отнести к «знаковой». Эта модель построена на уравнениях материальных и тепловых балансов и рассматривает процесс как единую химико-термическую печную систему: «материал-среда-футеровка». Модель учитывает особенности перемешивания и перемещения материала в печи и возможность его гранулирования, условия тепло и массопередачи в зависимости от модели движения материала, кинетики и особенности горения газообразного топлива и др. Решение уравнений модели осуществлено методом итерационного поиска в функциональном пространстве. Анализ полученной модели и решение уравнений позволило оптимизировать процесс обжига и выбрать рациональные режимы процесса, а также разработать аппаратурно-технологическую схему рециклинга.

Реализация найденных научных технических результатов позволила, по сравнению с известными подходами, уменьшить в 1,3 раза расход топлива на производство тонны продукта, уменьшить в 1,8–2 раза пылеунос, повысить в

1,5 раза тепловой КПД печи, проводить «мягкий» – равномерный обжиг шламов, что позволяет получать продукты требуемого качества.

Ключевые слова: сушка, термическое разложение, кальцийсодержащие шламы, рециклинг, вращающаяся печь, математическая модель.

Design and intensification of the processes of thermal decomposition of dispersion carbonate of calcium in the revolved stoves. – Manuscript.

Dissertation on the competition of scientific degree of candidate of engineering's sciences on specialty 05.17.08. – are Processes and equipment of chemical technology. – SHEE National technical university the «Kharkov polytechnic institute», Kharkov, 2008.

Dissertation is devoted to design and intensification of the processes of thermal decomposition and drying of dispersion carbonate of calcium in the revolved stoves. It is proved that this process can be fixed in basis of the recycling of the dispersions carbonate slimes of wastes of many productions of chemical industry, building materials sugar industry, and other. It is set that for lack of scientific knowledge about the models of motion of material in the revolved stove, mathematical description of the process, that flows in a stove, and other factors, it is impossible to organize an effective processes of the recycling of carbonates wastes. The tasks researches were extended in this work, the primary purpose of which there was creation of the adequate mathematical model of processes flowing in a stove taking into account the models of motion of material in it and its granulations. The methods, methodology of researches and the experimental devices were considered and grounded. As a result of these researches the new mathematical model of the process of burning of the carbonate slime was built in the revolved stove, – the sign's model on classification by Islamov. This model is based on the equations of material and thermal balances and examines a process in the integrated chemical-technical stove system «material-environment-inwall».

The model takes into account the features of motion of material along a stove and possibility of its granulation here, conditions for heat transmission and mass transfer depending on the models of motions of material, kinetics of thermal decomposition of carbonate and kinetics and features of burning of gaseous fuel. For a concrete case the scopes conditions and the method of decision of equalizations of the model, which is based on the method of iterative search in functional space, are defined. The analysis and decisions of equalizations of the model allowed to define the rational modes of the process of burning of carbonate slime, realization of which allowed substantially to intensify the process, decrease the expense of fuel on unit of production, decrease dust burden. Dissertation results are introduced in the building Lebanon firm and accepted for using in project part of SIGCHEM, Ukraine.

Keywords: drying, thermal decomposition, carbon containing slimes, recycling, revolved stove, mathematical model.