

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
СУМСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ШОСТКИНСЬКИЙ ІНСТИТУТ СУМСЬКОГО ДЕРЖАВНОГО УНІВЕРСИТЕТУ
ШОСТКИНСЬКИЙ ФАХОВИЙ КОЛЕДЖ ІМЕНІ ІВАНА КОЖЕДУБА СУМДУ
Управління освіти Шосткинської міської ради
Виконавчий комітет Шосткинської міської ради

**МАТЕРІАЛИ
ВСЕУКРАЇНСЬКОЇ
НАУКОВО-МЕТОДИЧНОЇ
КОНФЕРЕНЦІЇ**

**25 КВІТНЯ
2024
ШОСТКА**

**ШОСТКИНСЬКИЙ ІНСТИТУТ
СУМСЬКОГО ДЕРЖАВНОГО УНІВЕРСИТЕТУ**

**“ОСВІТА, НАУКА ТА ВИРОБНИЦТВО:
РОЗВИТОК ТА ПЕРСПЕКТИВИ”**

РІДНУ
АЛЬМА - МАТЕР!!!
 $b^x = r \log_2 b$



Міністерство освіти і науки України
Сумський державний університет
Шосткинський інститут Сумського державного університету
Шосткинський фаховий коледж імені Івана Кожедуба
Управління освіти Шосткинської міської ради
Виконавчий комітет Шосткинської міської ради

ОСВІТА, НАУКА ТА ВИРОБНИЦТВО: РОЗВИТОК ТА ПЕРСПЕКТИВИ

МАТЕРІАЛИ ІХ Всеукраїнської науково-методичної конференції (Шостка, 25 квітня 2024 року)



Суми
Сумський державний університет
2024

УДК 372.862

Редакційна колегія:

відповідальний редактор – к.т.н., доцент Р.В. Закусило;
заступник відповідального редактора – к.е.н, в.о. завідувача кафедри
Ю.М. Мануйлович.

члени редакційної колегії:

к.х.н, ст.викладач С.В. Тимофіїв; к.філ.н, доцент Н.Ю. Бондар;
к.пед.н., доцент Ю.М. Мар'їнських; к.е.н, ст.викладач І.В. Новикова;
к.т.н., завідувач кафедри Г.М. Худолей; к.е.н, ст. викладач О.М. Тур
к.е.н, ст.викладач І.В. Вареник;

ОСВІТА, НАУКА ТА ВИРОБНИЦТВО: РОЗВИТОК ТА
ПЕРСПЕКТИВИ: матеріали ІХ Всеукраїнської науково-методичної
конференції, м. Шостка, 25 квітня 2024 року. – Суми : Сумський
державний університет, 2024. – 170 с.

Збірник містить матеріали ІХ Всеукраїнської науково-методичної
конференції «Освіта, наука та виробництво: розвиток та
перспективи», що проводиться на базі Шосткинського інституту
Сумського державного університету. Тематика поданих матеріалів
охоплює широке коло питань, присвячених актуальним проблемам
сучасної освіти, науки та виробництва.

Видання корисне, викладачам, аспірантам і студентам вищих
навчальних закладів, науковим співробітникам, працівникам хімічної
промисловості, фахівцям інформаційних технологій виробництва,
вчителям загальноосвітніх шкіл.

© Шосткинський інститут
Сумського державного університету, 2024
© Сумський державний університет, 2024

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ПРОЦЕСУ КАЛЬЦИНАЦІЇ В ВИРОБНИЦТВІ СОДИ

Худолей Г.М., Кушнірьов В.І.

Шосткинський інститут Сумського державного університету
hudoley1951@gmail.com

Одним із основних промислових методів виробництва кальцинованої соди є метод кальцинації (прожарювання) бікарбонату натрію. В зв'язку з цим дослідження процесу термічного розкладання бікарбонату натрію має велике практичного значення. Одним з ключових конструктивних елементів такої технології є содова барабанна піч, що обертається. Термічна дисоціація бікарбонату натрію є достатньо складним процесом, і тому, незважаючи на значну кількість робіт [1-3], досі немає надійної математичної моделі, що описують його, яка б була придатною для цілей управління.

По-перше, різні джерела мають суперечливий характер, по-друге, реальний експеримент пов'язаний з високою складністю його виконання. Виходячи з цього, є виправданим використання теоретичних методів математичного моделювання [4], які дозволяють на якісному рівні достовірно описувати реальні процеси, що відбуваються в барабанній печі, що обертається. Створювана модель може бути використана для виявлення факторів, що істотно впливають на процес кальцинації, спростити математичний опис для можливості його використання в задачах синтезу систем управління.

Зважаючи на велику складність математично точного опису всіх процесів, що протікають у содовій печі, неможливо отримати повний кількісний розрахунок. Найбільша складність при створенні математичної моделі полягає в тому, щоб правильно вибрати припущення, що дозволяють, з одного боку, отримати замкнуту систему рівнянь, що описують роботу апарату, а з іншого боку – побудована модель повинна достатньо адекватно відображати основні фізико-хімічні процеси, що протікають у печі.

Ця робота присвячена опису варіанту створення математичної моделі содової печі. Постановка задачі полягає в тому, щоб вибрати обґрунтовані припущення, які не спотворюють основний зміст реального процесу, і водночас дозволяють подати у вигляді математичних співвідношень ключові явища.

Об'єкт моделювання. При побудові моделі за основу було обрано типовий промисловий апарат [2], содова піч (рис. 1), що являє собою циліндричну ємність радіусом $R_p=1,4$ м і довжиною $L_p = 24.5$ м, розташовану під кутом нахилу до горизонту, і яка обертається з постійною швидкістю $n = 5$ об/хв.

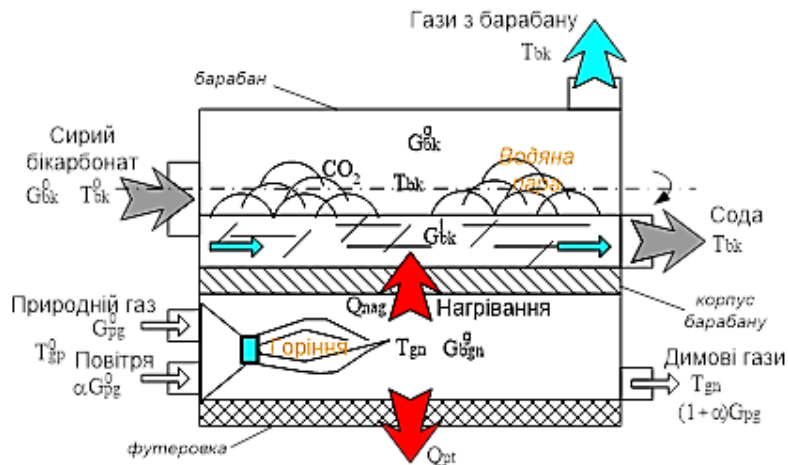
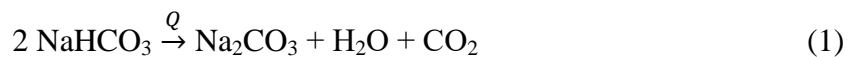


Рис. 1 - Схема матеріальних та теплових потоків процесу кальцинації

Ступінь заповнення барабану печі вихідним продуктом становить приблизно 30%. Час знаходження продукту в барабані становить більше 1 год. В содовій печі за температури 130...150 °С відбувається незворотна ендотермічна реакція термічного розкладання бікарбонату натрію за формулою



Прийняті спрощення та ідеалізація. Аналіз об'єкту моделювання показує, що технологічний процес кальцинації бікарбонату натрію є достатньо складним насамперед через наявність низки реакцій, що протікають паралельно основній, а також в зв'язку з наявністю двофазних («тверде, сипуче» - «газ») потоків та розподілу параметрів (температури, концентрації) по координатах.

Разом з тим, враховуючи особливості механізму процесу кальцинації та маючи на увазі цілі побудови математичної моделі, які складаються в створенні системи управління цим процесом, нами були прийняті наступні припущення та ідеалізації, що суттєво спрощують процес розробки адекватної моделі, а саме:

1. Фізико-хімічні властивості матеріалів, що приймають участь в процесі, є величинами константними і від технологічного режиму ведення процесу не залежать;

2. Процес кальцинації визначається лише реакцією термічного розкладання бікарбонату натрію (1);

3. Час перебування бікарбонату натрію в барабані содової печі значно більше необхідного для повного завершення реакції (1), що дозволяє не враховувати залежність швидкості реакції від температури;

4. Відносно невисока температура проведення процесу кальцинації (130 – 150 °С) дозволяє вважати, що нагрівання матеріалу в барабані виконується виключно теплопровідністю;

5. Гідродинамічний режим як в барабані, так і в камері нагріву содової печі приймаємо таким, що відповідає режимові ідеального перемішування.

6. В процесі кальцинації об'єм завантаженої маси в барабані не змінюється.

7. Операції завантаження бікарбонату натрію та вивантаження соди механічно синхронізовані, так, що рівень маси в барабані залежить лише від витрати сирого бікарбонату натрію на вході, кута нахилу і швидкості обертання барабана.

Розроблення математичної моделі [4].

Базуючись на аналізі особливостей механізму процесу кальцинації бікарбонату натрію, прийняті припущення та ідеалізацію процесів, нами була розроблена аналітичним способом математична модель в вигляді системи наступних рівнянь:

рівняння теплового балансу відносно бікарбонату натрію

$$\begin{aligned} \frac{dT_{bk}}{dt} V_{bb} (\delta \cdot \rho_{bk} c_{bk}^t + (1 - \delta) \rho_{gg} c_{bk}^g) \\ = k_{st} F_{st} (T_{gn} - T_{bk}) + G_{bk}^0 c_{p_bks} T_{bk}^0 - \\ - \gamma_1 0,85 G_{bk}^0 c_{p_sd} T_{bk} - [0,15 + (1 - \gamma_1) 0,85] G_{bk}^0 c_{p_bk}^g T_{bk} - \\ \gamma_1 G_{bk}^0 i_{sd} - 0,15 G_{bk}^0 i_{wd} \end{aligned} \quad (2)$$

рівняння теплового балансу відносно пічних газів

$$\begin{aligned} \frac{dT_{gn}}{dt} V_{gn} \rho_{gn} c_{p_gn} = 0,9 G_{pg}^0 q_{pg} + G_{pg}^0 T_{gp}^0 (c_{p_gn} + \alpha c_{p_pw}) - \\ - k_{st} F_{st} (T_{gn} - T_{bk}) - (\alpha + 1) G_{pg}^0 c_{p_gn} T_{gn} \end{aligned} \quad (3)$$

при початкових умовах

$$T_{bk}(0) = T_{bk0}, T_{gn}(0) = T_{gn0} \quad (4)$$

та виразів для визначення ступеню заповнення об'єму барабану матеріалом

$$\delta = \frac{\frac{1}{2} R_p^2 (\frac{\pi \beta_z}{180} - \sin(\beta_z))}{2\pi R_p^2}, \quad (5)$$

$$\beta_z = 2 \arccos(1 - \frac{h_z}{R_p}), \quad (6)$$

$$h_z = \frac{1,6 G_{bk}^0}{R_p^2 \sin(\varphi_p) \rho_{bk} \omega_p} \quad (7)$$

Тут T_{bk} , T_{gn} – температура середовища в барабані та камері згоряння содової печі, відповідно; T_{bk}^0 , T_{gp}^0 – температура сирого бікарбонату, а також повітря та природного газу на вході до содової печі; V_{bb} , V_{gn} – об'єм барабана та камери згоряння содової печі, відповідно; G_{bk}^0 , G_{pg}^0 – масова витрата сирого бікарбонату натрію та природного газу на вході до содової печі; k_{st} , F_{st} – коефіцієнт

теплопередачі та площа поверхні теплопередачі при нагріванні матеріалу в содовій печі; δ – ступінь заповнення барабану содової печі матеріалом, що піддається кальцинації; γ_1 - доля отримуваної кальцинованої соди в відношенні до масової витрати сухого бікарбонату натрію; i_{sd} та i_{wd} – питома теплота дисоціації бікарбонату натрію та питома теплота випарування води, відповідно; α – доля повітря на згорання однієї частини природного газу; q_{pg} – теплота згорання природного газу; c_p, ρ – питомі теплоємності та щільності відповідних компонентів процесу; R_p – радіус барабану; h_z, β_z – висота та величина центрального кута сегмента перерізу циліндру барабану, зайнятого матеріалом; φ_p – кут нахилу барабану; ω_p – кутова швидкість обертання барабану.

Аналіз розробленої математичної моделі показав, що динамічні характеристики процесів, що описуються диференціальними рівняннями (2) та (3) суттєво різняться. Розв'язок рівняння (2) відносно змінної T_{bk} при фіксації змінної T_{gn} наведено на рис. 2а, а розв'язання рівняння (3) відносно змінної T_{gn} при фіксації змінної T_{bk} наведено на рис. 2б.

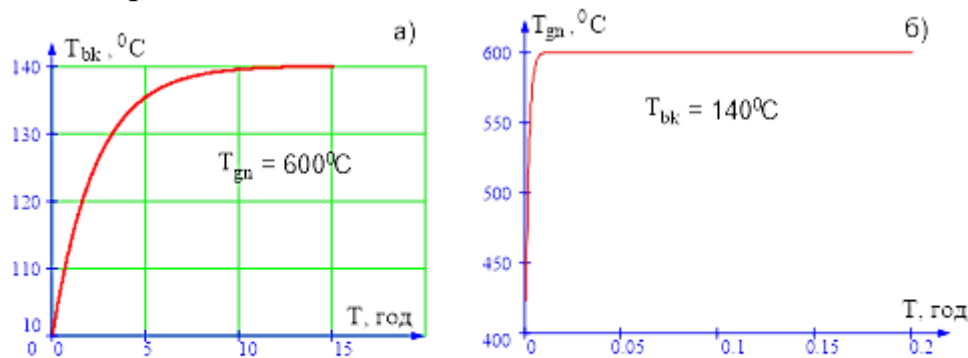


Рис. 2 - Динамічні характеристики теплових процесів:
а) температура в барабані содової печі; б) температура в камері згорання

Порівняння графіків показує (подібний підхід впливає на форму кривих, але в цілому дає вірне уявлення про інерційні властивості), що інерційні властивості розглянутих процесів відрізняються на декілька порядків. Це дозволяє, маючи на увазі значну інерційність теплових процесів в барабані содової печі в порівнянні з інерційністю теплових процесів в камері згорання, знехтувати інерційністю останніх, що, безумовно, спрощує математичну модель.

В результаті математична модель процесу кальцинації в содовій печі набуде такого вигляду

$$\begin{aligned} \frac{dT_{bk}}{dt} V_{bb} (\delta \cdot \rho_{bk} c_{bk}^t + (1 - \delta) \rho_{gg} c_{bk}^g) \\ = k_{st} F_{st} (T_{gn} - T_{bk}) + G_{bk}^0 c_{p_bks} T_{bk}^0 - \end{aligned}$$

$$-\gamma_1 0,85 G_{bk}^0 c_{p_sd} T_{bk} - [0,15 + (1 - \gamma_1) 0,85] G_{bk}^0 c_{p_bk}^g T_{bk} - \gamma_1 G_{bk}^0 i_{sd} - 0,15 G_{bk}^0 i_{wd}, \quad (8a)$$

$$0,9 G_{pg}^0 q_{pg} + G_{pg}^0 T_{gp}^0 (c_{p_gn} + \alpha c_{p_pw}) - k_{st} F_{st} (T_{gn} - T_{bk}) - (\alpha + 1) G_{pg}^0 c_{p_gn} T_{gn} = 0, \quad (8б)$$

$$\delta = \frac{\frac{1}{2} R_p^2 \left(\frac{\pi \beta_z}{180} - \sin(\beta_z) \right)}{2\pi R_p^2}, \quad (8в)$$

$$\beta_z = 2 \arccos \left(1 - \frac{h_z}{R_p} \right), \quad (8г)$$

$$h_z = \frac{1,6 G_{bk}^0}{R_p^2 \sin(\varphi_p) \rho_{bk} \omega_p} \quad (8д)$$

при початкових умовах $T_{bk}(0) = T_{bk0}$.

Для отриманої математичної моделі (8а) – (8д) було виконано математичне моделювання в середовищі математичного пакета *MathCad* з використанням тестових вихідних даних. Результати моделювання представлені на рис. 3.

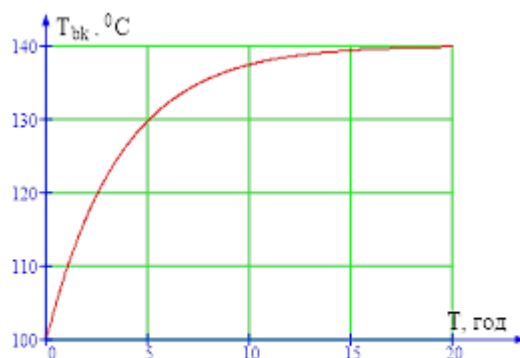


Рис. 3 - Результат математичного моделювання содової печі при продуктивності по бікарбонату натрію 17т/год

Список літературних джерел

1 Крашенинников С. А. Технология соды: Учеб. пособие для вузов. – 2-е изд., перераб. и доп. М.: Химия, 1988.

2 Исламов М.Ш. Печи химической промышленности. Изд. 2-е пер. и доп. «Химия», 1975.

3 Копцев В.В. Математическая модель перемещения обрабатываемого материала через вращающуюся печь по обжигу гранулированного материала. Вестник Самарского гос. техн. у-та. Серия: Физико-технические науки, вып. 42, 2006. – с.210.

4 Математичне моделювання та застосування ЕОМ у хімічній технології: конспект лекцій / укладач Худолей Г.М. – Суми: Сумський державний університет, 2013. – 183 с.