

*О.В. Кондращенко, д.т.н., проф., А.А. Баранова, асист.
Харківська національна академія міського господарства
А.М. Баранов, д.т.н., проф.
Українська інженерно-педагогічна академія, м. Харків*

РУХ ЧАСТИНОК У ВИПАЛЮВАЛЬНОМУ РЕАКТОРІ ТА В КАМЕРІ ТОМЛІННЯ ПРИ РЕАЛІЗАЦІЇ ДВОСТАДІЙНОЇ ТЕХНОЛОГІЇ ТЕПЛОВОЇ ОБРОБКИ ГІПСУ

У статті наведено основні закони руху матеріалу при термічній обробці гіпсового каменю у двостадійній установці. Розроблена математична модель руху частинок у реакторі-конусі, де проводиться випал подрібненого гіпсового каменю в турбулентному двофазному потоці. На другій стадії теплообробки відбувається вирівнювання температури часток гіпсу в камері томління для отримання α -півгідрату сульфату кальцію. Запропоновано принцип створення розвантажувальної частини камери томління, що забезпечує рух матеріалу, близький до моделі ідеального витіснення.

Ключові слова: гіпс, рух твердої частинки, турбулентний потік, трубопровід.

В статье приведены основные законы движения материала при термической обработке гипсового камня в двухстадийной установке. Разработана математическая модель движения частиц в реакторе-конусе, где происходит обжиг измельченного гипсового камня в турбулентном двухфазном потоке. На второй стадии теплообработки происходит выравнивание температуры частиц гипса в камере томления для получения α -полугидрата сульфата кальция. Предложен принцип создания разгрузочной части камеры томления, что обеспечивает движение материала, близкое к модели идеального вытеснения.

Ключевые слова: гипс, движение твердой частицы, турбулентный поток, трубопровод.

The basic laws of motion of the material thermal treatment of gypseous stone in the two-stage equipment are brought in the paper. Developed mathematical model of motion of the particles in a reactor-cone, where is gypsum calcination up in a turbulent diphasic stream is conducted. On the second stage of thermal treatment the balancing of temperature of particles of gypsum in the malleabelizing camera is conduct for the α -hemihydrate sulfate of calcium to have. Principle of creation of unloading part of malleabelizing camera motion of the material near to model of ideal supplanting.

Key words: gypsum, motion of hard particle, turbulent flow, pipeline.

Постановка проблеми. В Україні будівельна індустрія є однією з енергоємних галузей народного господарства, тому потрібні нові, науково обґрунтовані енергозберігаючі технології для забезпечення виробництва матеріалами високої якості й експлуатаційної стійкості.

Серед них важливе місце займають гіпсові матеріали і вироби на їх основі. Вони характеризуються широким діапазоном властивостей за міцністю, вогнестійкістю, високою звукоізоляційною здатністю, малою теплопровідністю, екологічністю.

За традиційними методами випалювання гіпсу здійснюється в котлах при атмосферному тиску або в герметичних апаратах, що працюють під тиском у водному середовищі.

При атмосферному тиску вода із частинок двогідрату сульфату кальцію видаляється у вигляді пари, що призводить до руйнування кристалічних решіток гіпсового каменю і низької якості в'язучого, оскільки відношення об'ємів води в газоподібному та рідкому станах при атмосферному тиску складає 1244.

Випал у герметичних апаратах, що працюють під тиском, дозволяє одержати високоякісний гіпс α -форми. Проте теплова обробка великих (40 – 80 мм) шматків матеріалу низької теплопровідності вимагає значної кількості часу (10 – 15 годин) і великих енергетичних витрат, що спричиняє малий ККД існуючих установок.

Отримання α -півгідрату при випалі гіпсу в потоці газоподібного теплоносія можливе за рахунок створення необхідного тиску в випалювальному апараті. Тиск, при якому температура кипіння води буде вищою за температуру дегідратації двоводного гіпсу, створить умови для утворення α -півгідрату, оскільки при цьому вода виділяється в краплиннорідкому стані.

Аналіз останніх досліджень і виділення не розв'язаних раніше частин загальної проблеми. В існуючих установках випалу гіпсу [1, 2] в потоці газоподібного теплоносія теплова обробка проводиться гарячими газами в циліндричній трубі. Випал у реакторі циліндричної форми призводить до нерівномірного розподілу тепла в сировині через значну відмінність швидкостей руху теплоносія по поперечному перетину. При попаданні частинки на стінку труби або руйнуванні вихорів на ній, матеріал «провалюється» на дно реактора, що призводить до отримання багатофазового матеріалу, причому α -форми практично не спостерігається.

Формулювання цілей статті та виклад основного матеріалу. Автори розробили установку для реалізації двостадійної технології теплової обробки гіпсу в потоці газоподібного теплоносія з реактором-конусом і камерою томління (рис. 1) [3].

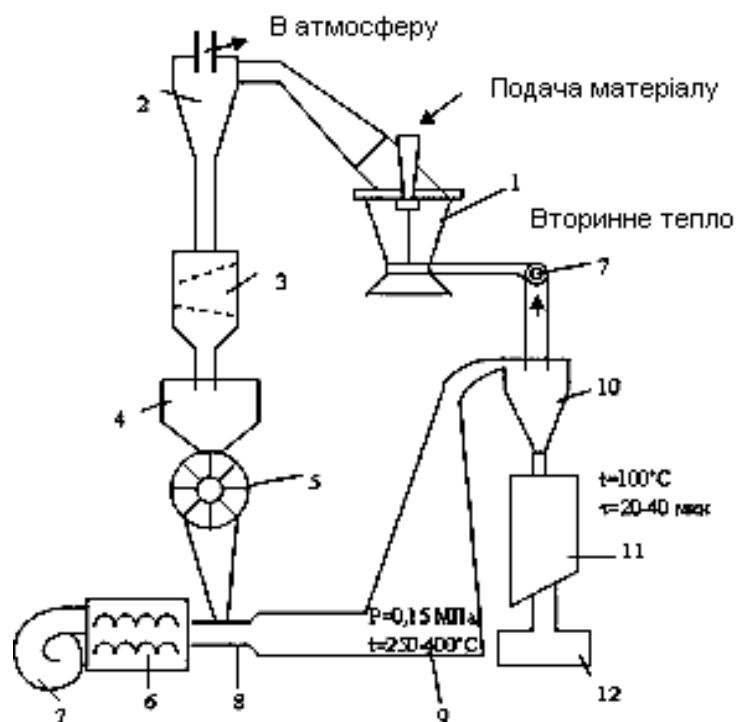


Рисунок 1 – Схема випалу гіпсу в турбулентному потоці теплоносія з випалювальним реактором і камерою томління:

- 1 – тарілчастовалковий млин; 2 – циклон; 3 – дозатор; 4 – накопичувач матеріалу;
- 5 – комірковий живильник; 6 – нагрівач; 7 – вентилятор; 8 – змішувач твердої та

газоподібної фаз; 9 – випалювальний реактор; 10 – циклон-осаджувач; 11 – камера томління; 12 – приймач продукції

За рахунок конусоподібної конструкції випалювального реактора вдається запобігти «провалу» матеріалу, підвищити тиск у реакторі й забезпечити більш рівномірну теплову обробку гіпсу. Необхідність другого реактора – камери томління викликана тим, що при будь-якому нагріванні завжди створюється температурний градієнт. Зокрема, при випалі частинок гіпсу спостерігається нерівномірний розподіл температур по їх глибині, внаслідок чого утворюється багатофазна структура. Після вирівнювання температур у камері томління частинка повинна складатися з монофази – напівводного гіпсу.

Розв’язана задача розподілу температур у частинці випаленого матеріалу після першого реактора залежно від температури теплоносія та часу знаходження частинки в реакторі [4]. Час знаходження визначається законами руху частинок у реакторі.

Розглянемо рух твердої частинки в циліндричній системі координат ρ , φ , z (рис. 2), сумістивши вісь z із віссю реактора, вважаємо його поперечний перетин круглим із внутрішнім радіусом R ($0 \leq \rho \leq R$).

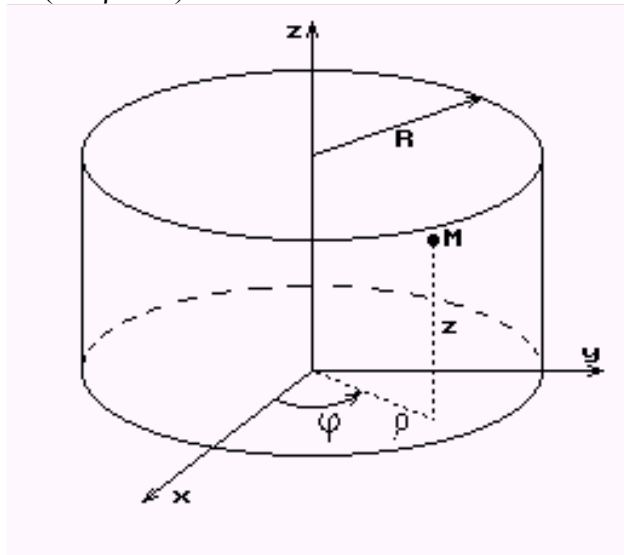


Рисунок 2 – Циліндрична система координат для частинки в реакторі

Позитивний напрям осі z збігається з напрямом швидкості повітряного потоку U , причому U вважається, через осьову симетрію й однорідність потоку по осі z , тільки функцією координати ρ . У загальному випадку вважаємо, що $U(\rho)$ є позитивно визначена, монотонно убуває при зростанні ρ і відповідає таким граничним умовам:

$$U|_{\rho=0} = U_0; U|_{\rho=R} = 0; \left. \frac{dU}{d\rho} \right|_{\rho=0} = 0, \quad (1)$$

де U_0 – максимальне значення швидкості потоку по осі.

Для узагальнення припустимо, що $U(\rho) = U_0 f\left(\frac{\rho}{R}\right)$, де $f\left(\frac{\rho}{R}\right)$ – безрозмірна

функція, залежна від безрозмірної змінної $r = \frac{\rho}{R}$, задовольняє аналогічним умовам:

$$f(0) = 1, f(1) = 0, \frac{df(0)}{dr} = 0. \quad (2)$$

У простому окремому випадку функція $f\left(\frac{\rho}{R}\right) = f(r)$ представляється у формі $f(r) = 1 - r^n$, де $n = 2, 3, 4$. На рис. 3 зображене сімейство функцій для деяких значень n .

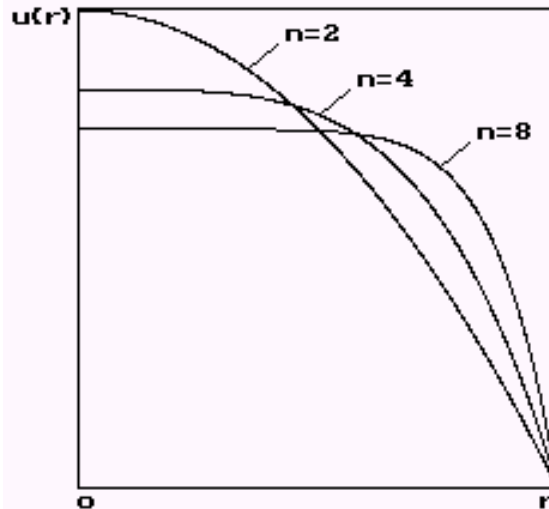


Рисунок 3 – Можливі форми розподілу швидкості повітряного потоку по перетину реактора

Рухомі частинки в потоці приводить до збурення потоку лише в її малій околиці, несумірній з R , що має місце при $R \gg d_0$, де d_0 – характерний лінійний розмір частинки, а також за умови «необмеженої» потужності потоку. Іншими словами, передбачається, що присутність у потоці частинки не змінює форму функції $f\left(\frac{\rho}{R}\right)$.

Для виведення диференціальних рівнянь руху частинки в повітряному потоці з передбаченими вище властивостями будемо виходити із загальних рівнянь Лагранжа 2-го роду, для чого спочатку запишемо кінетичну енергію, яка в циліндричних координатах має форму

$$E = \frac{m}{2}(\dot{\rho}^2 + \rho^2 \dot{\varphi}^2 + \dot{Z}^2), \quad (3)$$

де m – маса частинки (крапка над позначенням координати відповідає похідній за часом t).

З потенційних сил, що діють на частинку, є лише сила тяжіння mg (g – прискорення вільного падіння), і тому функцію Лагранжа за допомогою формули (3) запишемо як

$$L = \frac{m}{2}(\dot{\rho}^2 + \rho^2 \dot{\varphi}^2 + \dot{Z}^2) - mgz. \quad (4)$$

Відповідні рівняння Лагранжа з використанням виразу (4) представляються як система таких трьох нелінійних диференціальних рівнянь:

$$\left. \begin{aligned} m\ddot{\rho} - m\rho\dot{\phi}^2 &= Q_r + P_r, \\ m\rho^2\ddot{\phi} + 2m\rho\dot{\rho}\dot{\phi} &= \rho Q_t, \\ m\ddot{z} + mg &= Q_z, \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

де Q_r , Q_t , Q_z – узагальнені непотенційні сили опору руху частинки в потоці; при цьому Q_r є радіальна, Q_t – тангенціальна і Q_z – фронтальна сили опорів. Ці сили залежать перш за все від відповідних швидкостей: радіальної $\dot{\rho}$, тангенціальної $\rho\dot{\phi}$ і фронтальної \dot{z} , причому Q_z залежить не просто від \dot{z} , а є функцією відносної швидкості $U(\rho) - \dot{z}$. Узагальнена сила P_r в першому рівнянні системи (5) є свого роду «доцентровою» силою, завжди направленою перпендикулярно до осі реактора.

Запишемо спочатку вирази для сил опору. Оскільки вони залежать від відповідних швидкостей, то в загальному випадку їх можна уявити у формі розкладань по ступенях цих швидкостей, зберігаючи перші два члени:

$$\left. \begin{aligned} -Q_r &= C_r\dot{\rho} + D_r\dot{\rho}^2 \text{sign}(\dot{\rho}), \\ -Q_t &= C_t(\rho\dot{\phi}) + D_t(\rho\dot{\phi})^2 \text{sign}(\rho\dot{\phi}), \\ +Q_z &= C_z(U - \dot{z}) + D_z(U - \dot{z})^2 \text{sign}(U - \dot{z}), \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

де C_r , C_t , C_z і D_r , D_t , D_z – ненегативні константи, що мають відповідні розмірності $[\text{Нс/м}]$ та $[\text{Нс}^2/\text{м}^2]$. Їх числові значення, в цілому, залежать від розмірів і конфігурації частинки та можуть бути визначені експериментальним шляхом. Оскільки фізична природа і суть цих констант однакові й фактично величини Q_r , Q_t , Q_z є компонентами одного і того ж вектора сили опору, можна вважати, що

$$C_r = C_t = C_z = C, \quad D_r = D_t = D_z = D. \quad (7)$$

У виразах (6) символ sign у других доданках необхідний для того, щоб знаки перших і других доданків були однаковими, тобто збігалися зі знаками відповідних швидкостей. Доцентрова сила викликана різницею тиску повітряного потоку на «внутрішній», зверненій до осі реактора, і «зовнішній», протилежній, стороні частинки через змінність швидкості обтікання (ефект Магнуса й епіюра швидкостей). Тоді можна записати

$$P_r = k(P_2 - P_1) = -\frac{S\gamma}{2}(V_2^2 - V_1^2), \quad (8)$$

де S – деякий коефіцієнт пропорційності, який залежить, зокрема, від серединної площі частинки і має розмірність $[\text{м}^2]$; P_1 та P_2 – тиск відповідно на «внутрішній» і «зовнішній» сторонах частинки; V_1 та V_2 – відносні швидкості обтікання частинки потоком повітря на відповідних сторонах; γ – густина повітря.

Запишемо у формулі (8) різницю квадратів швидкостей у такому вигляді:

$$V_2^2 - V_1^2 = 2d_o \frac{V_2 - V_1}{d_o} \cdot \frac{(V_2 + V_1)}{2} \approx 2d_o \frac{dV}{d\rho} \cdot V. \quad (9)$$

Підставимо вираз (9) у формулу (8) і, помічаючи, що $V = U - \dot{z}$, одержимо

$$P_r = -S\gamma d_0 (U - \dot{z}) \frac{d}{d\rho} (U - \dot{z}). \quad (10)$$

Ураховуючи, що величина $\left| \frac{\partial \dot{z}}{\partial \rho} \right|$ дуже мала порівняно з $\left| \frac{dU}{d\rho} \right|$, остаточно отримаємо

$$P_r = -m\mu (U - \dot{z}) \frac{dU}{d\rho}, \quad (11)$$

де $\mu = \frac{Svd_0}{m}$ – безрозмірний параметр.

Система рівнянь (5) з урахуванням співвідношень (6), (7) і (10) представляється у формі

$$\left. \begin{aligned} m\ddot{\rho} - m\rho\dot{\phi}^2 + C\dot{\rho} + D\dot{\rho}^2 \text{sign}(\dot{\rho}) - m\mu(U - \dot{z}) \frac{dU}{d\rho} &= 0, \\ m\rho\ddot{\phi} + 2m\dot{\rho}\dot{\phi} + C(\rho\dot{\phi}) + D(\rho\dot{\phi})^2 \text{sign}(\rho\dot{\phi}) &= 0, \\ m\ddot{z} + mg - C(U - \dot{z}) - D(U - \dot{z})^2 \text{sign}(U - \dot{z}) &= 0. \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

Як видно, всі рівняння системи (12) взаємопов'язані та є системою явно виражених нелінійних рівнянь. Приведемо їх до безрозмірної форми, зробивши заміну змінних,

$$\{t = (U_0\tau)/g, \dot{\rho} = U_0V_r, \rho\dot{\phi} = U_0V_t, U - \dot{z} = U_0V_z, \rho = Rr\},$$

де нові змінні V_r, V_t, V_z є відносними радіальними, тангенціальними і фронтальними швидкостями, а змінний параметр τ є свого роду «безрозмірним» часом.

Тоді в нових змінних система (12) матиме такий вигляд:

$$\left. \begin{aligned} \frac{dV_r}{d\tau} - \lambda \frac{V_t^2}{r} + F(V_r) - \mu\lambda V_z \frac{df}{dr} &= 0, \\ \frac{dV_t}{d\tau} + \lambda \frac{V_t V_r}{r} + F(V_t) &= 0, \\ \frac{dV_z}{d\tau} - \lambda V_r \frac{df}{dr} + F(V_z) = 1, \frac{dr}{d\tau} &= \lambda V_r \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

де введений безрозмірний параметр $\lambda = \frac{U_o^2}{Rg}$ і безрозмірна функція

опору $F(V) = \frac{U_o}{mg} \{CV + DU_o V^2 \text{sign} V\}$, а також ураховане співвідношення

для функції $U(\rho)$. На додаток до системи (13) є рівняння для визначення кутової координати частинки

$$\frac{d\varphi}{d\tau} = \lambda \frac{V_t}{r}. \quad (14)$$

Система рівнянь (13) є системою четвертого порядку, а не шостого, на відміну від системи рівнянь (12), завдяки тій обставині, що рух частинки по координатах φ і z є інфінітним, оскільки φ є циклічною координатою, а z , хоча формально і не циклічна, але не міститься в явному вигляді в третьому рівнянні системи (12).

У результаті числової інтеграції рівнянь (13) знаходимо закони руху частинок і визначаємо розміри реактора для ефективної теплової обробки.

Після випалення частинки в реакторі, вона поступає в камеру томління, яка повинна забезпечити вирівнювання температурного поля в частинках, тобто знаходження частинки заданий час при відповідних температурних режимах. Необхідно забезпечити рівномірний рух матеріалу в камері томління, для чого висувається вимога усунення воронкоутворення, тобто необхідна конструкція камери томління максимально наближена до моделі ідеального витіснення.

У роботі [5] розв'язана задача вирівнювання температурного поля в частинці гіпсу при її перебуванні в камері томління і визначений діаметр отворів, що запобігає утворенню зводу. Для створення режиму, близького до ідеального витіснення матеріалу, приймаємо конструкцію камери томління у вигляді циліндра з розвантажувальною частиною. Розвантажувальна частина забезпечує витік матеріалу по гідравлічній формі, тобто в циліндричній частині бункера матеріал рухається рівномірно як суцільне тіло. Для цього в циліндричній частині встановлені сітки ортогонально до напрямку руху матеріалу. Розмір комірок сітки [5] повинен бути

більшим від $d = \frac{4\tau_0(1 + \sin\varphi)}{\rho g}$, де d – гідравлічний діаметр зводуотворювального

отвору, м; τ_0 – початковий опір зрушенню, Н/м²; φ – кут внутрішнього тертя, рад.; ρ – густина матеріалу, кг/м³.

Висновки. Розроблена математична модель вирівнювання температурного поля в частинці гіпсу дозволяє визначити необхідний час перебування її в камері томління.

Знайдені умови вільного і рівномірного витоку матеріалу по всьому поперечному перетину камери, які забезпечують рух матеріалу, близький до моделі ідеального витіснення.

Визначені параметри сіток, що запобігають воронкоутворенню в камері томління.

ЛІТЕРАТУРА

1. 1. Деклараційний патент № 49134 А, Україна. Установка для виробництва гіпсу / М.С. Болотських, В.І. Бабушкін, В.І. Вінниченко, О.В. Кондращенко, А.А. Мамедав; – опубл. 16.09.02. 2002. Бюл. № 9.
2. 2. Ферронская А.В. Гипсовые материалы и изделия (производство и применение) справочник / А.В. Ферронская. М., 2004. – 485 с.
3. 3. Пат. № 31289, Україна. Спосіб випалу гіпсу у завислому стані при підвищеному тиску / О.В. Кондращенко, В.І. Бабушкін, А.М. Баранов, А.А. Баранова. – опубл. 10.04.08. 2008. Бюл. № 7.
4. 4. Кондращенко О.В. Перспективы энергосбережения при производстве гипсовых вяжущих / О.В. Кондращенко, А.А. Баранова // Науковий вісник будівництва. – Х.: ХДТУБА, 2006. – Вип. 36. – С. 60 – 65.
5. 5. Кондращенко О.В., Баранов А.М., Баранова А.А. Особенности движения обожженного материала в камере томления при реализации двухстадийной технологии тепловой обработки гипса / О.В. Кондращенко, А.М. Баранов, А.А. Баранова // Збірник наукових праць галузеве машинобудування, будівництво. – Полтава: ПолтНТУ, 2009. – Вип. 23. Т 2. – С. 3 – 8.

Надійшла до редакції 16.03.2010 р.

© О.В. Кондращенко, А.А. Баранова, А.М. Баранов