

СУШІННЯ ТОНКОДИСПЕРСНИХ ЧАСТИНОК ОКСИДУ ТИТАНУ

Авторами запропоновано фізичну модель та математичне описання процесу сушіння тонкодисперсних частинок діоксиду титану TiO_2 в потоці теплоносія. Отримано рішення математичного описання у вигляді залежностей вологовмісту і температури частинок TiO_2 та теплоносія від часу сушіння і основних параметрів процесу, що необхідно для подальших експериментальних досліджень і проектування промислового сушильного обладнання

Ключові слова: тонкодисперсний, частинка, сушіння, модель, фізична модель, процес, порошок, діоксид титану

© Марчевський В. М., Гробовенко Я. В., Візерський Д. С., 2017.

Постановка проблеми. Сушіння являється заключним етапом виробництва TiO_2 і характеризується значною енергоємністю. Загальною науковою проблемою є зменшення витрат теплової енергії в процесах сушіння. Відомо, що саме на сушіння витрачається до 25 % світового виробництва енергії [1]. В сучасних умовах, коли збільшується використання енергії і, відповідно, з'являється дефіцит енергетичних ресурсів, все більш актуальним піднімається питання енергозбереження. Незважаючи на вже сформовані принципи енергозбереження в технології і техніці сушіння, немає однозначного рішення їх реалізації. Тому проблема вирішення задач економії теплової енергії при отриманні сухих тонкодисперсних порошків являється актуальною і формує мету наступних досліджень.

Сушіння являється нестационарним і термодифузійним процесом, в якому вологовміст матеріалу, температура матеріалу та теплоносія змінюються в часі, тому для розробки оптимальних режимів сушіння та раціональних конструкцій сушильних установок повинні бути відомі конкретні кінетичні закономірності процесу і умови його моделювання.

Аналіз попередніх досліджень. Відома математична модель сушіння тонкодисперсних матеріалів [2], що має наступний недолік: автор вважає, що в першому періоді сушіння лімітуючим процесом являється масообмін. Фактично, при сушінні тонкої плівки пасти на поверхні інертних тіл, швидкість сушіння лімітується швидкістю підводу теплової енергії. В період нагрівання плівки пасти, підведена теплота витрачається на нагрівання матеріалу від початкової температури до температури мокрого термометра та на випаровування вологи [3]. В першому періоді сушіння все тепло, підведене теплоносієм витрачається на випаровування вологи, при постійній швидкості сушіння. В другому періоді сушіння видаляється внутрішня та адсорбційна волога до заданої величини сухості [4, 5].

Метою цієї статті є створення фізичної моделі та математичного описання процесу сушіння тонкодисперсного діоксиду титану TiO_2 , а також розв'язання задач математичного описання і знаходження кінетичних закономірностей процесу сушіння.

Виклад основного матеріалу. Розглянемо елементарну частинку діоксиду титану радіусом r (рис. 1), яка має початковий вологовміст U_0 і сушиться в потоці сушильного агенту. Розміри таких частинок становлять 3–5 мкм, тому відношення поверхні частинок до їх об'єму має велике значення. Такі частинки рухаються з потоком теплоносія з однаковою швидкістю, відносна швидкість частинок відсутня. За таких умов тепла енергія від сушильного агенту передається частинці, через поверхневий шар водяної пари над поверхнею частинки, теплопровідністю λ . Навколо частинки в просторі теплоносія утворено кільце водяної пари, парціальний тиск якої поступово збільшується від значення p_n до p на поверхні частинки. В такому випадку число Bi буде менше 0,1, а число $Nu = 2$ [5]. Значення коефіцієнта тепловіддачі α , Вт/м²К дорівнює:

$$\alpha = \frac{2 \cdot \lambda}{d} \quad (1)$$

Розглянемо виділений об'єм (1 м^3) потоку (рисунок 2), в якому сушаться тонкодисперсні частинки діоксиду титану, що рівномірно розподілені в об'ємі теплоносія і рухаються з однаковою швидкістю із теплоносієм.

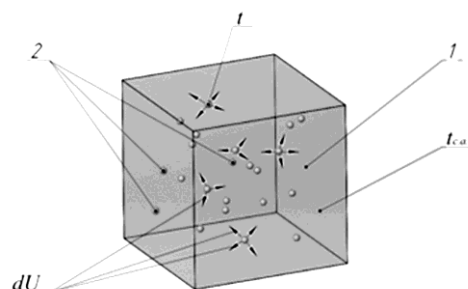
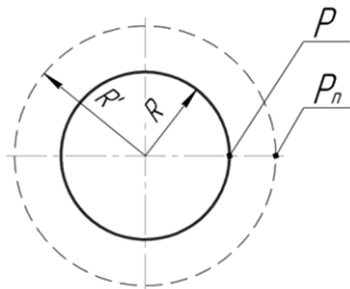


Рис. 1 – Частинка діоксиду титану

1 – сушильний агент; 2 – частинки TiO_2

Рис. 2 – Виділений об'єм теплоносія з частинками TiO_2

Нехай об'єм тонкодисперсних частинок діоксиду титану у виділеному об'ємі суміші становить x , $M_{\text{част}}^3/M_{\text{сум}}^3$. Тоді об'єм, що займає сушильний агент у виділеному об'ємі буде $1 - x$.

Кількість теплової енергії, що витрачається на нагрівання тонкодисперсних частинок:

$$dQ_{\text{нагр.}} = dQ_{\text{заг.}} - dQ_{\text{вип.}}, \quad (2)$$

$$xV\rho_{\text{част}}c_{\text{част}}dt = \alpha F_{\text{част}}(t_{\text{с.а.}} - t)d\tau - xV\rho_{\text{част}}dU \frac{dU}{d\tau} r d\tau, \quad (3)$$

де V – виділений об'єм ($V = 1 \text{ м}^3$); $\rho_{\text{част}}$ – густина частинок діоксиду титану, $\text{кг}/\text{м}^3$; $c_{\text{част}}$ – середня питома теплоємність частинок, $\text{Дж}/\text{кг}\cdot\text{К}$; α – коефіцієнт тепловіддачі, $\text{Вт}/\text{м}^2\cdot\text{К}$; $F_{\text{част}}$ – зовнішня поверхня частинок діоксиду титану, що знаходяться у виділеному об'ємі сушильного агента, м^2 ; $t_{\text{с.а.}}$ – температура сушильного агента, К ; t – поточна температура частинки TiO_2 , К ; τ – час сушіння, с ; U – поточний вологовміст, $\text{кг}_\text{в}/\text{кг}_\text{а.с.м.}$; r – питома теплота пароутворення, $\text{кДж}/\text{кг}$.

З іншого боку запишемо кількість енергії, яку віддає сушильний агент при контакті із поверхнею тонкодисперсних частинок діоксиду титану:

$$dQ_{\text{с.а.}} = dQ_{\text{част.}}, \quad (4)$$

$$(1-x)V\rho_{\text{с.а.}}c_{\text{с.а.}}dt = \alpha F_{\text{част}}(t_{\text{с.а.}} - t)d\tau, \quad (5)$$

де $\rho_{\text{с.а.}}$ – густина сушильного агента, $\text{кг}/\text{м}^3$; $c_{\text{с.а.}}$ – середня питома теплоємність сушильного агента, $\text{Дж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$.

Виходячи із закону молекулярної дифузії, запишемо рівняння швидкості випаровування із поверхні частинок діоксиду титану:

$$\frac{dU}{d\tau} = -K F_{\text{част}} \frac{P_s(1-\phi)}{dR}, \quad \frac{1}{\tilde{n}} \quad (6)$$

де K – коефіцієнт швидкості сушіння, $1/\text{Па}\cdot\text{м}\cdot\text{с}$; P_s – тиск насиченої пари, МПа ; ϕ – відносна вологість сушильного агента; R – радіус частинки діоксиду титану, м .

На основі розглянутих залежностей сформульовано математичне описання процесу сушіння тонкодисперсних часток TiO_2 в потоці теплоносія:

$$\begin{cases} \frac{dt_{\text{част}}}{d\tau} = \frac{\alpha \sum F_{\text{част}}(t_{\text{с.а.}} - t_{\text{част}})}{xV\rho_{\text{част}}c_{\text{част}}} - \frac{dU}{d\tau} \frac{r}{c_{\text{част}}} \\ \frac{dt_{\text{с.а.}}}{d\tau} = \frac{\alpha \sum F_{\text{част}}(t_{\text{с.а.}} - t_{\text{част}})}{(1-x) \cdot V \cdot \rho_{\text{с.а.}} c_{\text{с.а.}}} \\ \frac{dU}{d\tau} = -K \sum F_{\text{част}} \frac{P_s(1-\phi)}{R} \end{cases} \quad (7)$$

Запишемо початкові умови до системи рівнянь 7:

$$d_0 = 3 \cdot 10^{-6} \text{ м}; U_0 = U_{1\text{кр}}; t = t_0; \tau = \tau_0, \quad (8)$$

де d_0 – діаметр частинок діоксиду титану, м ; U_0 – початковий вологовміст частинок, $\text{кг}_\text{в}/\text{кг}_\text{а.с.м.}$; t_0 – початкова температура частинок, К .

Рішенням системи рівнянь 7 із урахуванням початкових умов 8 отримано залежності вологовмісту частинок діоксиду титану від часу сушіння та залежності температури частинок і температури сушильного агента від часу сушіння (рисунок 3, 4).

Із рисунку 3 видно, що вологовміст частинок діоксиду титану наближається до рівноважного $0,003 \text{ кг}_\text{в}/\text{кг}_\text{а.с.м.}$ за дві секунди при початковій температурі теплоносія $150 \text{ }^\circ\text{C}$.

Із рисунку 4 видно що температура сушильного агента зменшується від початкової $150 \text{ }^\circ\text{C}$ до $107 \text{ }^\circ\text{C}$, в той час як температура частинки зростає від початкової $50 \text{ }^\circ\text{C}$ до $107 \text{ }^\circ\text{C}$.

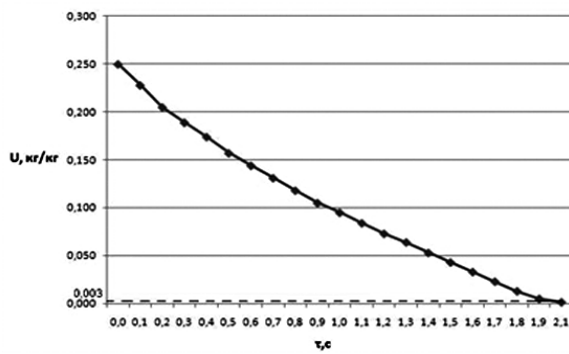
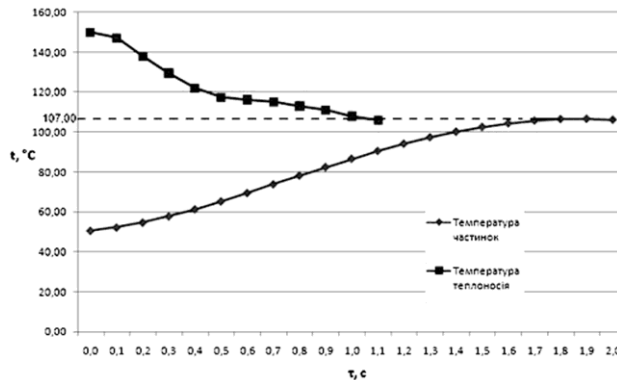


Рис. 3 – Залежність $U = f(\tau)$



1 – залежність температури сушильного агенту від часу сушіння; 2 – залежність температури частинки від часу сушіння

Рис. 4 – Залежність $t = f(\tau)$

Висновки. Розрахунок задач математичного описання процесу досушування тонкодисперсних частинок TiO_2 у потоці теплоносія показує, що видалення адсорбційної вологи обмежує ефективність процесу сушіння. Для інтенсифікації сушіння і збільшення залишкової сухості матеріалу необхідно збільшувати величину густини теплового потоку сушильного агента та поверхню контакту матеріалу із сушильним агентом, шляхом багаторазового подрібнення агрегатів матеріалу.

Список використаної літератури

1. Марчевський В. М. Процес сушіння діоксиду титану / В. М. Марчевський, Я. В. Гробовенко // Міжнародний науковий журнал. – 2016. – № 5. – С. 22–25.
2. Малахов М. М. Математична модель сушіння дисперсних продуктів в активному гідродинамічному шарі / М. М. Малахов, С. В. Дяченко, Е. Г. Папуш, О. А. Клименчук // Вісті вищих навчальних закладів. Харчова технологія. – 2005. – № 2–3. – С. 97–102.
3. Иванов И. Г. Сушка мелкодисперсных материалов в кипящем слое / И. Г. Иванов // М.: Энергия, 2012. – 126 с.
4. Алексанян И. Ю. Моделирование процесса сушки дисперсного материала в кипящем слое / И. Ю. Алексанян, Л. М. Титова, А. Х. Нугманов // Техника и технология пищевых производств. – 2014. – № 3 (34). – С. 96–100.
5. Дмитриев В. М. Конвективная сушка полидисперсных материалов в аппаратах закрученного взвешенного слоя / В. М. Дмитриев, Е. А. Сергеева // Вестник Тамбовского государственного технического университета. – 2013. – № 3. – С. 602–606.

Надійшла до редакції 13.11.2016