

Марчевський В. М.

кандидат технічних наук, професор

Національний Технічний Університет України «КПІ»

Гробовенко Я. В.

аспірант

Національний Технічний Університет України «КПІ»

Марчевський В. М.

кандидат технических наук, профессор

Национальный Технический Университет Украины «КПИ»

Гробовенко Я. В.

аспирант

Национальный Технический Университет Украины «КПИ»

Marchevsky V.

Ph.D., professor

National Technical University of Ukraine «KPI»,

Grobovenko Y.

Postgraduate

National Technical University of Ukraine «KPI»

ПРОЦЕС СУШІННЯ ДІОКСИДУ ТИТАНУ

ПРОЦЕСС СУШКИ ДИОКСИДА ТИТАНА

THE DRYING PROCESS TITANIUM DIOXIDE

Анотація: В статті запропоновано фізичну модель та математичне описання процесу сушіння пасти діоксиду титану TiO_2 . Отримано рішення математичного описання у вигляді залежностей вологовмісту і температури частинок TiO_2 від часу сушіння і основних параметрів процесу, що необхідні для подальших експериментальних досліджень і проектування промислового сушильного обладнання.

Ключові слова: модель, сушіння, фізична, математична, грібнодисперсний, паста, порошок.

Аннотация. В статье предложено физическую модель и математическое описание процесса сушки пасты диоксида титана TiO_2 . Получено решение математического описания в виде зависимостей влагосодержания и температуры частиц TiO_2 от времени сушки и основных параметров процесса, которые необходимы для дальнейших экспериментальных исследований и проектирования промышленного сушильного оборудования.

Ключевые слова: модель, сушка, физическая, математическая, мелкодисперсный, паста, порошок.

Abstract. A physical model and mathematical description drying of paste titanium dioxide. The solution of the mathematical description of a dependency of moisture content and temperature of TiO_2 particles from the drying time and the main process parameters, which are necessary for further experimental studies and design of industrial drying equipment.

Keywords: model, drying, physical, mathematical, fine, paste, powder.

Постановка проблеми. Важливою науковою проблемою є зменшення затрат теплової енергії в процесах сушіння, на здійснення яких витрачається до 25% світового виробництва енергії [1].

Недостатньо вирішеною проблемою є зменшення енергозатрат та інтенсифікація сушіння у ви-

робництвах порошоків, зокрема діоксиду титану. Попит ринку на діоксид титану зростає. Великими споживачами діоксиду титану є лакофарбова, металургійна, паперова, фармацевтична та інші галузі промисловості, де він використовується в якості наповнювача.

Діоксид титану також використовується, як наповнювач для виготовлення різних пластичних мас і виробів та при виробництві високоякісного паперу.

У технології виробництва діоксиду титану процес сушіння пасти TiO_2 є найбільш енергоємний і лімітуючий процес. Одним із основних показників готової продукції є залишкова вологість порошку. Вона має бути не більшою ніж 0,3%. Для отримання такого значення залишкової вологості в звичайних сушильних апаратах збільшують температуру відпрацьованого теплоносія на виході із сушарки, що приводить до значних втрат теплової енергії. Тому робота, направлена на інтенсифікацію сушки і зменшення затрат теплової енергії є актуальна.

Виклад основного матеріалу дослідження

Фізична модель сушіння порошку діоксиду титану

У сучасному виробництві діоксиду титану на стадію сушіння подається вихідний матеріал у вигляді пасти, що містить 36–46% води. Для зменшення тискотривності пасти її змішують із сухим порошком, це полегшує подачу пасти в сушарку шнековим транспортером та її диспергування роторними диспергаторами.

Процес сушіння включає наступні елементарні процеси:

1. Процес нагрівання вологої пасти TiO_2 до температури мокрого термометра.
2. Процес висушування поверхневої і капілярної вологи при постійній швидкості сушіння, що відповідає першому періоду сушіння.
3. Процес досушування адсорбційної вологи при падаючій швидкості сушіння, що відповідає другому періоду сушіння.

Аналіз цих стадій показує, що швидкість випаровування в першому періоді сушіння пасти діоксиду титану лімітується величиною теплового потоку. В другому періоді сушіння швидкість процесу лімітується швидкістю випаровування адсорбційно-зв'язаної вологи. Процес відриву частинок від грудок пасти (рисунок 1) не



Рисунок 1. Частинка пасти діоксиду титану в потоці теплоносія

лімітує процес сушіння пасти діоксиду титану. Частинки, що висохли до критичної сухості відриваються в результаті тертя в шарі матеріалу і виносяться потоком сушильного агента із сушильної камери в систему сепарації. В системі транспортування і сепарації здійснюється досушування частинок матеріалу до заданої кінцевої вологості. Для здійснення досушування на промислових сушарках підвищують температуру відпрацьованого теплоносія вище 100, що збільшує затрати енергії.

Математичне описання процесу сушіння діоксиду титану

Тепловий баланс процесу сушіння:

$$dQ = dQ_1 - dQ_2, \tag{1}$$

де dQ – тепловий потік на нагрівання пасти, кДж; dQ_1 – конвективний тепловий потік від сушильного агента, кДж; dQ_2 – тепловий потік на випаровування води із пасти діоксиду титану, кДж.

Розписавши складові рівняння (1), отримаємо:

$$G_{a.c.n.} \cdot (c_{a.c.n.} + c_w \cdot U) \cdot dt_{част} = \alpha \cdot F_{част} \cdot (t_{c.a.} - t_{част}) \cdot d\tau - G_{a.c.n.} \cdot \frac{dU}{d\tau} \cdot r \cdot d\tau, \tag{2}$$

де $G_{a.c.n.}$ – витрати абсолютно сухого порошку діоксиду титану, $\frac{кг}{с}$; w – швидкість сушильного агента (повітря), $\frac{м}{с}$; l – еквівалентний діаметр частинки пасти діоксиду титану, $м$; $v_{c.a.}$ – кінематична в'язкість сушильного агента, $\frac{м^2}{с}$; $c_{a.c.n.}$ – питома теплоємність порошку діоксиду титану, $\frac{Дж}{кг \cdot K}$; c_w – питома теплоємність води, $\frac{Дж}{кг \cdot K}$; U – вологовміст пасти діоксиду титану, $\frac{кг_в}{кг_{a.c.m}}$; α – коефіцієнт тепловіддачі від теплоносія до поверхні частинки, $\frac{Вт}{м^2 \cdot K}$; $F_{част}$ – зовнішня поверхня частинки, $м^2$; $t_{c.a.}$ – температура сушильного агента, $^{\circ}C$; $t_{част}$ – температура частинки, $^{\circ}C$; $\frac{dU}{d\tau}$ – швидкість сушіння, $\frac{1}{с}$; r – питома теплота пароутворення, $\frac{Дж}{кг}$; $d\tau$ – час сушіння, $с$.

Швидкість сушіння в першому періоді лімітується швидкістю тепловіддачі від теплоносія до грудочок пасти [2]:

$$\frac{dU}{d\tau} = \frac{\alpha \cdot (t_{c.a.} - t_{m.m.})}{r}, \tag{3}$$

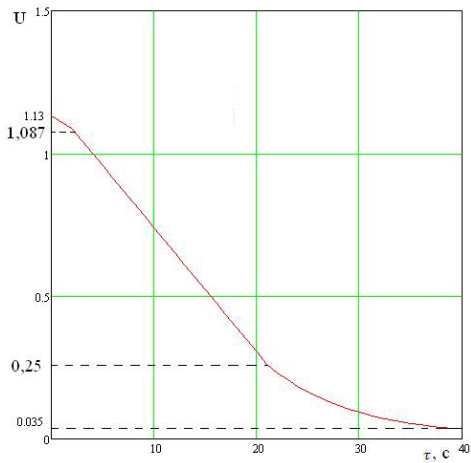


Рисунок 2. Залежність вологовмісту частинки діоксиду титану від часу сушіння

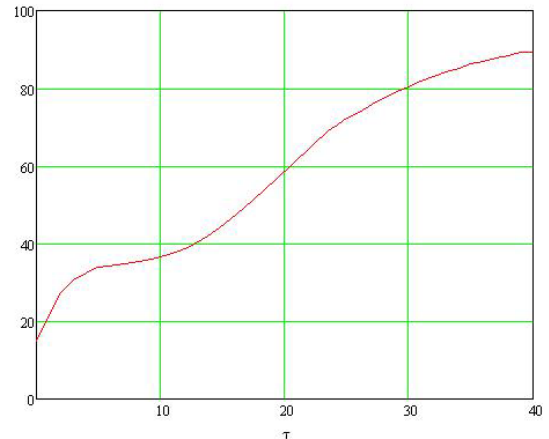


Рисунок 3. Залежність температури частинки діоксиду титану від часу сушіння

в другому періоді випаровується вода, зв'язана силою адсорбції [2]:

$$\frac{dU}{d\tau} = -K \cdot (U_{1k} - U), \quad (4)$$

де $t_{m.m.}$ – температура мокрого термометра, °C; K – коефіцієнт сушіння, $\frac{1}{c}$; U_{1k} – критичний вологовміст,

$\frac{\kappa Z_{\theta}}{\kappa Z_{a.c.m.}}$; U – рівноважний вологовміст, $\frac{\kappa Z_{\theta}}{\kappa Z_{a.c.m.}}$.

На основі рівняння теплової енергії (2) математичне описання процесу сушіння можна представити наступною системою рівнянь:

$$\begin{cases} \frac{dt_{\text{часм}}}{d\tau} = \frac{\alpha \cdot F_{\text{часм}} \cdot (t_{c.a.} - t_{\text{часм}})}{G_{a.c.n.} \cdot (c_{a.c.n.} + c_{\theta} \cdot U)} - \frac{dU}{d\tau} \cdot r \\ \frac{dU}{d\tau} = \frac{\alpha \cdot (t_{c.a.} - t_{m.m.})}{r} - K \cdot (U_{1k} - U) \end{cases} \quad (5)$$

Прийmemo початкові умови для даної системи рівнянь (5):

$$u|_{\tau=0} = u_0, u_2 = u_{1kp}, \tau_0 = 0, t_0 = t_1, d_0 = 1 \text{ мм}, \quad (6)$$

$$\alpha = \frac{Nu \cdot \lambda_{c.a.}}{D} \quad [1],$$

$$Nu = 0,021 \cdot Re^{0,8} \cdot Pr^{0,43} \cdot \left(\frac{Pr}{Pr_{cm}} \right)^{0,25} \cdot \varepsilon \quad [1].$$

Математичне описання процесу сушіння пасти діоксиду титану розв'язано прямим інтегруванням системи рівнянь (5) із використанням початкових умов (6). Результати розрахунків наведено на рисунках 2 і 3.

Залежність вологовмісту від часу показує, що процес сушіння пасти включає період нагрівання до температури мокрого термометра, період постійної швид-

кості сушіння, що протікає в межах від $U_1 = 1,087 \frac{\kappa Z_{\theta}}{\kappa Z_{a.c.m.}}$

до $U_{1kp} = 0,25 \frac{\kappa Z_{\theta}}{\kappa Z_{a.c.m.}}$ та період спадаючої швидко-

сті сушіння, що протікає від $U_{1kp} = 0,25 \frac{\kappa Z_{\theta}}{\kappa Z_{a.c.m.}}$ до

$U_{2kp} = 0,035 \frac{\kappa Z_{\theta}}{\kappa Z_{a.c.m.}}$. З рисунку 2 видно, що лімітуючою

стадією процесу сушіння є період спадаючої швидкості, в якому висушується адсорбована волога.

Із рисунку 3 видно, що температурний режим сушіння в періоді постійної швидкості сушіння – стабільний. Температура шару по закінченню цього періоду різко піднімається до рівноважної з температурою теплоносія.

Висновки

1. Проаналізовано основні процеси пр. і сушінні пасти діоксиду титану та обґрунтовано фізичну модель процесу сушіння пасти.

2. Розроблено математичне описання процесу сушіння діоксиду титану, що характеризує кінетичні закономірності сушіння пасти діоксиду титану і дає змогу методом чисельного інтегрування визначити зміну вологовмісту і температури пасти залежно від часу сушіння.

Література

1. Муштаєв В.І. Сушіння дисперсних матеріалів в хімічній промисловості / Плановський О.М., Муштаєв В.І., Ульянов В.М. // Москва: Хімія. – 1979. – 263 с.

2. Марчевський В.М. Процес сушіння наповнювача паперового полотна / Марчевський В.М., Гробовенко Я.В. // Вісник Національного технічного університету України «КПІ», Хімічна інженерія екологія та ресурсозбереження. – 2013. – № 1.