

3. Dytneriskij, I.Ju. (1991). *Osnovnye processy i apparaty himicheskoy tehnologii* [Basic processes and apparatuses of chemical technology]. Posobie po proektirovaniyu. Moscow, Himija. 496 s. Bibliogr. S. 166-180. – ISBN 5-7245-0133-3
4. Kovalyuk, D.O. (2015). “Porivnyannya system keruvannya z riznymy typaramy rehulyatoriv” [Elektronnyy resurs]. *Naukovi pratsi Vinnyts'koho natsional'noho tekhnichnoho universytetu*. no. 1.

УДК 676.04.02

МАРЧЕВСЬКИЙ В. М., к.т.н., проф.; ГРОБОВЕНКО Я. В., аспірант; ВІЗЕРСЬКИЙ Д. С., магістрант  
Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут»

## 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 вологи 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  $\lambda$ . 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  $\alpha$ , Вт/м<sup>2</sup>К дорівнює:

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

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

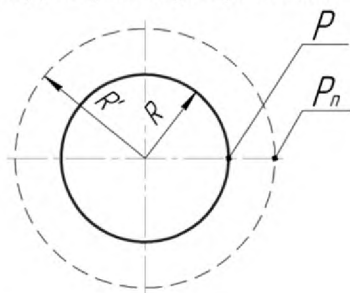
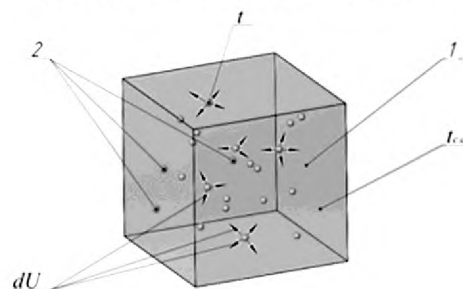


Рис. 1 – Частинка діоксиду титану



1 – сушильний агент; 2 – частинки  $\text{TiO}_2$

Рис. 2 – Виділений об'єм теплоносія з частинками  $\text{TiO}_2$

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

Кількість теплової енергії, що витрачається на нагрівання тонкодисперсних частинок:

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

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

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,  $\text{Дж}/\text{кг}\cdot\text{К}$ ;  $\alpha$  – 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,  $\text{м}^2$ ;  $t_{\text{с.а.}}$  – температура сушильного агента,  $\text{К}$ ;  $t$  – поточна температура частинки  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{К}$ ;  $\tau$  – час сушіння,  $\text{с}$ ;  $U$  – 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:

$$\frac{dU}{d\tau} = -KF_{\text{част}} \frac{P_s(1-\varphi)}{dR}, \quad \frac{1}{\dot{n}} \quad (6)$$

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

На основі розглянутих залежностей сформульовано математичне описання процесу сушіння тонкодисперсних часток  $\text{TiO}_2$  в потоці теплоносія:

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

Запишемо початкові умови до системи рівнянь 7:

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

де  $d_0$  – діаметр частинок діоксиду титану, м;  $U_0$  – початковий вологовміст частинок, кг<sub>в</sub>/кг<sub>а.с.м.</sub>;  $t_0$  – 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 кг<sub>в</sub>/кг<sub>а.с.м.</sub> за дві секунди при початковій температурі теплоносія 150 °С.

Із рисунку 4 видно що температура сушильного агента зменшується від початкової 150 °С до 107 °С, в той час як температура частинки зростає від початкової 50 °С до 107 °С.

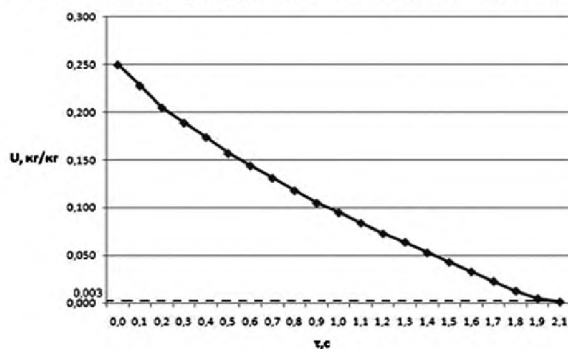
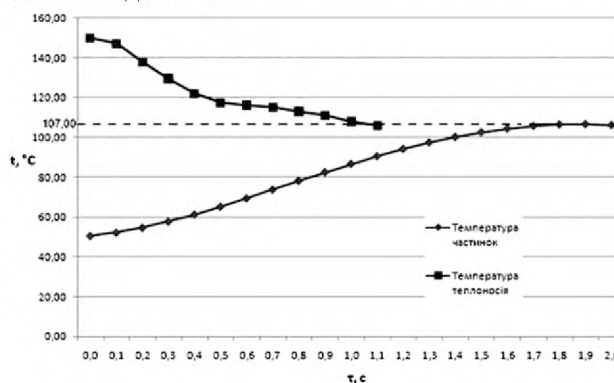


Рис. 3 – Залежність  $U = f(\tau)$



1 – залежність температури сушильного агента 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  $\text{TiO}_2$  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 агломератів 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

Marchevskiy, V. M., Grobovenko Y. V., Vizerskiy D. S.

#### DRYING OF FINE PARTICLES TITANIUM OXID

The authors proposed a physical model and a mathematical description of drying of fine particles of titanium dioxide  $\text{TiO}_2$  in the flow of coolant. The solution of mathematical description in the form of moisture and temperature

dependencies  $TiO_2$  particles and carrier of drying time and the basic parameters of the need for further experimental studies and design of industrial drying equipment.

Drying is the final stage of production of  $TiO_2$  and characterized by large power consumption. The general scientific problem is to reduce the cost of thermal energy in the drying process. We know that it is spent on drying up to 25 % of global energy production. In modern conditions where increased energy use and, consequently, there is shortage of energy resources increasingly urgent question raised energy efficiency. Despite the already established principles of energy saving technology and drying technology, there is no unique solution implementation. Therefore the problem of solving problems of heat energy in obtaining dry fine powders is the actual goal and forms these studies.

Drying is a transient and a thermo-diffusion process where moisture content of material temperature and coolant change over time, so the development of optimal regimes drying and rational designs dryers should be aware of the specific kinetic laws governing the process and conditions of the simulation.

The calculation of the mathematical description of the process of final drying of fine particles of  $TiO_2$  in the vortex flow of carrier proves that the removal of moisture adsorption limiting the effectiveness of the drying process. To intensify the drying and increased residual dry material necessary to increase the size of the heat flux drying agent.

**Keywords:** fine, particle, drying, model, physical model, process, powder, titanium dioxide.

#### References

1. Marchevskiy, V.M. and Grobovenko, Y.V. (2016). "The drying process of titanium dioxide", *International scientific journal*, no. 5, pp. 22–25.
2. Malakhov, M.M., Diachenko, S.V., Papush, E.G. and Klymenchuk, O.A. (2005). "Mathematical model of dry dispersed product in the active hydrodynamic layer", *Proc. of the higher education institutions. Food technology*, no. 2–3, pp. 97–102.
3. Ivanov, Y.H. (2012). "The drying fine material in the fluidized bed", *M.: Energy*, 126 p.
4. Aleksanyan, Y.Y., Tytova, L.M., Nuhmanov, A.K. (2014). "Simulation process of drying particulate material in a fluidized bed", *Technique and technology of food production*, no. 3 (34), pp. 96–100.
5. Dmytryev, V.M., and Serheeva, E.A. (2013). "Convective drying of polydisperse materials in devices swirling weighted layer", *Journal of Tambov State Technical University*, no. 3, pp. 602–606.

УДК 669.715:621.745.012

ПАНОВ Є. М., д.т.н., проф.; БОЖЕНКО М. Ф., к.т.н., доц.;  
ДАНИЛЕНКО С. В., к.т.н., с.н.с.; БОЯНІВСЬКИЙ В. П., магістрант

Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

## ОПТИМІЗАЦІЯ КОНСТРУКЦІЇ ПЕЧЕЙ ДЛЯ ПЕРЕПЛАВКИ АЛЮМІНІЄВОГО БРУХТУ

Наведені результати розрахунків енергетичної ефективності печі місткістю 6 т, потужністю 600 кВт, для переплавки алюмінієвого брухту. Показано, що заміна теплоізоляції з пінодіатоміта на силікат кальція, а також влаштування двох форкамер замість однієї та зменшення терміну їх відкриття призводить до зменшення витрат теплоти в циклі плавки приблизно у 2 рази. Виконані розрахунки енергетичної та економічної ефективності перевodu печі з електричного нагріву на газовий, при цьому для газового нагріву витрати зменшуються на 9–10 % порівняно з електричним. Розроблена конструкція печі з нахиленим склепінням, для якої порівняно з традиційним зменшується термін плавки у середньому на 11 %, а ККД підвищується на 7 %.

**Ключові слова:** піч, алюмінієвий брухт, огороження, теплоізоляція, термін плавки, теплота, енергетична ефективність, електричний і газовий нагрів, ККД.

© Панов Є. М., Боженко М. Ф., Даниленко С. В., Боянівський В. П., 2017.

**Постановка проблеми та аналіз попередніх досліджень.** Стационарні печі, які споруджуються на алюмінієвих заводах для переплавки алюмінієвого брухту, конструктивно не відрізняються від міксерів для приготування до лиття алюмінію або його сплавів [1–4]. Такі печі можуть працювати на двох видах обігріву