

# Теплофизические основы энергетических процессов

УДК 676.04.02

**Марчевський В.М., канд. техн. наук, проф., Гробовенко Я.В.**  
**Національний технічний університет України «Київський політехнічний**  
**інститут імені Ігоря Сікорського», Київ**  
*просп. Перемоги, 37, 03056 Київ, Україна, e-mail: ygrobovenko@gmail.com*

## Кінетика процесу сушіння пасти діоксиду титану в сушильному вихровому апараті та отримання тонкодисперсного порошку $TiO_2$

Обґрунтовано фізичну модель процесів сушіння пасти діоксиду титану та досушування тонкодисперсного порошку  $TiO_2$  до залишкової вологості 0,3 %. На її основі розвинено математичну модель процесу сушіння. Результатом розв'язку математичної моделі є кінетичні параметри процесу сушіння, за допомогою яких було розроблено, спроектовано та виготовлено сушильний апарат вихрового типу. Результати моделювання перевірено експериментальними дослідженнями процесів сушіння та досушування пасти  $TiO_2$ . Отримано дослідні графічні залежності зміни швидкості сушіння та температури продукту від часу сушіння. Проаналізовано ці залежності та встановлено необхідні початкові параметри теплоносія, які дають можливість збільшити швидкість сушіння та зменшити енергозатрати на проведення процесу сушіння. Отриманий тонкодисперсний порошок діоксиду титану відповідає вимогам державних стандартів та має необхідні механічні та споживчі властивості. *Бібл. 10, рис. 7.*

**Ключові слова:** сушіння, моделювання, теплоносій, діоксид титану, сушильний апарат, вологовміст, кінетика.

### Постановка проблеми

Процес сушіння пасти діоксиду титану є найбільш енергоємним та лімітуючим процесом у технології виробництва  $TiO_2$ . Він вимагає зменшення витрат теплової енергії на сушіння пасти даного продукту, збільшення швидкості сушіння, підвищення якості та забезпечення низької залишкової вологості готового продукту. Тому дослідження процесу сушіння пасти  $TiO_2$  та розробка нового високоефективного та енергоощадного обладнання для отримання продукту  $TiO_2$  з високими заданими механічними та споживчими властивостями є актуальною задачею.

### Аналіз останніх досліджень та публікацій

Теоретичним моделюванням тепломасообмінних процесів у сушильних апаратах з киплячим шаром займалися Pugsley T. [1], Costa I. [2] та Adamiec J. [3]. Вплив гідродинаміки вихрових потоків у двохфазних системах на геометрію тепломасообмінного обладнання розглядався у роботах [4, 5]. Аналіз фізичної моделі та рішень математичного описання процесу сушіння тонкодисперсних паст, зроблений у нашій роботі [6], Малаховим М.М. [7], Івановим І.Г. [8] та Алексаняном І.Ю. [9], показав, що на процес сушіння пасти має істотний

вплив швидкісній режиму вихрових потоків теплоносія, час перебування продукту в сушильній камері, початкові параметри теплоносія та ступінь подрібнення агломератів продукту. Однак у перелічених роботах не розглядалося моделювання процесів сушіння та досушування діоксиду титану, визначення коефіцієнту сушіння та швидкостей сушіння  $TiO_2$ .

**Мета дослідження** — провести теоретичне моделювання процесів сушіння та досушування пасти діоксиду титану, отримати основні кінетичні параметри, які експериментально підтвердити на оригінальному сушильному вихровому апараті.

### Викладення основного матеріалу

В сучасних умовах у технології отримання дрібнодисперсного порошку діоксиду титану лімітуючим та найбільш енергоємним процесом є сушіння пасти. Важливо, щоб залишкова сухість порошку діоксиду титану складала не менше 99,7 %. На досягнення такої величини сухості необхідно затратити значну енергію, а також застосовувати відповідний сушильний апарат, будова та принцип дії якого має забезпечити необхідне подрібнення частинок пасти до утворення

дрібнодисперсного порошку, а також його досушування до високої кінцевої сухості та сепарування від сушильного агента. Важливо, щоб разом із процесом сушіння відбувався інтенсивний процес подрібнення гранул матеріалу до отримання дрібнодисперсного порошку.

Процес сушіння тонкодисперсної пасти діоксиду титану має дві основні стадії. На першій стадії відбувається диспергування пасти з додаванням підсушеного порошку та висушування поверхневої вологи. На другій стадії відбувається досушування дрібнодисперсного порошку в потоці теплоносія до кінцевої залишкової сухості 99,7 %. Такий спосіб сушіння можна здійснити в сушильній установці (рис.1) [10], схема якої показана на рис.2.

Сушильний агент у кількості  $Q$ ,  $m^3/c$ , подається через патрубок 1 у дифузор 2, який розподіляє потоки теплоносія та направляє їх у диспергатор 3, де потоки закручуються у вихровий потік за напрямком обертання ножів. Одночасно у верхню частину сушильної камери (рис.2) тангенційно вводиться через патрубок 8 сушильний агент у кількості  $mQ$ ,  $m^3/c$ , ( $m$  — коефіцієнт подачі теплоносія у зону С) на досушування тонкодисперсних частинок матеріалу. Вологий ма-

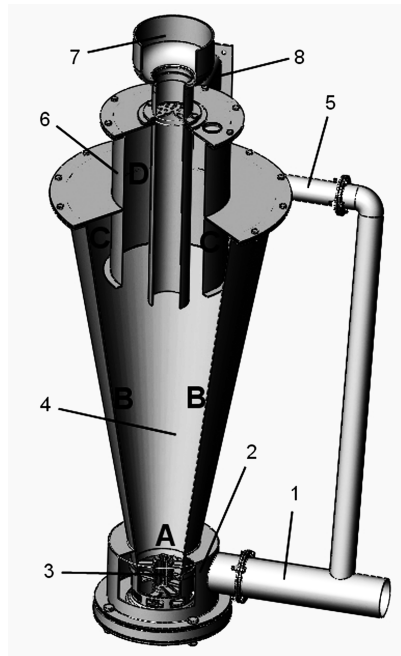


Рис.1. Сушильний апарат вихрового типу: 1 — основний патрубок подачі сушильного агента; 2 — дифузор; 3 — диспергатор; 4 — конусоподібна сушильна камера; 5 — патрубок подачі сушильного агента для досушування; 6 — рукавний фільтр; 7 — система подачі вологих дисперсій; 8 — вихідний патрубок; А — зона диспергування; В — зона розділення фракцій; С — зона інтенсивного досушування; D — зона сепарування.

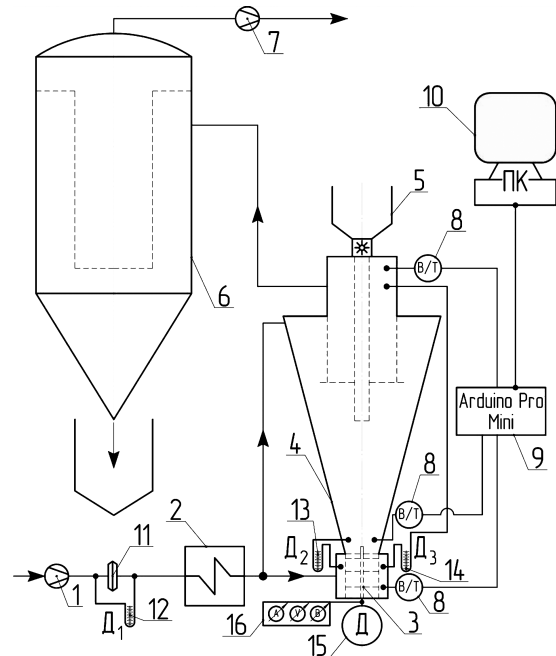


Рис.2. Схема сушильної установки: 1 — нагнітаючий вентилятор; 2 — калорифер; 3 — диспергатор; 4 — сушильна камера; 5 — живильник-дозатор; 6 — рукавний фільтр; 7 — витяжний вентилятор; 8 — датчик температури та вологості MLX90614; 9 — мікроконтролер Arduino Pro Mini; 10 — комп'ютер для візуалізації та збереження даних; 11 — діафрагма; 12, 13, 14 — дифманометри; 15 — електропривід; 16 — вимірювальний комплекс типу K50 № 1654.

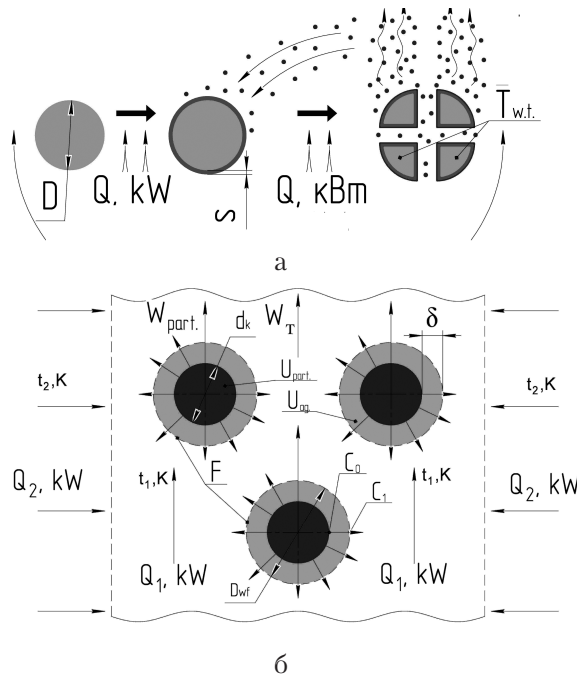


Рис.3. Фізична модель сушіння агломератів пасти  $\text{TiO}_2$  (а) та досушування тонкодисперсних частинок  $\text{TiO}_2$  (б).

теріал подається у середину сушильної камери 4 за допомогою системи подачі 7. У результаті два потоки зустрічаються у сушильній камері, утворюється загальний закручений вихровий потік сушильного агента та частинок вологого матеріалу.

Вихровий потік теплоносія відіграє важливу роль у проведенні тепломасообмінних процесів між двома фазами системи, винесенні із зони диспергування кондиційного матеріалу та направлення його в зону досушування, опудренні поверхні агломератів вологого матеріалу вже висушеним порошком та транспортуванні тонких дисперсій між зонами А і В сушильного апарату.

У першій зоні А відбувається диспергування тонкодисперсного матеріалу із додаванням підсушеного порошку та висушування поверхневої вологи. У другій, пристінній, зоні В відбувається розділення твердої фракції за рахунок відцентрової сили, що відкидає важкі частинки на конусоподібну поверхню сушильної камери, які переміщуються знову в зону диспергування А. Далі вже підсушений тонкодисперсний матеріал переміщується у зону досушування С, після чого потрапляє у зону сепарації D.

Процес сушіння та досушування пасти  $\text{TiO}_2$  має такі стадії (див. рис.1, рис.3):

– подача тиксотропної пасти діоксиду титану у вигляді сформованих окремих кластерів

частинок  $\text{TiO}_2$ , що з'єднані між собою силами поверхневого натягу, у зону вихрового шару А;

– контакт та припудрювання поверхні кластерів із вже підсушеним продуктом;

– інтенсивне висушування поверхневої вологи матеріалу з одночасним безперервним їх подрібненням у зоні А за допомогою ножового диспергатора;

– винесення дрібних частинок продукту із зони А в сепараційну зону В вихровим потоком теплоносія при зменшенні осьової складової швидкості;

– досушування у зоні С адсорбційно зв'язаної вологи та сепарація у зоні D тонкодисперсних частинок до низької залишкової вологості 0,3 %.

Математичне описання фізичної моделі процесу сушіння  $\text{TiO}_2$ , складене на основі рівняння теплової енергії, основного рівняння масовиддачі [5] та закону подрібнення [6], можна представити такою системою рівнянь:

$$\begin{cases} \frac{\partial t_{\text{част}}}{\partial \tau} = \alpha \frac{\partial F_{\text{част}}}{\partial \tau} \cdot \frac{t_{c,a} - t_{\text{част}}}{G_{a,c,n} \cdot (c_{a,c,n} + c_{\theta} \cdot U)} - \frac{\frac{\partial U}{\partial \tau} \cdot r}{c_{a,c,n} + c_{\theta} \cdot U} \\ \frac{\partial U}{\partial \tau} = \beta \frac{\partial F_{\text{част}}}{\partial \tau} \cdot \frac{P_s \cdot (1 - \varphi)}{P_{\text{атм}}} - D \sum F_{\text{част}} \cdot \frac{\partial C}{\partial R} \\ \frac{\partial F_{\text{част}}}{\partial \tau} = kz \end{cases}$$

де  $t_{\text{част}}$  – температура частинки,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $\tau$  – час сушіння, с;  $\alpha$  – коефіцієнт масовиддачі від теплоносія до поверхні частинки,  $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{K})$ ;  $F_{\text{част}}$  – зовнішня поверхня частинки,  $\text{м}^2$ ;  $t_{c,a}$  – температура сушильного агента,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $G_{a,c,n}$  – витрати абсолютно сухого порошку діоксиду титану,  $\text{кг}/\text{с}$ ;  $c_{a,c,n}$  – питома теплоємність порошку діоксиду титану,  $\text{Дж}/(\text{кг} \cdot \text{K})$ ;  $c_{\theta}$  – питома теплоємність води,  $\text{Дж}/(\text{кг} \cdot \text{K})$ ;  $U$  – вологовміст пасти діоксиду титану,  $\text{кг}_B/\text{кг}_{a,c,n}$ ;  $\frac{\partial U}{\partial \tau}$  – швидкість сушіння,  $\text{с}^{-1}$ ;  $r$  – питома теплота пароутворення,  $\text{Дж}/\text{кг}$ ;  $\beta$  – коефіцієнт масовиддачі від теплоносія до поверхні частинки,  $\text{м}/\text{с}$ ;  $P_s$  – тиск насиченої пари,  $\text{Па}$ ;  $R$  – еквівалентний діаметр частинки пасти діоксиду титану,  $\text{м}$ ;  $\varphi$  – відносна вологість теплоносія, %;  $P_{\text{атм}}$  – атмосферний тиск,  $\text{Па}$ ;  $D$  – коефіцієнт молекулярної дифузії,  $\text{м}/\text{с}$ ;  $w$  – швидкість сушильного агента (повітря),  $\text{м}/\text{с}$ ;  $\nu_{c,a}$  – кінематична в'язкість сушильного агента,  $\text{м}^2/\text{с}$ ;  $\frac{\partial C}{\partial R}$  – рушійна сила процесу досушування,  $\text{м}^{-1}$ ;  $k$  – коефіцієнт подрібнення;  $z$  – ступінь подрібнення.

Початкові умови для даної системи рівнянь:

$$u|_{\tau=0} = u_0, u_2 = u_{1\text{кр}}, \tau_0 = 0, t_0 = t_1, d_0 = 1 \text{ мм.}$$

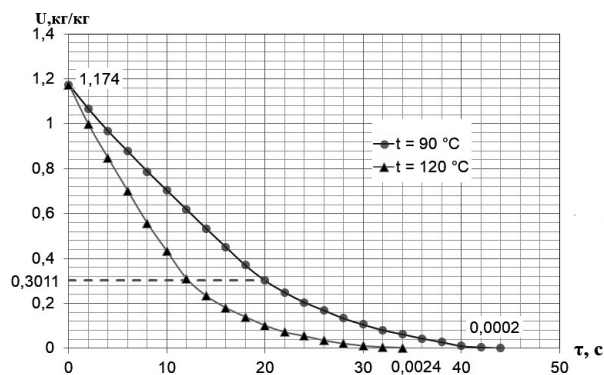


Рис.4. Залежність вологовмісту  $U$  пасти  $\text{TiO}_2$  від часу сушіння  $\tau$ .

Залежність вологовмісту від часу показує, що процес сушіння пасти має період нагрівання до температури мокрого термометра, період постійної швидкості сушіння, що протікає від  $U_1 = 1,174 \text{ кг}_\text{в}/\text{кг}_\text{а.с.м}$  до  $U_{1\text{кр}} = 0,3011 \text{ кг}_\text{в}/\text{кг}_\text{а.с.м}$ , та період спадаючої швидкості сушіння від  $U_{1\text{кр}} = 0,3011 \text{ кг}_\text{в}/\text{кг}_\text{а.с.м}$  до  $U_{2\text{кр}} = 0,0002 \text{ кг}_\text{в}/\text{кг}_\text{а.с.м}$ .

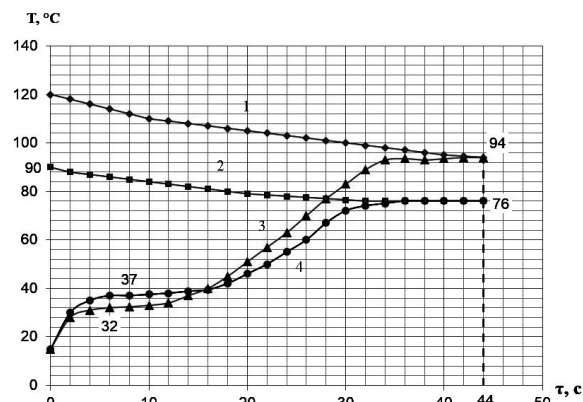


Рис.5. Залежність температури  $t$  теплоносія (1, 2) та продукту (3, 4) від часу сушіння  $\tau$  при початковій температурі  $120 \text{ °C}$  (1, 3) та  $90 \text{ °C}$  (2, 4).

З рис.4 видно, що лімітуючою стадією процесу сушіння є період спадаючої швидкості, у якому висушується адсорбована волога. Основний процес сушіння пасти починається від значення початкового вологовмісту пасти  $U_1 = 1,174 \text{ кг}_\text{в}/\text{кг}_\text{а.с.м}$ , завершується значенням  $U_{1\text{кр}} = 0,3011 \text{ кг}_\text{в}/\text{кг}_\text{а.с.м}$  та характеризується постійною швидкістю сушіння.

Процес досушування тонкодисперсних частинок  $\text{TiO}_2$  до рівноважного вологовмісту  $U_p = 0,002 \text{ кг}_\text{в}/\text{кг}_\text{а.с.м}$  відбувається у другому періоді сушіння при падаючій швидкості сушіння.

З рис.4 видно, що одна й та ж кількість пасти діоксиду титану при початковій температурі теплоносія  $120 \text{ °C}$  набуває рівноважного вологовмісту через 34 с після початку сушіння, а при  $90 \text{ °C}$  — через 44 с. На графічних залеж-

ностях чітко простежується перший та другий періоди сушіння ( $U_{1\text{кр}} = 0,3011 \text{ кг}_\text{в}/\text{кг}_\text{а.с.м}$ ).

З рис.5 видно, що температура мокрого термометра продукту складає  $32$  та  $37 \text{ °C}$  при початковій температурі теплоносія  $90$  та  $120 \text{ °C}$  відповідно. На графіках простежується ділянка постійної температури (температури мокрого термометра продукту), що відповідає ділянці першого періоду сушіння, коли швидкість сушіння є сталою.

Експериментальні дослідження процесів сушіння та досушування тонкодисперсної пасти діоксиду титану були проведені при об'ємних витратах теплоносія  $50 \text{ м}^3/\text{год}$ , початкових температурах  $90$  та  $120 \text{ °C}$ , початковій вологості пасти  $\text{TiO}_2$   $54 \%$ . Порівняння експериментальних та теоретичних результатів значень зміни вологовмісту та температури продукту від часу сушіння представлено на рис.6, 7.

Для теоретичних та експериментальних значень вологовмісту продукту розраховано середнє квадратичне відхилення:

$$\sigma_U = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (U_i - U)^2} = 0,05 \text{ кг}_\text{в}/\text{кг}_\text{а.с.м}.$$

Відповідно коефіцієнт кореляції для значень вологовмісту становить  $\rho_U = 92 \%$ .

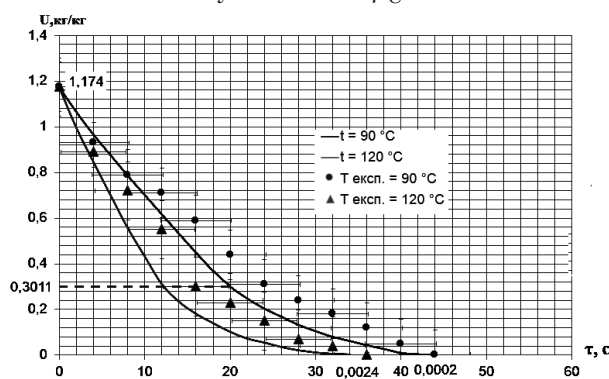


Рис.6. Порівняння теоретичних та експериментальних значень вологовмісту пасти діоксиду титану від часу сушіння.

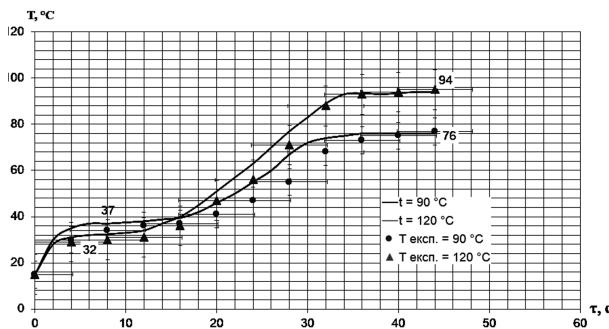


Рис.7. Порівняння теоретичних та експериментальних значень температури пасти діоксиду титану від часу сушіння.

Середнє квадратичне відхилення теоретичних та експериментальних значень температури продукту становить:

$$\sigma_T = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (T_i - T)^2} = 4,13 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Відповідно коефіцієнт кореляції для значень вологовмісту становить  $\rho_T = 96 \%$ .

Аналіз отриманих результатів процесів сушіння та досушування тонкодисперсних частинок  $\text{TiO}_2$  у вихровому потоці теплоносія показує, що видалення адсорбційної вологи обмежує ефективність процесу сушіння (див. рис.6, 7). Для інтенсифікації сушіння та збільшення залишкової сухості кінцевого продукту необхідно збільшувати величину густини теплового потоку теплоносія та поверхню контакту агломератів пасти діоксиду титану з теплоносієм багаторазовим та безперервним подрібненням агломератів продукту.

### Висновки

Встановлено кінетичні параметри процесів сушіння та досушування тонкодисперсної пасти діоксиду титану у вихровому сушильному апараті, достовірність значень яких підтверджена експериментальними дослідженнями.

Результати дослідження тепломасообміну процесу сушіння засвідчують:

– фізична модель процесів сушіння та досушування тонкодисперсної пасти  $\text{TiO}_2$  обґрунтована вірно та описує дійсні процеси, які відбуваються у сушильній камері апарату;

– рішення математичної моделі процесів сушіння та досушування пасти  $\text{TiO}_2$  надало можливість визначити вологовміст та температуру продукту, що залежать від часу сушіння, а також час сушіння продукту, швидкість сушіння та коефіцієнт сушіння;

– математична модель перевірена на адекватність експериментальними дослідженнями процесів сушіння та досушування пасти діоксиду титану з використанням сушильного апарату вихрового типу. Коефіцієнти кореляції експериментальних та теоретичних значень становлять  $\rho_U = 92 \%$  та  $\rho_T = 96 \%$  відповідно;

– отримані результати дають можливість скласти алгоритм розрахунку промислового сушильного апарату, при якому енергозатрати на проведення процесів сушіння будуть у 2,5 рази менші порівняно із аналогами.

### Список літератури

1. Pugsley T., Milne B., Berruti F. An innovative non-mechanical solids feeder for high solids mass fluxes in circulating fluidized beds. *Powder Technology Journal*. 1996. № 2. С. 123–131.
2. Costa I., Ferreira M., Freire J. Analysis of regime transitions and flow instabilities in vertical conveying of coarse particles using different solids feeding systems. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*. 2004. № 3. С. 48–59.
3. Adamiec J. Drying of waste sludges in a fluidized bed dryer with a mixer. *Drying Technology*. 2002. № 20. С. 839–847.
4. Склабінський В.І., Артюхов А.Є., Маренок В.М. Вплив гідродинамічного режиму обробки на міцність гранул пористої аміачної селітри (ПАС). Збірник наукових праць. Херсон : ПП Вишемирський В.С., 2007. С. 83–85.
5. Марчевський В.М., Гробовенко Я.В. Процес сушіння наповнювача паперового полотна. *Вісник Національного технічного університету України «КПІ». Сер. Хімічна інженерія, екологія та ресурсозбереження*. 2013. № 1.
6. Марчевський В.М., Гробовенко Я.В. Процес сушіння діоксиду титану. *Міжнародний науковий журнал*. 2016. № 5. С. 22–25.
7. Малахов М.М., Дяченко С.В., Папуш Е.Г., Клименчук О.А. Математична модель сушіння дисперсних продуктів в активному гідродинамічному шарі. *Вісті вищих навчальних закладів. Харчова технологія*. 2005. № 2–3. С. 97–102.
8. Иванов И.Г. Сушка мелкодисперсных материалов в кипящем слое. М. : Энергия, 2012. 126 с.
9. Алексанян И.Ю., Титова Л.М., Нугманов А.Х. Моделирование процесса сушки дисперсного материала в кипящем слое. *Техника и технология пищевых производств*. 2014. № 3. С. 96–100.
10. Пат. 108688 Укр., МПК F 26 B 17/10 (2006.01). Апарат для сушіння пастоподібних матеріалів / Я.В.Гробовенко, В.М.Марчевський; Заявлено 09.02.2016; Надруковано 25.07.2016, Бюл. № 14, 2016 р.

Надійшла до редакції 17.09.18

**Марчевский В.М.**, канд. техн. наук, проф., **Гробовенко Я.В.**  
**Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского»**, Киев  
просп. Победы, 37, 03056 Киев, Украина, e-mail: ygrobovenko@gmail.com

## **Кинетика процесса сушки пасты диоксида титана в сушильном вихревом аппарате и получение тонкодисперсного порошка $TiO_2$**

Обоснована физическая модель процессов сушки пасты диоксида титана и досушивания тонкодисперсного порошка  $TiO_2$  до остаточной влажности 0,3 %. На ее основе развита математическая модель процесса сушки. Результатом решения математической модели являются кинетические параметры процесса сушки, с помощью которых был разработан, спроектирован и изготовлен сушильный аппарат вихревого типа. Результаты моделирования проверены экспериментальными исследованиями процессов сушки и досушивания пасты  $TiO_2$ . Получены опытные графические зависимости изменения скорости сушки и температуры продукта от времени сушки. Проанализированы эти зависимости и установлены необходимые начальные параметры теплоносителя, позволяющие увеличить скорость сушки и уменьшить затраты энергии на проведение процесса сушки. Полученный тонкодисперсный порошок диоксида титана соответствует требованиям государственных стандартов и обладает необходимыми механическими и потребительскими свойствами. *Библ. 10, рис. 7.*

**Ключевые слова:** сушка, моделирование, теплоноситель, диоксид титана, сушильный аппарат, влагосодержание, кинетика.

**Marchevskii V.M.**, Candidate of Technical Sciences,  
**Grobovenko Ya.V.**

**National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute»**, Kiev

37, Peremohy Ave., 03056 Kiev, Ukraine, e-mail: ygrobovenko@gmail.com

## **Kinetics of the Drying Process of Titanium Dioxide Paste in the Vortex Drying Apparatus and Obtaining Disperse $TiO_2$ Powder**

The authors of the article justified the physical model of the drying process of titanium dioxide paste and the drying of  $TiO_2$  fine powder to a residual moisture content of 0.3%, on the basis of which a mathematical model of the drying process is developed. The result of solving the mathematical model is the kinetic parameters of the drying process, with the help of which the drying apparatus of the vortex type was designed, designed and manufactured. The results of the simulation were verified by experimental studies of the drying and drying of  $TiO_2$  paste, and experimental graphical dependences of the drying rate and product temperature on the drying time were obtained. The obtained dependences are analyzed and the necessary initial parameters of the coolant are established, which allow increasing the drying rate and reducing energy costs for the drying process. As a result of the experiments, the fine powder of titanium dioxide fits the requirements of state standards and possesses the necessary mechanical and consumer properties. *Bibl. 10, Fig. 7.*

**Key words:** drying, modeling, coolant, titanium dioxide, drying apparatus, moisture content, kinetics.

## References

1. Pugsley T., Milne B., Berruti F. An innovative non-mechanical solids feeder for high solids mass fluxes in circulating fluidized beds. *Powder Technology Journal*. 1996. No. 2. pp. 123–131.
2. Costa I., Ferreira M., Freire J. Analysis of regime transitions and flow instabilities in vertical conveying of coarse particles using different solids feeding systems. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*. 2004. No. 3. pp. 48–59.
3. Adamiec J. Drying of waste sludges in a fluidized bed dryer with a mixer. *Drying Technology*. 2002. No. 20. pp. 839–847.
4. Sklabins'kiy V.I., Artyukhov A.Ye., Marenok V.M. Vpliv gidrodinamichnogo rezhimu obrobiti na mitnist' granul poristoї amiachnoї selitri. (PAS) [Influence of the hydrodynamic treatment regime on the strength of granules of porous ammonium nitrate]. *Zbirnik naukovikh prats. Kherson : PP Vishemir'skiy V.S.*, 2007. pp. 83–85. (Ukr.)
5. Marchev'skiy V.M., Grobovenko Ya.V. Protse sushinnya napovnyuvacha paperovogo polotna. [The process of drying the filler of a paper cloth]. *Visnik Natsional'nogo tekhnichnogo universitetu Ukraїni «KPI»*. Ser. *Khimichna inzheneriya ekologiya ta resursozberzhennya* [Bulletin of the National Technical University of Ukraine «KPI». *Chemical Engineering, Ecology and Resource Conservation*]. 2013. No. 1.
6. Marchev'skiy V.M., Grobovenko Ya.V. Protse sushinnya dioksidu titanu [The process of drying titanium dioxide]. *Mizhnarodniy naukoviy zhurnal [International scientific journal]*. 2016. No. 5. pp. 22–25. (Ukr.)
7. Malakhov M.M., Dyachenko S.V., Papush E.G., Klimenchuk O.A. Matematichna model' sushinnya dispersnikh produktiv v aktivnomu gidrodinamichnomu shari [Mathematical model of drying of disperse products in an active hydrodynamic layer]. *Visti vishchikh navchal'nikh zakladiv. Kharchova tekhnologiya [Students of higher educational institutions. Food Technology]*. 2005. No. 2–3. pp. 97–102. (Ukr.)
8. Ivanov I.G. Sushka melkodispersnykh materialov v kipiyashchem sloe [Drying of Fine Materials in a Fluidized Bed]. Moscow : Energiya, 2012. 126 p. (Rus.)
9. Aleksanyan I.Yu., Titova L.M., Nugmanov A.Kh. Modelirovanie protsessa sushki dispersnogo materiala v kipiyashchem sloe [Modeling the drying process of a dispersed material in a fluidized bed]. *Tekhnika i tekhnologiya pishchevykh proizvodstv. [Technique and technology of food production]*. 2014. No. 3. pp. 96–100. (Rus.)
10. Pat. 108688 Ukr., MPK F 26 B 17/10 (2006.01). Aparat dlja sushinnja pastopodibnih materialiv [Apparatus for drying paste-like materials]. Grobovenko Ya.V., Marchevskij V.M.; Claimed 09.02.2016; Publ. 25.07.2016, Bul. 14.

Received September 17, 2018

УДК 662.611.2:662.613:66.074.6

**Колесник В.В.<sup>1</sup>**, канд. техн. наук, **Орлик В.М.<sup>2</sup>**, канд. техн. наук,  
**Жайворонок В.А.<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> *Державний університет інфраструктури та технології, Київ*  
*вул. Кирилівська, 9, 04071 Київ, Україна, e-mail: kolesnyk@email.ua*

<sup>2</sup> *Інститут газу НАН України, Київ*  
*вул. Дегтярівська, 39, 03113 Київ, Україна, e-mail: orlykvol@gmail.com*

## Термодинамічна оцінка використання карбонатних сорбентів у сухих методах десульфуризації димових газів

Проведено порівняльний аналіз енерговитрат у процесі спалювання твердого палива, що містить сірчані сполуки, при одночасній подачі безпосередньо у топковий простір котла карбонатних сорбентів ( $\text{CaCO}_3$ ,  $\text{Ca(OH)}_2$ ,  $\text{CaO}$ ) для поглинання утвореного діоксиду сірки, як це має місце у сухих методах десульфуризації димових газів. Розрахунки проведено при подачі сорбентів у стехіометричному співвідношенні та з потрібним надлишком сорбенту. Показано, що енергетичні витрати на розкладання та підігрів  $\text{CaCO}_3$  та  $\text{Ca(OH)}_2$  або лише підігрів  $\text{CaO}$  при застосуванні їх у процесі сухої десульфуризації практично компенсуються за рахунок вторинних реакцій зв'язування діоксиду сірки. Запропоновано простий та придатний для практичних цілей метод визначення температури стаціонарного стану при одночасному перебігу процесів горіння вугілля та хемосорбції діоксиду сірки карбонатними сорбентами, що суттєво для вибору температурного діапазону, в якому активно поглинається сірка без розкладання утвореного  $\text{CaSO}_4$ . *Бібл. 6, рис. 3, табл. 1.*

**Ключові слова:** десульфуризація димових газів, вапняк, вапно, термодинамічний аналіз.