

УДК 66-5:66.074.38

КОВАЛЮК Д. О., к.т.н., доц.; КАБАНОВА А. Е., магістрант
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

МОДЕЛЮВАННЯ АБСОРБЦІЇ ЗА УМОВ НЕВИЗНАЧЕНОСТІ

Проаналізовано технологічний процес одержання окису етилену. Отримано математичну модель абсорбера, що враховує технічні засоби системи керування. Показано необхідність враховувати зміну параметрів об'єкту в процесі його експлуатації. Виконано моделювання абсорбера за різних значень площі поверхні масообміну. Наведена програмна реалізація та результати моделювання системи керування в пакеті Matlab.

Ключові слова: абсорбер, моделювання, невизначеність, система керування.

© Ковалюк Д. О., Кабанова А. Е., 2017.

Вступ. Процес одержання окису етилену прямим окисленням етилену є досить важливим і поширеним в сучасній промисловості. Його провадять у два ступені. Спочатку суміш етилену і повітря нагнітається в контактний реактор першого ступеня. З продуктів реакції, що охолоджуються у холодильнику, окис етилену добувають водою в абсорбері 1-го ступеня, де утворюється 50 % водний розчин окису етилену, а частину газів, що не прореагували, повертають у контактний реактор. Решта газу відправляють у контактний реактор другого ступеня. З контактних газів 2-го ступеня окислення окис етилену добувається у абсорбері другого ступеня, де утворюється 70 % водний розчин окису етилену. З абсорберів водний розчин через теплообмінник направляють у відпарну колону. Парогазова суміш з цієї колони надходить через дефлегматор в ректифікаційну колону. Остаточна очистка окису етилену від вуглекислого газу провадиться у роздільній колоні. Одержуваний цим методом продукт являє собою 95% окис етилену. Проаналізувавши основні стадії виробництва, можна зробити висновок про актуальність розробки системи керування процесом абсорбції.

Постановка проблеми та аналіз останніх досліджень. Для розробки якісної системи керування абсорбером необхідна математична модель об'єкту, яка б в повній мірі описувала його роботу. Як відомо [1, 2] така модель повинна враховувати компоненти системи керування, оскільки їх характеристики можуть суттєво впливати на динаміку об'єкту. В той же час необхідно також враховувати умови функціонування технологічних об'єктів та зміну їх конструктивних параметрів, що зумовлено строком експлуатації [3]. Метою статті – є підвищення точності моделювання абсорбера в процесі отримання етилену зарахунок врахування зміни його параметрів та технічних засобів. Для об'єктів, характеристики яких змінюються, сьогодні найбільш поширеним є застосування адаптивних або робастних систем [4, 5]. В рамках цього підходу передбачається створення моделей з «плаваючими» параметрами, що і пропонується в роботі.

Отримання математичної моделі абсорбера. Як було показано вище, одним з основних апаратів при одержанні окису етилену прямим окисленням етилену є абсорбер, схема якого зображена на рис. 1.

Враховуючи матеріальні баланси апарату, запишемо рівняння динаміки для водного розчину у наступному вигляді:

$$L(X_{\text{поч}} - X_{\text{кін}}) - K_p M_p F \frac{[X_{\text{кін}} - X_p(Y_{\text{поч}})] + [X_{\text{поч}} - X_p(Y_{\text{кін}})]}{2} = V_p \rho_p \frac{d}{dt} \left(\frac{X_{\text{поч}} + X_{\text{кін}}}{2} \right) \quad (1)$$

де L – витрата води; $X_{\text{поч}}$, $X_{\text{кін}}$ – початкова та кінцева масові концентрації окису етилену у воді; K_p – коефіцієнт масообміну; M_p – молярна маса води; $X_{\text{рез}}(Y_{\text{поч}}) = mY_{\text{поч}}$, $X_{\text{рез}}(Y_{\text{кін}}) = mY_{\text{кін}}$ – рівноважні концентрації окису етилену ($m=1,4$ – коефіцієнт розподілу), $Y_{\text{поч}}$, $Y_{\text{кін}}$ – початкова та кінцева об'ємні концентрації у газі, V_p – кількість рідини, ρ_p – густина рідини, F – поверхня масообміну в абсорбері.

Зміна кінцевої масової концентрації окису етилену досягається за рахунок зміни витрати води на вході в абсорбер, отже, каналом керування є $L - X_{\text{кін}}$.

Після лінеаризації, введення замінів і перетворення Лапласа, отримуємо рівняння наступного вигляду:

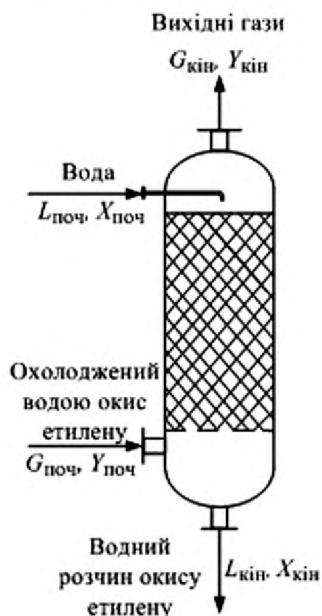
$$(T_{x1}p + 1)X_{\text{кін}}(p) = -k_{xy}Y_{\text{поч}}(p) - k_L L(p) \quad (2)$$

Із рівняння (2) отримуємо передатні функції по керуванню та збуренню:

$$W_{L \rightarrow X_{\text{кін}}}(p) = -k_L e^{-p\tau} / (T_{x1}p + 1) \quad (3)$$

$$W_{Y_{\text{поч}} \rightarrow X_{\text{кін}}}(p) = -k_{y0} / (T_{x1}p + 1) \quad (4)$$

Транспортне запізнення виникає в результаті того, що керуючий пристрій і регулюючий орган знаходяться не на самому об'єкті, а на деякій відстані від нього, тому при керуванні воно подіє не одразу, а з деякою затримкою.



$L_{\text{поч}}, L_{\text{кін}}$ – початкова та кінцева кількість води; $G_{\text{поч}}, G_{\text{кін}}$ – початкова та кінцева кількість окису етилену; $X_{\text{поч}}, X_{\text{кін}}$ – початкова та кінцева масова концентрація окису етилену у воді; $Y_{\text{поч}}, Y_{\text{кін}}$ – початкова та кінцева об'ємні концентрації окису етилену у газовій фазі.

Рис. 1 – Структурно-параметрична схема абсорбера

$$\begin{aligned} W_{\text{кер}}(p) &= W_{\text{вм}}(p) \cdot W_{L \rightarrow X_{\text{кін}}}(p) = -k_{\text{кер}} e^{-p\tau} / (T_{\text{кер}1} p^2 + T_{\text{кер}2} p + 1) = \\ &= -1,972 e^{-p\tau} / (0,315 p^2 + 15,021 p + 1) \end{aligned} \quad (7)$$

Врахування невизначеності параметрів. В результаті довготривалої експлуатації абсорбера, у внутрішній його частині з'являється наліт, корозія, осідають домішки газу, що призводить до зміни поверхні масообміну F . З цього можна зробити висновок про те, що модель апарату включає у себе невизначеність, яка представлена поверхнею масообміну F . Існують такі основні типи невизначеності: параметрична невизначеність, динамічна невизначеність, нелінійна невизначеність. Для нашого випадку присутня параметрична невизначеність.

Даний параметр входить до коефіцієнтів передатних функцій по керуванню і збуренню, він буде варіюватись у діапазоні $[15,196; 20,196] \text{ м}^2$, відповідно до цього коефіцієнти передачі і сталі часу будуть також лежати у певних діапазонах.

За допомогою Simulink продемонструємо перехідні характеристики передатних функцій, що належать множині «плаваючих» параметрів об'єкту. За допомогою команди *ureal*, що використовується для представлення дійсного числа, значення якого є невизначеним, задамо невизначені параметри моделі з номінальними значеннями.

Для керування:

$$\gg k_{\text{кер}} = \text{ureal}('k_{\text{кер}}', 2, 25, 'range', [-2, 618; 1, 972])$$

Врахування технічних засобів. Для підвищення точності моделі необхідно врахувати не лише об'єкт, а й технічні засоби, які знаходяться між ним та регулятором. У нашому випадку проміжними пристроями у контурі керування є аналізатор рідини кондуктометричний, який виступає у ролі датчика, та виконавчий механізм.

Передатна функція датчика виглядає наступним чином:

$$W_{\text{дат}} = k_{\text{дат}} \quad (5)$$

де $k_{\text{дат}}$ – коефіцієнт передачі. Через відсутність інерційності (час вимірювання становить менше секунди) прийемо $k_{\text{дат}} = 1$, тому при подальших розрахунках не будемо його враховувати.

В контурі керування абсорбером використовується запірно-регулюючий клапан із електричним виконавчим механізмом. Електродвигун, який знаходиться у виконавчому механізмі, є електродвигуном постійного струму і характеризується високим ККД, надійністю роботи, великим діапазоном регулювання швидкості обертання.

Передатна функція електродвигуна постійного струму має вигляд:

$$W_{\text{вм}}(p) = W_{\text{вих}} / U_{\text{вх}} = k_{\text{вм}} / (T_{\text{вм}} p + 1) \quad (6)$$

де $k_{\text{вм}}$ – коефіцієнт передачі виконавчого механізму, $T_{\text{вм}}$ – стала часу.

Так як абсорбер та виконавчий механізм з'єднані між собою послідовно, необхідно перемножити їх передатні функції. Виконавши необхідні перетворення та підставивши значення усіх коефіцієнтів, математична модель абсорбера набуде вигляду:

```
>>T_кер1=ureal('T_кер1',0,36,'range',[0,315; 0,42])  
>>T_кер2=ureal('T_кер2',15,024,'range',[15,021; 15,028])  
>>Z_кер=tf(-k_кер,[T_кер1 T_кер2 1])
```

Значення коефіцієнта передачі об'єкта керування з номінальним значенням 2,25 та діапазоном [-2,618; 1,972]. Значення сталої часу $T_{кер1}$ об'єкта керування з номінальним значенням 0,36 та діапазоном [0,315; 0,42]. Значення сталої часу $T_{кер2}$ об'єкта керування з номінальним значенням 15,024 та діапазоном [15,021; 15,028].

Для збурення:

```
>>k_у0=ureal('k_у0',0,07753,'range',[0,07756; 0,07749])  
>>T_x1=ureal('T_x1',0,024,'range',[0,021; 0,028])  
>>Z_зб=tf(k_у0,[T_x1 1])
```

Значення коефіцієнта передачі $k_{у0}$ каналу збурення з номінальним значенням 0,07753 та діапазоном [0,07756; 0,07749]. Плаваючі значення сталої часу T_{x1} об'єкта керування з номінальним значенням 0,024 та діапазоном [0,021; 0,028].

Підставивши числові значення плаваючих параметрів у передатну функцію по каналу керування, отримаємо передатні функції з різних значень параметрів $k_{кер}$, $T_{кер1}$ та $T_{кер2}$.

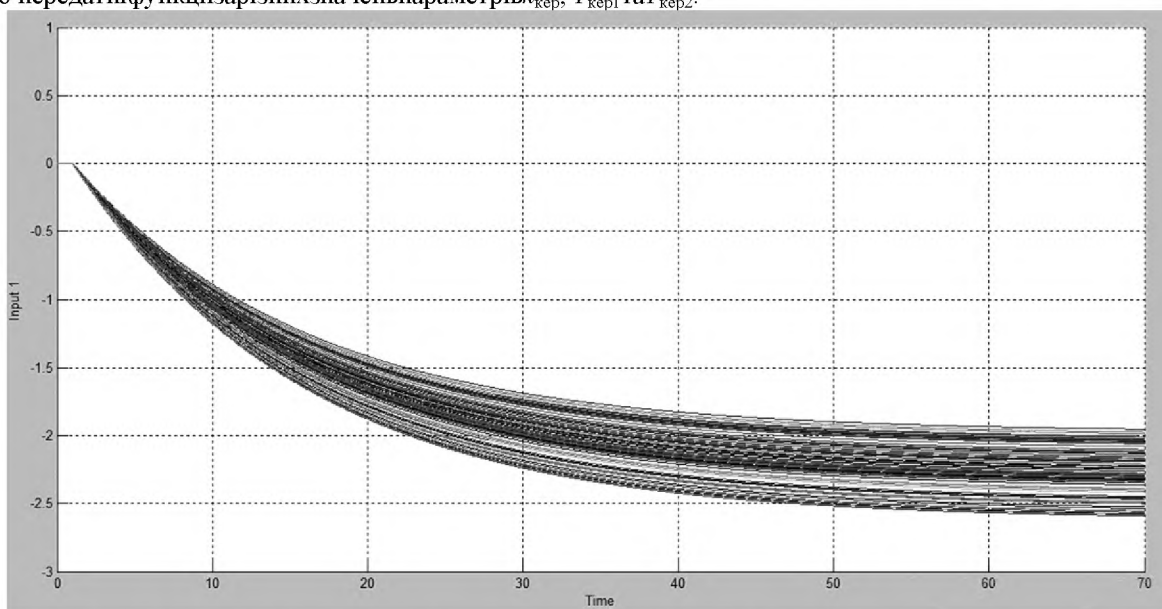


Рис. 2 – Перехідні характеристики передатних функцій, що належать множині «збурених» об'єктів

Для порівняння у Simulink було складено дві системи автоматичного керування на основі ПД-регулятора, 1 – без урахування зміни параметрів, 2 – з урахуванням «плаваючих» параметрів, що наведені на рис. 3. Результати їх роботи зображені на рис. 4.

Висновки. Розроблено математичну модель абсорбера, яка враховує невизначеність його параметрів. Це дозволяє точніше описати об'єкт керування, а також використати модель для синтезу системи керування на основі робастних регуляторів. Аналізуючи отримані графіки перехідних процесів, можна зробити висновок, що ПД-регулятор (синтезований для номінальних значень об'єкту) показує задовільні результати у випадку невизначеності. Проте необхідно гарантувати адекватну роботу при інших варіантах невизначеності. Тому доцільно розглянути створення системи керування на основі робастних регуляторів, що забезпечують стійкість та якість замкненої системи для широкого діапазону невизначеностей.

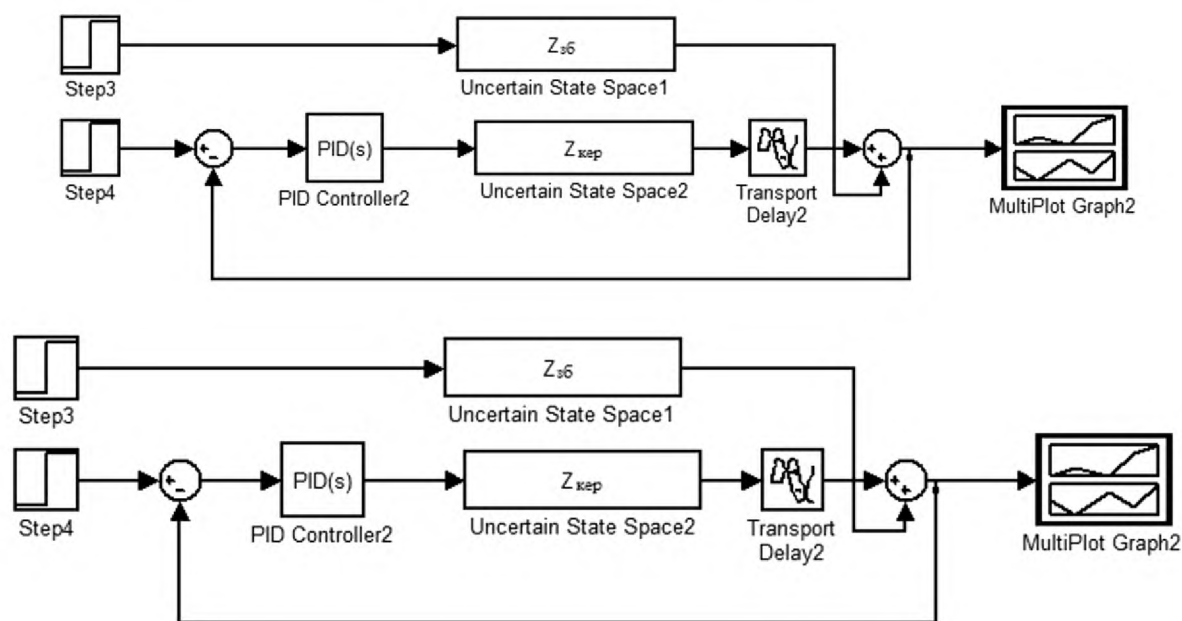


Рис. 3 – Системи автоматичного керування на основі ПІД-регулятора без урахування та з урахуванням плаваючих параметрів

Список використаної літератури

1. Дорф Р. Современные системы управления / пер. с англ. Б. И. Копылова. – М. : Лаборатория Базовых знаний, 2002. – 832 с.
2. Бабіченко А. К. Регульовальні і виконавчі пристрої: навч. посібник. / За заг. ред. А. К. Бабіченка – Харків: НТУ «ХПІ». – 2003. – 658 с.
3. Дытнерский И. Ю. Основные процессы и аппараты химической технологии [Текст]: Пособие по проектированию / Г. С. Борисов, В. П. Брыков, И. Ю. Дытнерский и др. Под ред. И. Ю. Дытнерского, 2-е изд., перераб. и дополн. – М. : Химия 1991. 496 с. – Библиогр.: с. 166-180. – ISBN 5-7245-0133-3.
4. Ковалюк Д. О. Порівняння систем керування з різними типами регуляторів [Електронний ресурс] : Д. О. Ковалюк, О. О. Ковалюк // Наукові праці Вінницького національного технічного університету – 2015. – № 1.
5. RobustControlToolboxUser'sGuide.

Надійшла до редакції 14.12.2016

Kovalyuk D. O., Kabanova A. E.

MODELING OF ABSORPTION IN CONDITIONS OF UNCERTAINTY

The article focuses on analyzing of the technological process for ethylene oxide. There was obtained mathematical model of absorber that included technical devices of automation. Also there was shown the necessity of consideration for parameters of object changes during its' operating process. Moreover in the article was made an absorption modeling with different values of mass transfer surface area. All control system modelling results were implemented in the programming package Matlab.

Nowadays the main target for chemical industry is obtaining high-quality and competitive product. Control systems of technological processes are primary methods of achieving this target. For optimum operation of such systems firstly there is a must to get a mathematical model of a control object that will fully describe its' work. Researches has shown that a model should take into account the components of control system because of their characteristics can significantly affect objects' dynamics. At the same time it is also necessary to take into the account conditions of operation of technological objects and their changes of constructive parameters.

As a result because of a long-term operation in the inner part of absorber appears coating, corrosion, settle gases impurities that cause changes of mass transfer surface. Because of this we can make a conclusion that the system

model includes uncertainty, represented as a mass transfer surface. There are some basic types of uncertainty: parametric uncertainty, dynamic and nonlinear uncertainty. In our case we have parametric uncertainty.

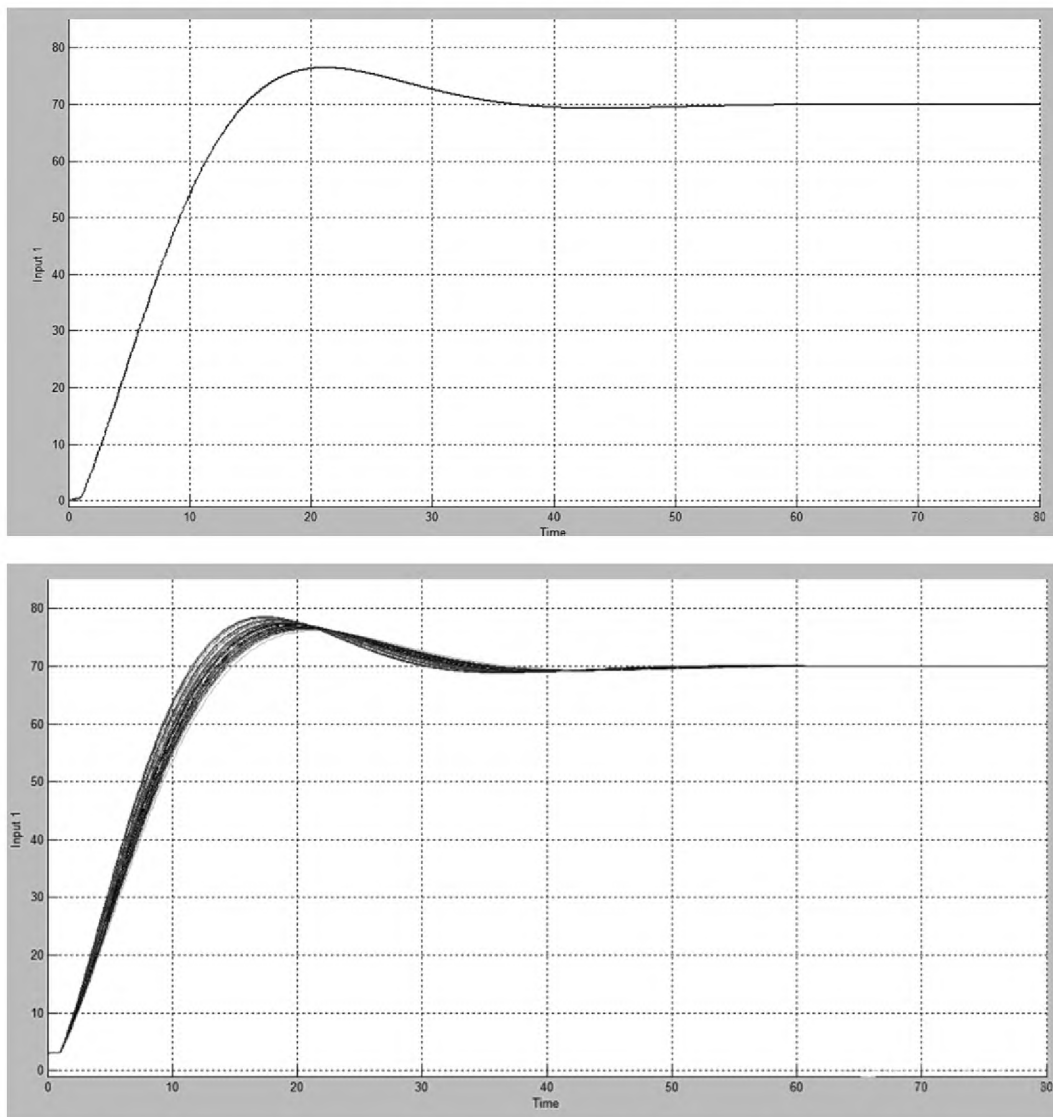


Рис. 4 – Системи автоматичного керування на основі ПІД-регулятора без урахування та з урахуванням плаваючих параметрів

Coefficient of mass transfer surface in the mathematical model of absorber allows describing control object more accurately and can be used for the synthesis of control systems based on robust regulators. Analyzing the results we can conclude that the PID controller (synthesized for nominal values of process) shows satisfactory results for these options of uncertainty. However it will unlikely ensure an equate work with other versions of uncertainty. The next step of the research will be the creation of control system based on robust controls to ensure the stability of the closed system, not only for the nominal object, but for any object that belongs to multiplicity of “disturbed” objects.

Keywords: absorber, modeling, uncertainty, control system.

References

1. Dorf, R. (2002). “Modern management systems”, per. s angl. B. I. Kopylova. Moscow. *Laboratorija Bazovyh znanij*, 832 s.
2. Babichenko, A.K. (2003). *Rehulyuval'ni i vykonavchi prystroji: navch. posibnyk*. [Regulating and actuators] Kharkiv, NTU “KhPI”, 658 s.

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 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: