УДК 664.8.047

С. М. Сабадаш, к. т. н., доцент, Д. Д. Казаков, ст. викладач (Сумський національний аграрний університет, м. Суми, Україна)

Визначення режимів псевдозрідження під час сушіння дисперсних продуктів

Викладено підходи до моделювання процесу сушіння термолабільних матеріалів, в рамках якого процес сушіння розглядається як поєднаний процес термічного зневоднення і термічної деструкції на прикладі сушарок з псевдозрідженим шаром.

Ключові слова: *сушарка, киплячій шар, поразність шару, режим початку псевдозрідження, стійкого фонтанування і винесення частинок.*

Изложены подходы к моделированию процесса сушки термолабильных материалов, в рамках которого процесс сушки рассматривается как совмещённый процесс термического обезвоживания и термической деструкции на примере сушилок с псевдоожиженным слоем.

Ключевые слова: *сушилка, кипящей слой, поразность слоя, режим начала псевдоожижения, устойчивого фонтанирования и вынесения частиц.*

The approaches to the modeling of the drying process of thermolabile materials are outlined, within which the drying process is considered as a combined process of thermal dehydration and thermal destruction using the example of fluidized bed dryers. A mathematical model is presented that makes it possible to obtain data on the final moisture content of the material and the yield of the target substance based on the technological parameters of the process, the physicochemical properties of the substances and the initial parameters of the process.

Key words: *dryer, boiling bed, peeking layer, the mode of the onset of fluidization, sustainable spouting and removal of particles.*

Постановка проблеми

Дослідження гідродинамічних характеристик сушильних апаратів зумовлено впливом сукупності різноманітних чинників, які у свою чергу пов'язані з рухом і умовами перемішування газової та твердої фаз. Це істотно впливає на процес сушіння, в якому гідродинаміка визначає тривалість перебування висушених частинок матеріалу в апараті.

Гідродинаміка сушильних апаратів у своїй основі визначає енергетичні витрати на сушіння, що для такого енергоємного процесу має важливе значення.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Гідродинаміка зважених частинок у потоці наочно описується кривою, яка показує зміну опору шару матеріалу Δр залежно від швидкості теплоносія *w*[1; 2]. На кривій псевдозрідження розрізняють стадії, які характеризують перехід щільного шару дисперсного матеріалу в псевдозріджений шар:

- режим фільтрації;
- втрата стійкості;
- початок псевдозрідження;
- стійке псевдозрідження.

Проаналізувавши криві псевдозрідження та результати візуального спостереження, можна одержати повне уявлення про процес, який відбувається в апараті.

Найбільшу зацікавленість у дослідників викликає визначення умов початку псевдозрідження і максимальної величини гідравлічного опору шару Δр. Очевидно, це пояснюється необхідністю визначення мінімальної витрати газу для отримання стійкого режиму фонтанування і специфічного для псевдозрідженого шару надлишкового напору газу, що необхідний для запуску апарата. Чим вищий тиск в апаратах із псевдозрідженим шаром, тим вищі енерговитрати на псевдозрідження матеріалу, що у свою чергу призводить до зменшення економічності процесу [3; 4; 5].

Вибираючи конструкцію камери для сушіння післяспиртової зернової барди, ми насамперед керувалися властивостями висушеного матеріалу, зважаючи на злипання післяспиртової барди. Зазначена проблема значною мірою вирішується під час сушіння барди в конічно-циліндричній камері з нижнім підведенням газоподібного сушильного агента через отвір у центральній частині [3; 6; 7].

Гідродинаміку сушіння післяспиртової барди досліджували на установці в конічно-циліндричній камері (рис. 1.).

Метою роботи є дослідження гідродинамічних характеристик сушарок у псевдозрідженому шарі інертного носія.

Обговорення результатів дослідження.

Першим етапом є вивчення режимів псевдозрідження фторопластової крихти та післяспиртової барди на описаній раніше експериментальній установці. Основою розрахунку стали критична швидкість на початку кипіння ($W_{п.к}$) і швидкість винесення частинок, яка називається швидкістю витання ($W_{вит}$) [8]. Співвідношення швидкостейвитання і початку кипіння називається числом псевдозрідження:

$$K=W_{вит} / W_{п.к.} \quad (1)$$

Порівняно з киплячим шаром, характерним для циліндричних апаратів, псевдозрідження в конічних апаратах має значно ширший діапазон кипіння – такий шар називається фонтануючим [8].

Найбільш зручною залежністю для розрахунку швидкості початку псевдозрідження є формула В.Д. Горошко, Р.Б. Розенбаума, О.М. Тодеса [9]. Її перевагою над іншими залежностеми, є можливість використання для всіх режимів обтікання частинок:

$$\mathrm{Re}_{п.к.} = \frac{Ar}{1400 + 5,22\sqrt{Ar}} \quad (2)$$

де $Ar = \frac{gd^3(\rho_t - \rho_{ж})}{\nu_{ж}^2 * \rho_{ж}}$;

$$\mathrm{Re}_{п.к.} = \frac{W_{п.к} \cdot d}{\nu_{ж}},$$

де d – діаметр (зазвичай еквівалентний) твердих частинок;

$\nu_р$–кінематичний коефіцієнт в'язкість рідини або газу;

$\rho_ж$, $\rho_т$– відповідно густина зрідженого агента і частинок.

Аналогічно рівнянню О.М. Тодеса, отриманому з рівняння Ергона [10] стосовно циліндричних апаратів, за участю авторів [11] була одержана залежність для розрахунку критичної швидкості псевдозрідження в конічних апаратах:

$$\mathrm{Re}_{п.к.} = \frac{Ar}{1400\frac{d_0}{d_в} + 3\sqrt{Ar\frac{d_0}{dв}\left(\frac{d_0^2}{d_в^2} + \frac{d_0}{dв} + 1\right)}} \quad (3)$$

де $d_о$, $d_в$ – нижній і верхній діаметри шару.

Залежності (1) і (2) отримано для початку процесу псевдозрідження $\left(\varepsilon = \frac{Vс.в.}{V\text{шару}} = 0,4\right)$.

Для значення $1>\varepsilon>\varepsilon_0$ можна скористатися методом Тодеса [10], яким визначено залежності швидкості псевдозрідження від порізності та інших параметрів шару. Якщо перетворити рівняння (3), помноживши чисельник та знаменник на число 18/1400, отримаємо такий вираз:

$$\mathrm{Re}_0 = \frac{\frac{18}{1400}Ar}{\frac{18}{1400}1400\frac{d_0}{dв} + 3\sqrt{\left(\frac{18}{1400}\right)^2 Ar\frac{d_0}{d_в}\left(\frac{d_0^2}{d_в^2} + \frac{d_0}{dв} + 1\right)}}; \quad (4)$$

Після перетворення отримано:

$$\mathrm{Re}_0 = \frac{0,01286Ar}{18\frac{d_0}{dв} + 0,34\sqrt{0,01286Ar\frac{d_0}{d_в}\left(\frac{d_0^2}{d_в^2} + \frac{d_0}{dв} + 1\right)}}.$$

Число 0,01286 є функцією порізності для початку псевдозрідження $\varepsilon=\varepsilon_0$ =0,4. Очевидно, що в режимі винесення порізність і функція порізності будуть прямувати до одиниці $\Phi_{(\varepsilon=1)}$ =1. У загальному вигляді рівняння матиме вигляд:

$$\mathrm{Re} = \frac{Ar\cdot\phi(\varepsilon)}{18\frac{d_0}{dв} + 0,34\sqrt{\phi(\varepsilon)Ar\frac{d_0}{d_в}\left(\frac{d_0^2}{d_в^2} + \frac{d_0}{dв} + 1\right)}}. \quad (5)$$

Як наслідок, для дослідження процесу псевдозрідження частинок у конічному апараті були використані методи О.М.Тодеса й авторів [10]. Унаслідок перетворення рівняння Ергана-Тодеса, отримано залежності для розрахунку швидкостей фонтанування від початку псевдозрідження ($\varepsilon=\varepsilon_0$=0,4) до винесення частинок (ε=1). У ході експериментальних досліджень отримано значення швидкостей для різних режимів псевдозрідження (табл. 1).

Експериментальні дослідження з визначення режимів псевдозрідження проводилися в камері з конічним днищем і такими геометричними параметрами (рис. 1): $d_о$= 50 мм, $D_ц$=120мм, H=125 мм.

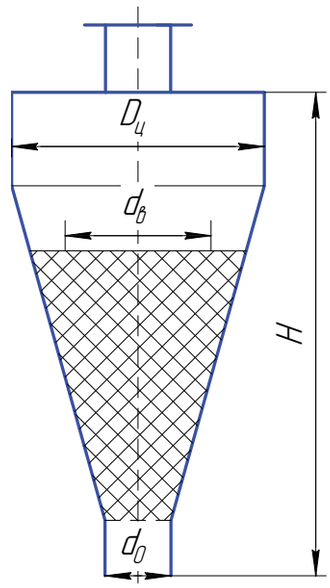

Рис. 1. Апарат із фонтануючим шаром: *$D_ц$ – діаметр циліндричної частини апарата; d_0 – діаметр вхідного отвору; $d_в$– діаметр верхнього перерізу; H – висота камери.дробарки КДУ.*

Під час досліджень виміряли витрати повітря витратомірною шайбою. Висота шару фторопластової крихти з еквівалентним діаметром de=4мм, становила 30 мм, $d_в$=74 мм. Результати розрахунків за наведеними залежностями і дані експериментів подано на рис. 2.

Висновки.

1. Показано, що при порізності шару від 0,4 до 0,5 швидкість теплоносія є незначною, це свідчить про нерухомість шару.

2. При порізності шару від 0,5 до 0,9 швидкість прямолінійно зростає і розпочинається процес стійкого псевдозрідження.

3. При порізності, що дорівнює 1, настає режим винесення частинок і швидкість теплоносія набуває свого

Таблиця 1. Рівняння для визначення швидкостей псевдозрідження

ε	Розрахункові формули	Застосування
0,4	$Re_п = \frac{Ar\cdot 0.01286}{18\frac{d_0}{d_в} + 0,038\sqrt{Ar\frac{d_0}{d_в}\left(\frac{d_0^2}{d_в^2} + \frac{d_0}{d_в} + 1\right)}}$	Рівняння для початку режиму псевдозрідження
0,5÷0,9	$Re_п = \frac{Ar\cdot\varepsilon^{4,75}}{18\frac{d_0}{d_в} + 0,34\sqrt{Ar\cdot\varepsilon^{4,75}\frac{d_0}{d_в}\left(\frac{d_0^2}{d_в^2} + \frac{d_0}{d_в} + 1\right)}}$	Рівняння для стійкого режиму псевдозрідження
1	$Re_п = \frac{Ar}{18\frac{d_0}{d_в} + 0,34\sqrt{Ar\frac{d_0}{d_в}\left(\frac{d_0^2}{d_в^2} + \frac{d_0}{d_в} + 1\right)}}$	Рівняння для режиму унесення частинок

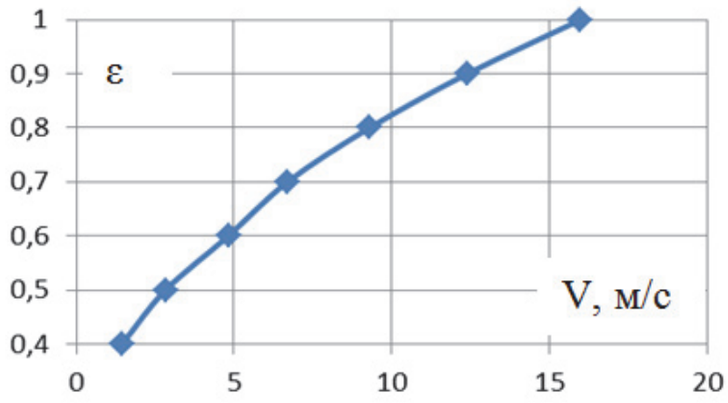

Рис. 2. Порізність псевдозрідженого шару (за розрахунками табл. 1).

максимуму.

Література:

1. Муштаев В.И. Сушка в условиях пневмотранспорта / В.И Муштаев, В.М. Ульянов, А.С. Тимонин. – М.: Химия, 1984. – 232 с.

2. Регер Э.О. Исследование процесса сушки пастообразных азокрасителей на инертных телах в фонтанирующем слое : автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук: спец. 05.17.08 "Процессы и аппараты химических технологий" / Э.О. Регер. -Л., 1965. - 16 с.

3. Романков П.Г. Сушка во взвешенном состоянии / П. Г. Романков, Н.Б. Рошковская. - М. - Л.: - Химия. - 1979. -С.272.

4. Муштаев В.И. Сушка дисперсных материалов / В.И. Муштаев В.М. Ульянов. - М.: Химия. - 1988. - 352 с.

5. Сажин Б.С. Основы техники сушки / Б.С. Сажин. М.: Химия. - 1984.-320 с.

6. Лыков А.В. Теория теплопроводности / А.В. Лыков. – М.: Высшая школа. - 1967. - 600 с.

7. Мандреа А.Г. Спиртовая барда. Технология утилизации. Компания «Westfalia Separator» / А.Г. Мандреа // Пищевая промышленность. - 2004. - №3.-С. 54-55.

8. Романков П.Г. Сушка во взвешенном состоянии / П. Г. Романков, Н.Б. Рошковская. - М. - Л.: - Химия. - 1979. -С.15-19.

9. Горошко В.Д. Приближенные закономерности гидравлики взвешенного слоя и стесненного падения / В.Д. Горошко, Р.Б. Розенбаум, О.М. Тодес // Изв. вузов. Нефть и газ. - 1958. - № 1. - С. 125-131.

10. Тодес О.М. Аппараты с кипящим зернистым слоем / О.М. Тодес, О.Б. Цитович. – Л.: - Химия. - 1981. - 296 с.

12. Якуба О.Р. Критическая скорость псевдоожижения в конических аппаратах / О.Р. Якуба, И. Ф. Кузьмин // ЖПХ. -.1989. - № 6. С.-391-392.