

ПРОБЛЕМИ ХІМІЇ ТА ХІМІЧНОЇ ТЕХНОЛОГІЇ

УДК 66.047:932.2

Н.О. Артюхова, М.П. Юхименко

ОБҐРУНТУВАННЯ МЕТОДИКИ ВИЗНАЧЕННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ ГРАВІТАЦІЙНОЇ ПОЛИЧНОЇ СУШАРКИ ДЛЯ ЗЕРНИСТИХ МАТЕРІАЛІВ

The article is devoted to the methodology development for the technological regimes of the drying process determining in gravity shelf dryers. This methodology is based on a joint analysis of the fluidized bed formation conditions and optimal energy costs of the process. The drying agent consumption, which provides the fluidization beginning of granular material in the apparatus, is determined analytically. A decrease of dryer's performance depending on porosity which is beyond the operating range is shown in this article. The dependence for the optimal flow rate value of drying agent determining with fixed economic parameters (the price of heat transfer agent, the price of the apparatus) is obtained. The method of the energy costs evaluating on drying process conducting with the optimal drying agent consumption determining is presented. The data comparison of aerodynamic and economic calculation for the dryer allows the energy-efficient regime of operation choosing.

Keywords: gravity shelf dryer, aerodynamics, optimal, research, drying agent.

Вступ

Експлуатація сушильних установок з активним аеродинамічним режимом потребує розробки режимів сушіння, які забезпечують економічно доцільне зниження вологості. При цьому взаємодія потоків у системі тверде–газ (Т:Г) збільшує величину активної поверхні дисперсного матеріалу, що перебуває в безпосередньому контакті із сушильним агентом, і значною мірою обумовлює інтенсивність процесів тепломасообміну.

У гравітаційних поличних сушарках може бути досягнуте поєднання переваг інтенсивного циркуляційного режиму тепломасообміну в зваженому шарі з послідовною багатоступеневою протитечійною взаємодією теплоносія (повітря) та дисперсного матеріалу. Конструктивні удосконалення і вибір раціонального співвідношення витрат у системі Т:Г робить їх конкурентоспроможними в умовах малої та середньої продуктивності. З урахуванням того, що до теперішнього часу використання поличних апаратів як економічних сушарок не отримало належного поширення в промисловості [1–3], проблема підвищення ефективності їх роботи для зменшення енерговитрат є актуальною. Потребує вирішення також і пов'язане з цим питання вибору оптимальних аеродинамічних режимів, які б забезпечили максимальну поверхню контакту взаємодіючих потоків.

Постановка задачі

Мета статті – обґрунтування методики оцінювання та оптимізації енергетичних харак-

теристик процесу в гравітаційних поличних сушарках з активним аеродинамічним режимом зваженого шару.

Для досягнення поставленої мети необхідно розв'язати такі завдання:

- визначити умови рівноваги зернистого матеріалу у висхідному потоці сушильного агента;
- вибрати оптимальний аеродинамічний режим роботи гравітаційної поличної сушарки;
- мінімізувати питомі витрати сушильного агента і додаткових енергоресурсів для інтенсифікації процесу сушіння.

Аналіз аеродинамічного режиму роботи сушарки

Рух частинок зернистого матеріалу в нерухомому газовому середовищі та під дією висхідного потоку теплоносія визначається на основі закону Ньютона в системі сил, зображених на рис. 1:

$$m \left(\frac{dW_q}{d\tau} \right) = \sum F_i,$$

де m – маса частинки, кг; W_q – швидкість частинки, м/с; τ – час, с, $\sum F_i$ – сума сил, які діють на тверду частинку, Н.

В умовах рівноваги результуючу силу, що діє на сферичну частинку діаметром d у нерухомому газовому середовищі, можна визначити через різницю густини дисперсної частинки та двофазової системи Т:Г, враховуючи її порозність ϵ :

$$F = F_m - F_A = \frac{\pi d^3}{6}(\rho_{\text{ч}} - \rho_{\text{г}})g = \frac{\pi d^3}{6\varepsilon}(\rho_{\text{ч}} - \rho_{\text{с}})g,$$

де $\rho_{\text{ч}}, \rho_{\text{г}}, \rho_{\text{с}}$ – відповідно густини частинки, газу та двофазової суміші, кг/м^3 ; g – прискорення вільного падіння, м/с^2 .

З іншого боку, аеродинамічна сила висхідного повітряного потоку, що діє на дисперсну частинку діаметром d , визначається відомою формулою через коефіцієнт аеродинамічного опору ζ :

$$F_B = \zeta \frac{\rho_{\text{г}} W_{\text{г}}^2}{2} \frac{\pi d^2}{4},$$

де $W_{\text{г}}$ – швидкість газу, м/с .

З балансу вказаних сил, характерного для режиму утворення зваженого шару, отримуємо співвідношення, що зв'язують граничну швидкість, порозність і витрати теплоносія (повітря):

$$W_{\text{пп}}^2 = \left(\frac{V_{\text{пп}}}{\varepsilon S} \right)^2 = \frac{4d}{3\zeta\rho_{\text{г}}}(\rho_{\text{ч}} - \rho_{\text{г}})g, \quad (1)$$

де $W_{\text{пп}}$ і $V_{\text{пп}}$ – відповідно швидкість теплоносія між зернами матеріалу та витрати теплоносія в момент утворення зваженого шару, м/с ; S – площа перерізу сушарки, м^2 .

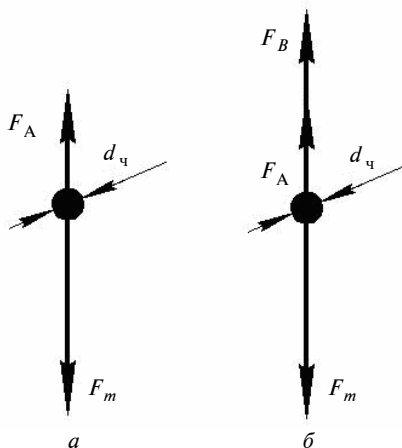


Рис. 1. Сили, що діють на частинку в сушарці: *a* – в нерухомому газовому середовищі; *б* – у висхідному газовому потоці; F_m – сила тяжіння, F_A – сила Архімеда, F_B – аеродинамічна сила повітряного потоку

Таким чином, при збільшенні витрати теплоносія в зонах утворення зваженого шару буде спостерігатись відповідне збільшення його порозності та зменшення продуктивності сушарки по дисперсному матеріалу.

На рис. 2 показана залежність порозності зваженого шару дисперсного матеріалу від швидкості висхідного потоку нагрітого повітря. Встановлено [4], що при збільшенні швидкості повітряного потоку до початку режиму зважування порозність зберігається майже на початковому рівні (в дослідах над нерухомим зернистим матеріалом $\varepsilon_0 = 0,4-0,45$). Подальше збільшення швидкості від початку зважування аж до швидкості виносу супроводжується відповідним збільшенням порозності [4, 5]. При цьому характер кривих на графіку у визначеному діапазоні швидкостей буде залежати від дисперсного (зернового) складу, форми та густини частинок.

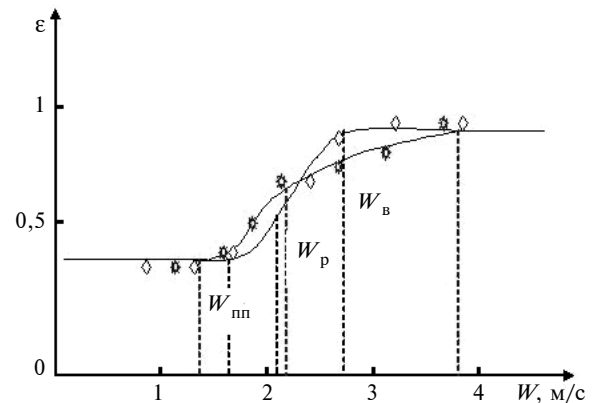


Рис. 2. Аеродинамічні характеристики зваженого шару зернистого матеріалу [4]: $W_{\text{пп}}$, W_p , W_b – відповідно швидкість сушильного агента на початку утворення зваженого шару, в умовах розвинутого зваженого шару та при винесенні зернистого матеріалу із сушарки; \diamond – полідисперсний зернистий матеріал; $*$ – монодисперсний зернистий матеріал

Методика оцінювання енергоефективності процесу

Проведення багатьох технологічних процесів у багатофазовому середовищі з активним аеродинамічним режимом супроводжується не лише інтенсифікацією тепломасоперенесення на поверхні контакту взаємодіючих фаз, але й значними втратами енергії. При цьому підвищення турбулентності потоку теплоносія при проходженні його через шар дисперсного матеріалу з метою інтенсифікації процесу сушіння без внутрішньозернових обмежень вологоперенесення призводить до більш швидкого зростання витрат енергії, ніж швидкості сушіння [6]. Тому можна сказати, що за деяких граничних значень швидкості теплоносія і ступеня його

турбулізації економічність такого аеродинамічного методу інтенсифікації сушіння знижується. Природним чином виникає потреба в методиці оцінювання енергоефективності теплообміну в системі Т:Г за критерієм питомих енерговитрат на інтенсифікацію (аналогічно до [7]).

Для обґрунтування такої методики будемо виходити з поширених, експериментально підтверджених узагальнених залежностей між впливаючими технологічними факторами.

Так, питому вартість додаткових енергоресурсів для інтенсифікації теплообміну запишемо у вигляді двочленної цільової функції:

$$F = (aV_c + B)/M, \quad (2)$$

де a – вартість енергоресурсу, грн/м³; V_c – витрати сушильного агента, м³/кг; B – виробнича складова вартості продукту без витрат на сушіння, грн/кг; M – продуктивність процесу по видаленій волозі, кг/годину.

Зрозуміло, що виробничий діапазон коливань співвідношення витрат сушильного агента до витрат вологого матеріалу V_c/V_m обмежується, з одного боку, аеродинамічними умовами існування зваженого шару, а з іншого – швидкістю винесення найменших зернин (пилової фракції) продукту. В цьому ж діапазоні існує застереження, що недостатня кількість теплоносія на межі утворення зваженого шару може не забезпечити необхідної якості сушіння. Оптимізаційна задача, таким чином, полягає у визначенні мінімального співвідношення витрат теплоносія та зернового матеріалу в обмеженнях прийнятних техніко-економічних показників сушарки. Значення витрат сушильного агента, яке відповідає граничній швидкості, обчисленої за формулою (1) за різних значень порозності, в подальшому стає фактором оцінювання питомих енерговитрат.

Після цього, виходячи з найпростіших ступеневих критеріальних оцінок зв'язку ефективності видалення вологи з витратами теплоносія (рис. 3) у зваженому шарі, можна оцінити питомі енерговитрати процесу сушіння.

Зіставлення графічних залежностей на рис. 3 показує загальну тенденцію до зменшення ефективності використання сушильного агента при збільшенні його відносних витрат. При цьому для кращих конструкцій сушарок властиві більш круті характеристики з більшими показниками $n \rightarrow 1$. Відповідно, використання повітря в неекономічних конструкціях ($n \rightarrow 0$) у край

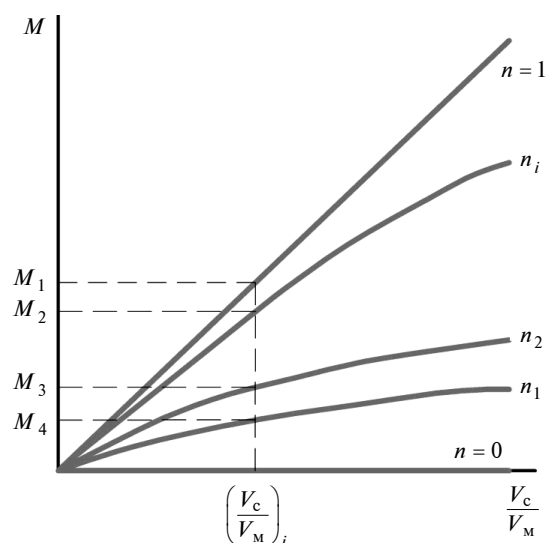


Рис. 3. Вплив співвідношення витрат повітря і дисперсного матеріалу V_c/V_m на кількість видаленої вологи залежно від емпіричного показника n ($n_2 > n_1$)

неефективне, збільшення його відносних витрат не дає очікуваного приросту кількості видаленої вологи, що графічно характеризується похилими кривими в нижній частині графіка. Слід зауважити, що подібний характер мають і низка інших експериментальних залежностей, зокрема гіперболічна чи експоненціальна, адекватність яких після статистичної обробки може бути не гірша за ступеневу функцію. Але на цьому етапі нас цікавить визначення самої можливості загального підходу до оцінювання енергоефективності сушарок за питомими витратами, незважаючи на похибки тієї чи іншої апроксимації.

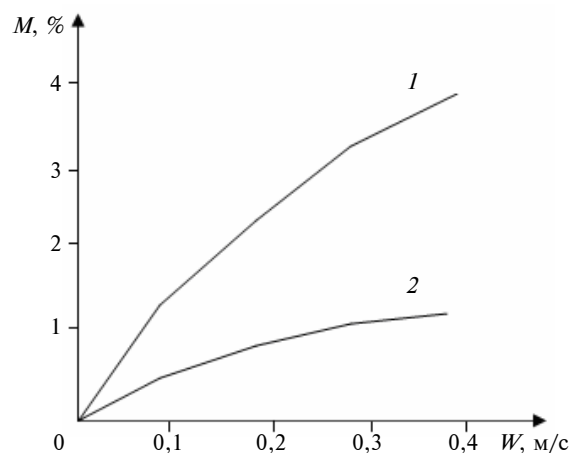


Рис. 4. Зниження відносної кількості вологи, що видалється теплоносієм (повітрям) залежно від його швидкості та вологості [10]: 1 – 30 %, 2 – 65 %

У найбільш загальних апроксимаціях зростання продуктивності сушіння по видаленій волозі (рис. 4) показник ступеня зазвичай не перевищує $n \leq 0,5$ для монодисперсних матеріалів з гладкою кулястою поверхнею та $n \leq 0,3$ для полідисперсних шорстких матеріалів з мінімальними обмеженнями внутрішньозернового перенесення вологи [8, 9]. Аналогічна тенденція до зниження ефективності використання сушильного агента при збільшенні його витрат спостерігається і при сушінні зерна активним вентиляванням [10].

Використаємо вказані залежності для аналізу введеної раніше цільової функції (2), враховуючи пропорційність між масою видаленої вологи та відносними витратами енергоносія в степені n :

$$M \sim V_c^n. \quad (3)$$

Підставляючи залежність продуктивності M з виразу (3) в цільову економічну функцію питомих витрат (2), отримаємо

$$F = \frac{aV_c + B}{V_c^n} = aV_c^{1-n} + BV_c^{-n}. \quad (4)$$

Мінімум функції питомих витрат досягається за умови

$$\frac{dF}{dV_c} = 0$$

або

$$a(1-n)V_c^{-n} - BnV_c^{-(1+n)} = 0.$$

Звідси після перетворень отримаємо значення оптимальних витрат теплоносія за фіксованих економічних параметрів a і B :

$$V_c^{-n}[a(1-n) - BnV_c^{-1}] = 0,$$

або, нехтуючи тривіальним коренем $V_c^{-n} = 0$,

$$V_c = \frac{Bn}{a(1-n)}. \quad (5)$$

Реалізація подібної процедури оцінювання енергоефективності сушіння за витратами теплоносія при фіксованих температурних і вологісних характеристиках взаємодіючих фаз може мати практичне застосування. При цьому наявність різного роду експериментальних технологічних апроксимацій для складових цільової функції дасть можливість знайти межі економічно обгрунтованого співвідношення витрат теплоносія та зернистого матеріалу.

Конкретизація вартості енергоресурсу a , виробничої складової B та показника n ступеневої функції для визначеного типу зернистого матеріалу і сушарки робить можливим обчислення функції питомих витрат за формулою (4). Наприклад, для вартості енергоресурсу (нагрітого повітря) $a = 0,85$ коп/м³, експлуатаційних витрат $B = 0,3$ коп/кг, $n = 0,5$ отримуємо функцію відносних питомих витрат у вигляді, показаному на рис. 5, з характерним мінімумом, що відповідає найбільш економічній витраті сушильного агента згідно з виразом (5).

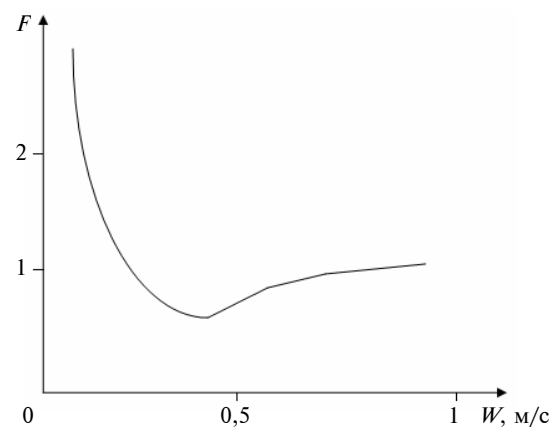


Рис. 5. Характерний вигляд функції питомих витрат

Як приклад наведемо графічну залежність, яка демонструє непропорційність між збільшенням витрат сушильного агента та зменшенням вологості матеріалу на окремих ступенях гравітаційної полицної сушарки (рис. 6). Дані для побудови залежностей одержані за результатами теоретичних розрахунків відповідно до моделі [11]. Зіставлення характеру кожної з кривих на графіку дає підстави стверджувати, що зростання кількості сушильного агента (і, відповідно, витрат енергії на сушіння) значно випереджає зростання продуктивності гравітаційної полицної сушарки за вологою. Вибравши довільний ступінь сушарки, неважко встановити цей факт, порівнявши різницю значень вологості для різних співвідношень витрат. Враховуючи, що економічна функція питомих витрат має екстремум, який відповідає визначеній швидкості сушильного агента, доцільним є підбір відповідної конструкції полицного контакту, який забезпечить таку швидкість, а також необхідний час перебування матеріалу в робочому просторі багатоступеневого сушильного апарата. При цьому витрата сушильного агента повинна забезпечувати перехід вологого матеріалу у зважений стан. Методом багатофак-

торної оптимізації визначаються оптимальні технологічні показники роботи сушарки залежно від початкової вологи та фізико-хімічних характеристик матеріалу, який піддається сушінню.

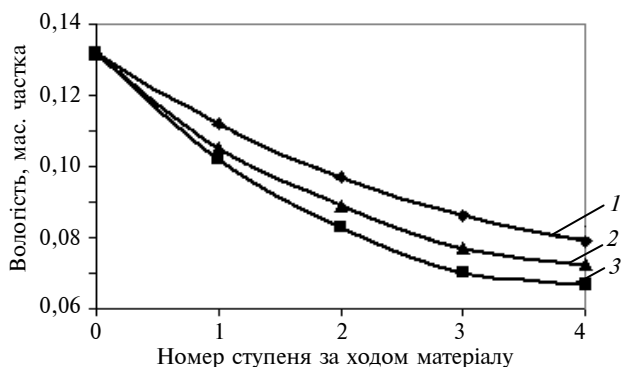


Рис. 6. Вплив співвідношення витрат V_c/V_m на інтенсивність видалення вологи з матеріалу: 1 – $V_c/V_m = 2$; 2 – $V_c/V_m = 3$; 3 – $V_c/V_m = 4$

Висновки

Збільшення витрат теплоносія з метою інтенсифікації процесу сушіння без внутрішньозернових обмежень вологоперенесення призводить до більш швидкого зростання витрат енер-

гії, ніж продуктивності сушарки по видаленій волозі. Тому за деяких граничних значень швидкості теплоносія та ступеня його турбулізації економічність процесу знижується.

Зіставлення витрат сушильного агента, що відповідають переходу зернистого матеріалу в зважений стан, та оптимальної його витрати з точки зору економічних показників дає необхідну інформацію для вибору раціонального технологічного режиму роботи сушарки.

Подальший розвиток методики визначення енергоефективності гравітаційних поличних сушарок вбачається в дослідженні впливу конструкції полиць на інтенсивність видалення вологи із зернистого матеріалу.

Відповідно до плану проведення експерименту буде досліджено вплив на ефективність таких конструктивних характеристик полиці:

- кут нахилу полиці до горизонту;
- зазор між кінцем полиці та стінкою сушарки (розвантажувальний зазор);
- площа вільного перерізу полиці;
- діаметр отворів перфорації в полиці.

Одержані результати разом із даними подальших досліджень будуть покладені в основу методики інженерного й оптимізаційного розрахунку багатоступеневих поличних сушарок.

Список літератури

1. *Апарати завислого шару. Теоретичні основи і розрахунок* / М.П. Юхименко, С.В. Вакал, М.П. Кононенко, А.П. Філонов – Суми: Собор, 2003. – 304 с.
2. *Поперечний А.М., Жданов І.В.* Аналіз конструктивних особливостей сушарок із псевдозрідженим шаром і перспективи їх удосконалення // *Обладнання та технології харчових виробництв.* – 2009. – Вип. 20. – С. 44–52.
3. *O. Burdo and I. Kazmiruk*, “Posibilități de sporire a eficienței energetice a procesului de uscare a produselor dispersate”, *Problemele energiei regionale*, no. 1 (6), pp. 56–62, 2008.
4. *Fluidization*, J.F. Davidson et al., Eds. Academic Press, 1985, 733 p.
5. *Техника и технологии псевдооживления: процессы термообработки и вулканизации* / С.И. Дворецкий, В.Н. Королёв, С.А. Нагорнов, В.П. Таров. – М.: Машиностроение-1, 2006. – 232 с.
6. *Артохова Н.О., Юхименко М.П.* Вплив організації руху сушильного агента на якість сушіння матеріалів у гравітаційних поличних апаратах // *Наукові праці ОНАХТ.* – 2012. – 2, вип. 41. – С. 233–237.
7. *Шандиба Н.О., Юхименко М.П.* Методика рекурентного розрахунку гравітаційної поличної сушарки // *Там же.* – 2011. – 2, вип. 39. – С. 44–48.
8. *Фролов В.Ф.* Моделирование сушки дисперсных материалов. – М.: Химия, 1987. – 208 с.
9. *Муштаев В.И., Ульянов В.М.* Сушка дисперсных материалов. – М.: Химия, 1988. – 352 с.
10. *Руденко Н.Б.* Использование поля СВЧ при рециркуляционной сушке зерна активным вентилярованием: Автореф. дисс. ... канд. техн. наук. – Зерноград, 2011. – 175 с.
11. *N.A. Shandyba et al.*, “Energy rate optimization under fluidized bed drying”, *Int. Sci. J. Acta Universitatis Pontica Euxinus (Special Number)*, vol. 2, pp. 323–324, 2011.