

О.В. Гура, к.т.н., доц.

Донецький Національний університет економіки і торгівлі
ім. Михайла Туган-Барановського**ДОСЛІДЖЕННЯ КІНЕТИКИ СУШІННЯ ПИВНОЇ ДРОБИНИ
В ПСЕВДОЗРІДЖЕНОМУ ШАРІ**

Експериментально досліджено кінетику сушки пивної дробини у псевдозрідженому шарі й отримані криві: зміни вологовмісту і температури пивної дробини у процесі сушки при варіюванні температури сушильного агента; зміни вологовмісту і температури пивної дробини у процесі сушки при варіюванні навантаження (висоти шару); зміни вологовмісту і температури пивної дробини у процесі сушки при варіюванні швидкості сушильного агента; зміни вологовмісту і температури пивної дробини у процесі сушки при варіюванні параметрів вібрації решітки; швидкості сушки пивної дробини. Наведені результати досліджень авторів, які спрямовані при вдосконаленні процесу сушіння пивної дробини в аеровіброкиплячому шарі і включають моделювання псевдозрідженого шару пивної дробини при сушінні, моделювання процесу зневоднення шару пивної дробини, моделювання процесу зневоднення окремого зерна пивної дробини. Отримана узагальнена крива сушки пивної дробини при різних режимах процесу. Показана постійність твору швидкості і часу сушки Nt , що спрощує розрахунки зміни вологовмісту в певні періоди теплової обробки продукту.

Ключові слова: сушка; вологовміст; швидкість; дробина; процес; псевдозріджений шар; варіювання; вібрація; температура; сушильний агент; час.

Постановка проблеми. Відходи пивоваріння звертають на себе увагу як джерело сировини з високою харчовою цінністю і біологічною активністю, які використовуються для відгодівлі худоби і птиці. Відходи на пивоварному заводі середньої потужності утворюють 35–40 тис. т пивної дробини щорічно, а ефективних методів консервування цієї продукції крім сушки не існує, та й сушку дробини не застосовують через відсутність сушильного обладнання.

Пивна дробина містить понад 80 % вологи, тому термін зберігання обмежений кількома десятками годин через швидке бродіння і пліснявіння. Сушка пивної дробини до остаточної вологості 10 % забезпечує тривалий термін зберігання, що робить рентабельним її виробництво і транспортування на великі відстані. Твердий залишок можна використовувати для отримання цілої гами цінних продуктів, оскільки він містить в своєму складі близько 8 % ліпідів, 26 % білків, 58 % вуглеводів, а також мінералів, вітамінів та інших біологічно активних речовин. При сучасних технологіях переробки високовологих матеріалів виникає необхідність розробки високотехнологічних і низькоенергоємних процесів сушки пивної дробини.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Аналіз останніх публікацій з цієї проблеми показав, що результати останніх досліджень потребують більш докладнішого вивчення процесу сушіння високовологих матеріалів.

Мета статті. Метою статті є дослідження сушки пивної дробини в псевдозрідженому шарі, проведення теоретичних досліджень і експериментальне обґрунтування вибору раціональних параметрів досліджуваного процесу.

Викладення основного матеріалу дослідження. Для сушки рідкої пивної дробини найдоцільніше використати метод сушки її в аеровіброкиплячому шарі. Під час моделювання псевдозрідженого шару пивної дробини при її сушінні виходили з того, що сушка відбувається на перфорованій решітці, яка продувається гарячим повітрям і в апараті створюється псевдозріджений шар і потік повітря при проходженні решітки має ламінарний характер [4, с. 146]. Для знаходження раціональних параметрів решітки була досліджена залежність максимальної швидкості повітря на певній висоті зависання киплячого шару продукту від параметрів решітки.

Для вирішення даного завдання було виконано моделювання за допомогою програмного комплексу ANSYS, в результаті чого встановлено, що максимальна швидкість сушильного агента має місце у випадку, якщо товщина решітки 2 мм, отвори є зрізаними конусами з нижнім і верхнім діаметрами 2 мм і 4 мм відповідно, а крок має максимальне значення – 4 мм.

На решітці довжиною l , отвори для подачі повітря (точкові джерела інтенсивності J) розташовані на відстані a один від одного так, що $l = na$, і загальний тиск від усіх джерел на шар дробини дорівнює:

$$p = p_0 - \frac{1}{2} \rho \left(\frac{J}{2\pi} \right)^2 \sum_{k=1}^{n-1} \left[-\frac{1}{2a^2 n} \cdot \frac{n-k}{R^2 + (n-k)^2} - \frac{1}{2a^2 n} \cdot \frac{n+k}{R^2 + (n+k)^2} + \frac{1}{4a^2 n} \cdot \frac{3k^2 + R^2}{k(k^2 + R^2)} \cdot \ln \frac{R^2 + (n-k)^2}{R^2 + (n+k)^2} + \frac{1}{2han} \cdot \frac{3R^2 + k^2}{R^2 + k^2} \left(\operatorname{arctg} \frac{n-k}{R} + \operatorname{arctg} \frac{n+k}{R} \right) \right], \quad (1)$$

де $R = \frac{h}{a}$, $l = na$.

Шар дробини був наведений у вигляді пористого тіла з великими, випадково розташованими включеннями, що володіють ізотропними властивостями $k_x = k_y = k$ і методами кінцево-елементного моделювання отримано розподіл швидкості протікання повітря всередині шару дробини. Критерій фазового перетворення ε змінюється від нуля (фазовий перехід не відбувається) до одиниці (потік вологи, обумовлений тільки фазовим перетворенням). У загальному випадку ε , залежить як від температури, так і від вологовмісту тіла u . Для невеликих градієнтів u, T можна вважати ε постійною величиною і при вологості матеріалу 60–70 % величина ε має порядок 0,1...0,15.

Диференціальне рівняння переносу теплоти в дробині описано рівнянням:

$$\frac{dT}{d\tau} = A \nabla^2 T + \frac{r}{C_M} \varepsilon \frac{du}{d\tau}. \quad (2)$$

Час прогрівання шару дробини товщиною H визначається виразом:

$$T(y, \tau) = \frac{T_0}{2\sqrt{\pi A \tau}} \int_0^{H/2} e^{-\frac{(\alpha-y)^2}{4A\tau}} d\alpha. \quad (3)$$

Кількість теплоти, передане конвекцією, витрачається на нагрівання дробини та вологи, яка в ній тримається, за час $d\tau$ і на випаровування маси вологи $dm_{\text{вол}}$ за той же проміжок часу:

$$\frac{dm_{\text{вол}}}{d\tau} = \frac{\alpha}{r} (1 - \bar{I}) (T_C - T_u) \cdot F - (c_{\text{реч}} m_{\text{реч}} + c_{\text{вол}} m_{\text{вол}}) \cdot \frac{dT}{d\tau} + \frac{\alpha_1}{r} \bar{I} (T_C - T_u) \cdot F, \quad (4)$$

де α – коефіцієнт тепловіддачі;

\bar{I} – пористість шару дробини;

T_C, T_u – температура сушки і випаровування відповідно;

F – площа поверхні продукту;

$c_{\text{реч}}, m_{\text{реч}}, c_{\text{вол}}, m_{\text{вол}}$ – питома теплоємність і маса сухої речовини і вологи відповідно.

Оскільки початкове прогрівання шару відбувається під час τ_n і надалі $\frac{dT}{d\tau}$ визначається лише швидкістю випаровування вологи, то, $\frac{dT}{d\tau} \rightarrow 0$ і можна вважати, що швидкість сушіння практично залежить від конвективного члена [2, с. 167]:

$$\frac{dm}{d\tau} = \frac{\alpha}{r} (1 - \bar{I}) (T_C - T_u) \cdot F + \frac{\alpha_1}{r} \bar{I} (T_C - T_u) \cdot F. \quad (5)$$

Для розрахунку швидкості сушки та отримання нестационарного поля вологовмісту в процесі сушки дробини було вирішено диференціальне рівняння другого порядку [3, с. 138]:

$$\frac{du}{dt} = a_m \frac{d^2 u}{dx^2}, \quad (6)$$

де a_m – коефіцієнт потенціалопровідності вологопереносу (коефіцієнт дифузії).

Рівняння (7) з відповідними початковими та граничними умовами і при масообмінному критерії

Фур'є $F_{Om} = \frac{a_m t}{R^2} > 0,5$ має вигляд:

$$u = u_1 - \frac{q_m}{R \rho_0} \left(t - \frac{R^2 - 3x^2}{6a_m} \right), \quad (7)$$

де R – половина товщини шару;

u – початкове значення вологовмісту.

Для вирішення нестационарної задачі (6) виконано моделювання в системі ANSYS. Під час моделювання процесу зневоднення окремого зерна пивної дробини, розрахунку швидкості сушки зерна дробини та отримання нестационарного поля вологовмісту в процесі сушки було вирішено диференціальне рівняння

$$\frac{du}{dt} = a_m \left(\frac{d^2u}{dx^2} + \frac{d^2u}{dy^2} + \frac{d^2u}{dz^2} \right). \quad (8)$$

Експериментальна установка для сушки пивної дробини обладнана механічними, тепловими, регулюючими і вимірювальними приладами.

Виходячи з наявних відомостей про суміщення і лінеаризацію кривих сушки, можна різко скоротити кількість дослідів. Для цього скористаємося дробовим факторним експериментом, який реалізує частину (дробову репліку) від повного факторного експерименту типу 2^{4-1} . План заданий генеруючим співвідношенням $x_4 = x_1 \cdot x_2 \cdot x_3$. Визначальним контрастом є співвідношення $I = x_1 \cdot x_2 \cdot x_3 \cdot x_4$. При цьому рівняння регресії має вигляд [1, с. 345]:

$$y = b_0 + b_1x_1 + \dots + b_px_p. \quad (9)$$

Схема ідентифікації об'єкта досліджень показана на рисунку 1.

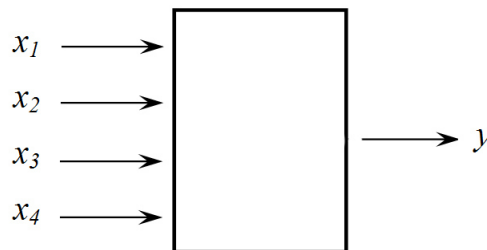


Рис. 1. Схема ідентифікації об'єкта досліджень: y – вектор виходів – вологість дробини;

x_1, x_2, x_3, x_4 – вектори вхідних параметрів: x_1 – температура сушильного агента (повітря); x_2 – навантаження решета (висота шару продукту); x_3 – швидкість сушильного агента; x_4 – параметри вібрації решета (частота і амплітуда)

На основі експериментального висушування дробини до постійної маси в умовах триразового повторення дослідів і збігу їх результатів у межах похибки експерименту, були отримані криві сушіння і криві швидкості сушіння при варіюванні температури сушильного агента, навантаження на решето (початкової висоти шару), швидкості сушильного агента і параметрів вібрації, величини яких наведені в таблиці 1.

Таблиця 1

Параметри досліджуваного процесу

Параметр	Позначення і розмірність	Нижній рівень	Верхній рівень
x_1	$t, ^\circ\text{C}$	50	70
x_2	$h_0, \text{мм}$	20	40
x_3	$v, \text{м/с}$	2,5	3,5
x_4	$F/A, \text{Гц/мм}$	10/10	17/4

Етап 1: $y^{(1)} = f(\tau)$ при $x_1 = 50^\circ\text{C}; 60^\circ\text{C}; 70^\circ\text{C}; x_2, x_3, x_4 = \text{const}$.

Етап 2: $y^{(2)} = f(\tau)$ при $x_2 = 20; 30; 40 \text{ мм}; x_1, x_3, x_4 = \text{const}$.

Етап 3: $y^{(3)} = f(\tau)$ при $x_3 = 2,5; 3,0; 3,5 \text{ м/с}; x_1, x_2, x_4 = \text{const}$.

Етап 4: $y^{(4)} = f(\tau)$ при $x_4 = 10/10; 13,5/7; 17/4 \text{ Гц/мм}; x_1, x_2, x_3 = \text{const}$.

На рисунку 2 наведено графічні залежності кінетики зміни вологості в процесі сушки пивної дробини $W^c = f(\tau)$. У цьому періоді процес сушки проходить із постійною швидкістю й аналогічний процесу випаровування рідини з вільної поверхні. Аналогічні залежності були отримані для кожного з 4-х розглянутих етапів сушки.

Аналіз отриманих результатів указує на значний вплив на процес сушки температури сушильного агента й висоти шару продукту; менш ефективними факторами є швидкість сушильного агента й параметри вібрації решета.

Отримані криві при сушінні дробини в псевдозрідженому стані мають горизонтальні ділянки постійної швидкості процесу, які відповідають інтенсивному сушінню, і похилі криві спадаючої швидкості. На отриманих кривих чітко видно, що більш високій температурі сушильного агента відповідає велика швидкість сушіння в перший період протікання процесу.

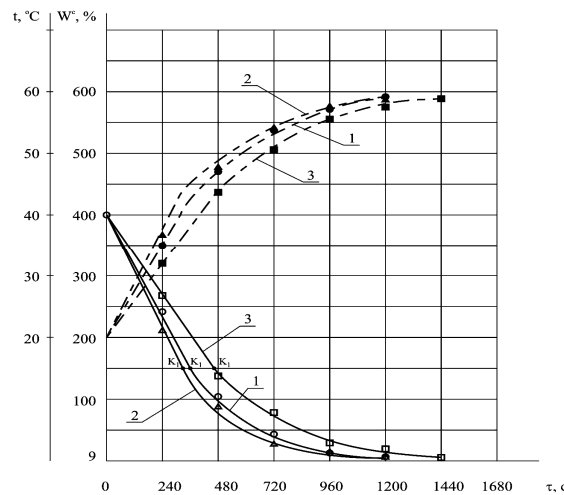


Рис. 2. Криві зміни вологовмісту й температури тивної дробини в процесі сушки при варіюванні температури сушильного агента: 1 – $t = 50\text{ }^{\circ}\text{C}$; 2 – $t = 60\text{ }^{\circ}\text{C}$; 3 – $t = 70\text{ }^{\circ}\text{C}$. Початкова висота шару насипки продукту $h = 30\text{ мм}$; швидкість сушильного агента $v = 3,0\text{ м/с}$; параметри вібрації: $F = 13,5\text{ Гц}$, $A = 7\text{ мм}$

Досягаючи критичної точки, швидкість починає падати, а криві всіх дослідів зближуються і асимптотично наближаються до значення рівноважного стану. Пояснити це падіння можна зниженням вмісту вологи на поверхні та зростанням внутрішнього опору теплопередачі. Криві швидкості сушіння дробини 2-го етапу досліджень (варіювання висоти шару продукту) практично не відрізняються інтенсивністю процесу від наведених вище. Більш тонкий шар продукту висихає з більшою швидкістю.

Для обчислення середньої квадратичної похибки вимірювань і визначення відповідності експериментального розподілу нормального закону розподілу застосовували графічний спосіб обробки результатів шляхом зіставлення кривих експериментального розподілу з сімейством теоретичних кривих. Середнє квадратичне відхилення не перевищило 9,3 %.

З метою подальшого аналізу кінетики сушки тивної дробини здійснене графічне диференціювання кривих сушки й побудовані графіки швидкості сушки $\frac{dW^c}{d\tau} = f(W)$ (рис. 3). Криві 1, 2, 3 (рис. 3) при сушці дробини у псевдозрідженому стані мають горизонтальні ділянки постійної швидкості процесу, що відповідає інтенсивній сушці, й похилі криві падаючої швидкості: більш високій температурі сушильного агента відповідає більша швидкість сушки в перший період протікання процесу. Досягаючи критичної точки K_1 , швидкість починає падати, а криві всіх дослідів зближуються й асимптотично наближаються до значення рівноважного стану. Криві швидкості сушки дробини 2-го етапу досліджень (варіювання висоти шару продукту) практично не відрізняються інтенсивністю процесу від наведених вище: більш тонкий шар продукту висихає з більшою швидкістю.

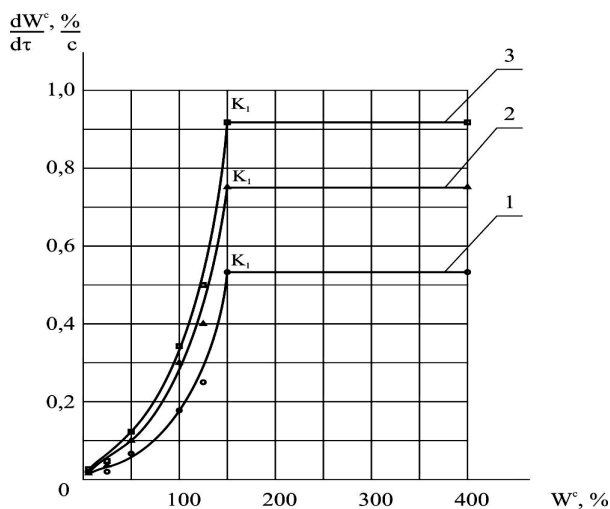


Рис. 3. Криві швидкості сушіння пивної дробини, отримані графічним диференціюванням

Сполучення кривих сушки пивної дробини, отриманих у двох розглянутих режимах, в одну узагальнену криву (рис. 4), яка була описана рівнянням (8) за методом В.Красникова доводить сталість добутку швидкості й часу сушки $N\tau$ і спрощує розрахунки зміни вологовмісту як під час першого, так і під час другого періодів теплової обробки продукту.

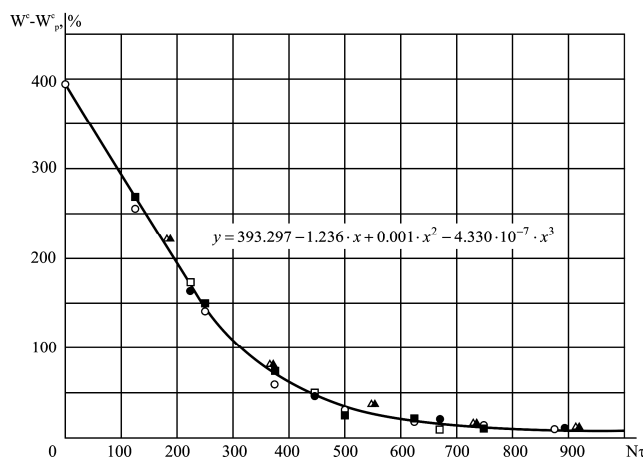


Рис. 4. Узагальнена крива сушки пивної дробини при різних режимах сушіння

Режим 1. Температура сушильного агента t : \circ – 50 °С; Δ – 60 °С; \square – 70 °С. Початкова висота шару насипання продукту $h_0 = 30$ мм; швидкість сушильного агента $v = 3,0$ м/с; параметри вібрації: $F = 13,5$ Гц, $A = 7$ мм.

Режим 2. Початкова висота шару h_0 : \bullet – 20 мм; \blacktriangle – 30 мм; \blacksquare – 40 мм. Температура сушильного агента $t = 60$ °С; швидкість сушильного агента $v = 3,0$ м/с; параметри вібрації: $F = 13,5$ Гц, $A = 7$ мм.

Аналіз узагальненої кривої, що характеризує кінетику сушки дробини, свідчить про те, що з достатнім ступенем точності експериментальні точки лягають на одну криву, побудовану в координатах $W^c - W_p^c = f(N\tau)$.

Для оцінки впливу процесу сушіння пивної дробини на її якісні показники було проведено порівняльний аналіз хімічного і амінокислотного складу пивної дробини, до і після її сушіння. Сушка вироблялася при температурі сушильного агента $t = 60$ °С; швидкості сушильного агента $v = 3,0$ м/с; параметрах вібрації: $F = 13,5$ Гц, $A = 7$ мм.

Висновки. Аналіз отриманих результатів показав, що сушка пивної дробини з використанням прийнятих параметрів процесу не погіршує якісних показників одержуваного продукту, оскільки досліджувані показники, під час перерахунку на суху речовину, практично не змінюються.

Список використаної літератури:

1. *Sukmanov A.V. Gura Cercetări Experimentare ale Procesului de Uscare a Mațului / V.A. Sukmanov // 15th GBU-International Conference on CONTROL, DEVELOPMENT and APPLIED INFORMATICS in BUSINESS and ECONOMICS Brasov, Romania, November 10–12, 2008, (CDAIBE`08), Pp. 344–350.*
2. *Валентас К.Дж. Пищевая инженерия справочник с примерами расчетов / К.Дж. Валентас, Э.Ротштейн, Р.П. Сингх ; пер. с англ. под ред. А.Л. Ишевского. – СПб : Профессия, 2004. – С. 160–202.*
3. Використання програмного комплексу комп'ютерного моделювання ANSYS під час визначення параметрів сушіння пивної дробини / *В.О. Сукманов, Г.І. Русланов, Н.М. Лавріненко, О.В. Гура // Вісник ДонДУЕТ ; Донец. держ. ун-т економіки і торгівлі ім. М. Туган-Барановського. – 2006. – № 1 (29). – С. 87–103.*
4. *Лавріненко Н.М. Моделювання процесу дифузії твердих частинок у псевдо зрідженому шарі / Н.М. Лавріненко, О.В. Гура // Обладнання та технології харчових виробництв : темат. зб. наук. праць ; Донец. держ. ун-т економіки і торгівлі ім. М. Туган-Барановського. – Донецьк, 2006. – Вип. 14. – С. 144–150.*

ГУРА Олександр Васильович – кандидат технічних наук, доцент факультету ресторанно-готельного бізнесу Донецького Національного університету економіки і торгівлі імені Михайла Туган-Барановського.

Наукові інтереси:

– кінетика сушіння;

– властивості псевдозрідженого шару.

Тел.: 304–50–52; (097)426–70–74.

E-mail: guraalex@ukr.net.

Стаття надійшла до редакції 07.10.2014