

УДК 664.8.047

Якобчук Р.Л., канд. техн. наук,

Яровий В.Л., канд. техн. наук, проф. (НУХТ, Київ)

ВИЗНАЧЕННЯ ВИСОТИ ЗОНИ АКТИВНОГО ТЕПЛООБМІНУ У ПРОЦЕСІ СУШІННЯ ПИВНИХ ДРІЖДЖІВ У ВІБРОПСЕВДОЗРІДЖЕНОМУ ШАРІ ІНЕРТНОГО МАТЕРІАЛУ

У статті наведено результати дослідження зміни температури теплоносія по висоті вібропсевдозрідженого шару інертного матеріалу при активній циркуляції його в об'ємі камери сушіння.

Ключові слова: тепло-масообмін, пивні дріжджі, інертний матеріал, вібропсевдозріджений шар, коефіцієнт теплообміну, зона активного теплообміну.

Проблема переробки і використання пивних дріжджів є однією з актуальних у галузі пивоваріння. У зв'язку з великим вмістом поживних речовин, а саме: білків, вуглеводів, жирів та вітамінів; дріжджі набули широкого використання в харчовій, фармацевтичній і мікробіологічній промисловості.

Одним із найефективніших способів збільшення тривалості зберігання дріжджів є висушування їх до рівноважної вологості.

Отже, розроблення нових та удосконалення існуючих способів сушіння пивних дріжджів, що дасть можливість зменшити енергетичні затрати, інтенсифікувати процес, уникнути забруднення довкілля і зберегти високі якісні показники готового продукту, є актуальним на даний час.

Об'єктом дослідження було виробництво сухих пивних дріжджів висушуванням їх у вібропсевдозрідженому шарі інертного матеріалу.

Аналіз тепло-масообмінних процесів, у процесі сушіння харчових продуктів, вказує на значну їх інтенсифікацію при застосуванні вібраційної дії. Вібрація передається як газовому середовищу, в якому знаходяться частинки твердого матеріалу, так і безпосередньо на частинки твердого матеріалу з утворенням вібропсевдозрідженого шару, що за певних її параметрів інтенсифікує процес тепло-масообміну частинок твердого матеріалу із середовищем, в якому вони перебувають [1, 3, 4].

Широке застосування вібропсевдозрідженого шару частинок твердого матеріалу в процесах сушіння пояснюється низкою переваг порівняно з псевдозріденим шаром: меншими витратами теплоносія та більшою однорідністю структури шару, що в свою чергу забезпечує можливість більш рівномірного оброблення частинок[2].

При проектуванні сушильних установок з вібропсевдозріденим шаром інертного матеріалу велике значення мають зміна температури теплоносія по висоті шару і висота зони активного тепло-масообміну. Значення дійсної різниці температур у шарі, що залежать в основному від зміни температури теплоносія по висоті шару, дозволяє визначити коефіцієнт теплообміну між теплоносієм і частинками.

© Якобчук Р.Л., Яровий В.Л., 2012

Використання інертних частинок із фторопласту дозволяє застосовувати теплоносій із температурою, яка значно перевищує температуру плавлення продукту. Дослідження показали, що температура поверхні інертних частинок не перевищує температуру теплоносія на виході з сушарки. Зміна температури інертних частинок в нижній частині шару, де продукт контактує з високотемпературним теплоносієм, є незначною.

Метою статті є визначення зони активного теплообміну у вібропсевдозрідженому шарі інертного матеріалу при сушінні пивних дріжджів.

Вібропсевдозріджений шар при сушінні пивних дріжджів у камері циліндричної форми створюється вібраційною дією решітки в поєднанні з подаванням теплоносія через неї під шар інертного матеріалу. В цьому випадку можливо зменшити витрати теплоносія до значення, яке забезпечує процес тепло-масообміну.

Зниження швидкості теплоносія, що проходить через шар інертного матеріалу дозволяє збільшити перепад температури по його висоті. Вібраційний вплив сприяє рівномірному розподілу теплоносія по поперечному перерізу сушильної камери та циркуляції інертного матеріалу за її об'ємом.

Змінюючи параметри вібрації, можна впливати на інтенсивність перемішування інертного матеріалу та пористість вібропсевдозрідженого шару. Правильний вибір частоти і амплітуди вібрації відповідно до фізико-механічних властивостей інертного матеріалу дозволяє створити оптимальні умови для процесів, що протікають у сушильній камері.

Загальне диференціальне рівняння руху частинки інертного матеріалу масою m_i щодо віброуючої поверхні в системі координат, пов'язаної із цією поверхнею, має вигляд:

$$m_i \ddot{y} = -m_i g - m_i A \omega^2 \cos \theta - N, \quad (1)$$

де g – прискорення сили тяжіння, м/с^2 ;

N – нормальна реакція поверхні решітки на частинку інертного матеріалу, Н;

A – вертикальна складова амплітуди коливань поверхні, м;

ω – кутова частота коливань, с^{-1} ;

θ – фазовий кут.

Верхній знак перед N відповідає руху частки вниз, а нижній – руху вгору.

Якщо частинка інерту знаходиться на віброуючій поверхні і не відривається від неї, то прискорення відносно цієї поверхні рівне $\ddot{y} = 0$. Тоді з рівняння (1) отримаємо:

$$N = m_i g + m_i A \cdot \omega^2 \cos \theta, \quad (2)$$

Відривання інертної частинки від поверхні відбудеться коли нормальна реакція $N=0$; тоді

$$Aw^2 = -\frac{g}{\cos\theta}, \quad (3)$$

Із рівняння (3) випливає, що мінімальне прискорення віброуючої поверхні, при якому відбудеться відрив частинки, буде при $\cos\theta=\pm 1$, тобто фазових кутах $\theta=0^\circ$ і $\theta=180^\circ$. В ці моменти прискорення дорівнює:

$$Aw^2 = \pm g. \quad (4)$$

Для сипких матеріалів, що піддаються вібраційному впливу, перехід шару до вібропсевдозрідженого залежить не від маси часток, а від прискорення вібрації поверхні, на якій перебуває матеріал.

При цьому, абсолютна величина пористості вібропсевдозрідженого шару залежить як від частоти, так і від амплітуди коливань. Чим нижча частота вібрації решітки, тим більша пористість шару може бути створена при порівняно однакових прискореннях вібраційного впливу. При параметрах частоти від $1g$ до $4g$ об'єм шару збільшується більш інтенсивно, ніж при подальшому підвищенні прискорення вібрації.

Одночасний вплив вібрації і теплоносія, що продувається через вібропсевдозріджений шар знизу вгору, дозволяє одержати рівномірний розподіл теплоносія в об'ємі сушильної камери при збільшенні пористості шару.

У вібропсевдозрідженому шарі інертного матеріалу до розглянутої вище суми сил (1) варто додати силу, яка створюється рухом теплоносія через шар. Рух теплоносія відбувається внаслідок продування газу через шар, а також насосної дії вібропсевдозрідженого шару. У цьому випадку рівняння діючих на частку сил для вібропсевдозріджуваного шару, створюваного вертикальними гармонійними коливаннями решітки, можна записати у вигляді:

$$m_i \ddot{z} = -m_i g - m_i Aw^2 \cos\theta - m_i P_i, \quad (5)$$

де P_i – сила, викликана дією на частку інерту повітрям, що проходить через шар, H .

Для інертної частки з приведеним діаметром $d_{\text{п}}$ сила P_i може бути визначена за формулою

$$P_i = C(\text{Re}) \frac{\pi d_{\text{п}}^2}{4} \cdot \frac{\rho_{\text{п}} \cdot v^2}{2}, \quad (6)$$

де $d_{\text{п}}$ – приведений діаметр частки, м;

$\text{Re} = \frac{v \cdot d_{\text{п}}}{\nu}$ – критерій Рейнольдса;

ν – швидкість теплоносія, м/с;

$$\nu = \frac{\mu}{\rho_n} - \text{кінематичний коефіцієнт в'язкості повітря, м}^2/\text{с}$$

μ – динамічний коефіцієнт в'язкості, Н·с/м²;

ρ_n – щільність повітря, кг/м³;

$C(Re)$ – коефіцієнт тиску газу на частку.

Ураховуючи, що за час висушування маса матеріалу значно менша за масу інертного матеріалу, то однорідність шару буде залежати від параметрів вібрації решітки та силової дії потоку теплоносія. Силу дію потоку теплоносія при забезпеченні оптимального процесу тепломасообміну можна вважати сталою величиною, яка обумовлена подачею необхідної для процесу сушіння кількості теплоносія.

Вібропсевдозрідження інертного матеріалу супроводжується складними циркуляційними процесами в дисперсному середовищі і залежить від ряду факторів. Основними є режими вібрації, характер руху теплоносія через шар та конфігурація робочої камери.

Сушіння рідких продуктів у вібропсевдозрідженому шарі інертного матеріалу також суттєво залежить від характеру зміни температури за його висоті.

Аналіз результатів експериментальних досліджень [1] щодо теплообміну між теплоносієм і частинками твердого матеріалу, що висушується у вібропсевдозрідженому шарі при продуванні теплоносія не погоджуються між собою. Основними причинами є застосування різних методів дослідження і оброблення експериментальних даних, а також прийняті допущення, які обумовлюють складність процесу. Визначені коефіцієнти теплообміну значно відрізняються між собою, що потребує проведення додаткових досліджень з врахуванням особливостей апаратурного оформлення процесу сушіння.

З економічної точки зору, процес сушіння доцільно проводити при більш високій температурі теплоносія, що приводить до зниження його питомих витрат на одиницю випареної вологи, збільшення продуктивності сушарки, зменшення її габаритів та енерговитрат. Поряд з цим, потрібно враховувати термостійкість продуктів сушіння, що характеризується максимально допустимою температурою їх нагрівання.

При висушуванні у вібропсевдозрідженому шарі, частинки інертного матеріалу здійснюють неперервний рух в об'ємі камери як в повздовжньому так і в поперечному її напрямі. Це забезпечує вирівнювання температури в середині шару і зменшення температурних градієнтів як в повздовжньому так і в радіальному напрямі. При цьому підвищення ступеня перемішування частинок сприяє інтенсифікації теплообміну за рахунок турбулізації потоку теплоносія.

Типовим для зміни температури теплоносія або концентрації вологи в ньому по висоті вібропсевдозрідженого шару є надзвичайно швидка зміна значення цих параметрів біля основи шару (активна зона) і сталість в його основному об'ємі. Вирівнювання температур і концентрацій усередині шару як у повздовжньому, так і у радіальному напрямках відбувається за рахунок інтенсивної циркуляції частинок [3].

Під час висушувані рідкого продукту на поверхні інертного матеріалу в потоці теплоносія елементарна поверхня теплообміну dF_T може бути виражена через масу і фізико-механічні характеристики матеріалу частинок. При цьому кількість частинок n_0 , що перебувають в одиниці об'єму шару при постійній його середній пористості, визначається за формулою (7):

$$n_0 = \frac{M_{\text{ш}}}{\rho_i V_i S_p H_{\text{ш}}}, \quad (7)$$

де V_i – об'єм однієї частинки інертного матеріалу, м^3 ;

$M_{\text{ш}}$ – маса інертних частинок у вібропсевдозрідженому шарі, кг ;

$H_{\text{ш}}$ – висота шару інертного матеріалу, м ;

S_p – площа газорозподільної решітки, м^2 ;

ρ_i – густина матеріалу інертної частинки, $\text{кг}/\text{м}^3$.

Тоді поверхня частинок кубічної форми з стороною a в елементарному об'ємі визначається як, м^2 :

$$dF_T = \frac{6M_{\text{ш}}}{r_i a H_{\text{ш}}} dh. \quad (8)$$

При інтегруванні у відповідних межах рівняння теплового балансу між частинками твердого матеріалу і теплоносія в елементі вібропсевдозрідженого шару інертних частинок та з врахуванням рівняння (8) отримаємо:

$$\int_{t_1}^{t_h} \frac{dt_h}{t_h - t_T} = - \frac{6\alpha M_T}{\rho_i a M_{\text{п}} c_{\text{п}} H_{\text{ш}}} \int_0^h dh \quad (9)$$

де $M_{\text{п}}$ – витрата теплоносія, $\text{м}^3/\text{с}$;

$c_{\text{п}}$ – теплоємність теплоносія, $\text{Дж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$) і визначаємо залежність, де температура теплоносія по висоті шару t_h виражена через температуру частинок:

$$t_h = t_T + (t_1 - t_T) \exp\left[-\frac{6\alpha M_{\text{ш}}}{\rho_i a M_{\text{п}} c_{\text{п}} H_{\text{ш}}} h\right], \quad (10)$$

де t_h , t_T – температура теплоносія по висоті вібропсевдозрідженого шару h , інертної частинки в шарі, $^{\circ}\text{C}$;

t_1 – температура теплоносія початкова, $^{\circ}\text{C}$.

Для якісної і кількісної оцінки теплообміну між теплоносієм і частинками інертного матеріалу було досліджено зміну температурного поля по висоті вібропсевдозрідженого шару та визначено висоту зони інтенсивного теплообміну (активної зони).

Визначення висоти активної зони, наприкінці якої практично досягаються рівноважні температури та концентрації речовини, що дифундує, необхідні як для розрахунку процесів тепло- і масообміну між частинками і середовищем, так і для раціонального розміщення пристроїв для розпилення пивних дріжджів на поверхню частинок інертного матеріалу.

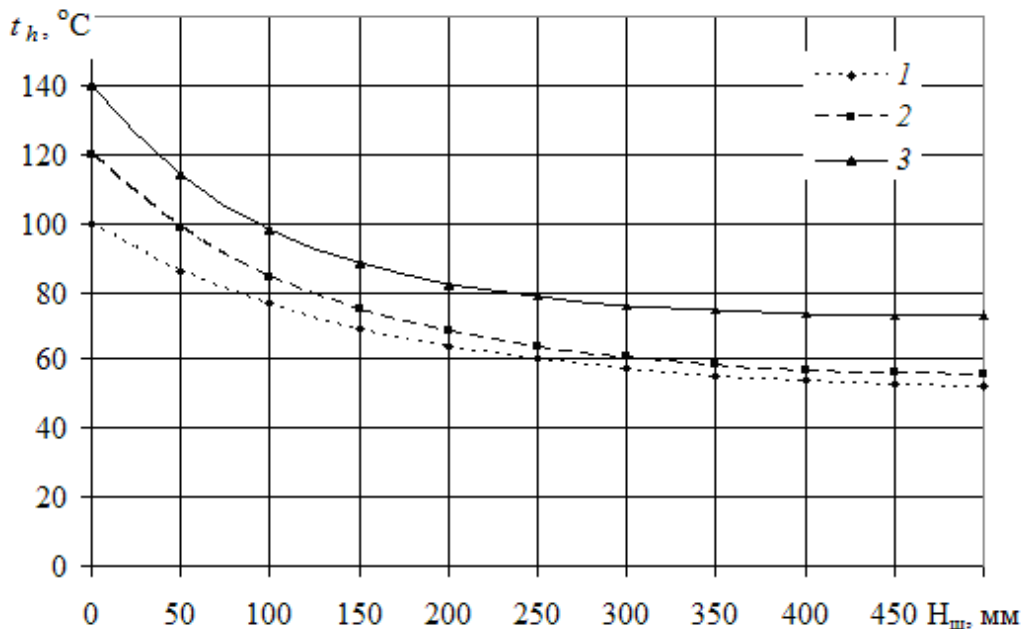
Висота активної зони теплообміну $H_{аз}$ визначається з рівняння (10):

$$H_{аз} = 1,67 \cdot 10^{-3} \frac{t_1 v \rho_n c_{пa}}{(1 - \epsilon_{ш})} \quad (11)$$

Дослідження процесу сушіння пивних дріжджів у вібропсевдозрідженому шарі інертних частинок проводились на експериментальній установці при неперервному режимі роботи установки та при наступних припущеннях:

- у наслідок малого термічного опору плівки матеріалу, градієнт температури в ній прямує до нуля;
- теплофізичні характеристики теплоносія і матеріалу незмінні;
- втрата теплоти шаром в навколишнє середовище відсутня.

Аналіз отриманих результатів показав, температура для всіх початкових висот шару різко змінюється на відстань 160 – 200 мм від газорозподільної решітки і поступово переходить до сталої величини з підвищенням висоти шару (рисунок 1). Вплив температури з достовірною точністю описується експоненціальним рівнянням (10).



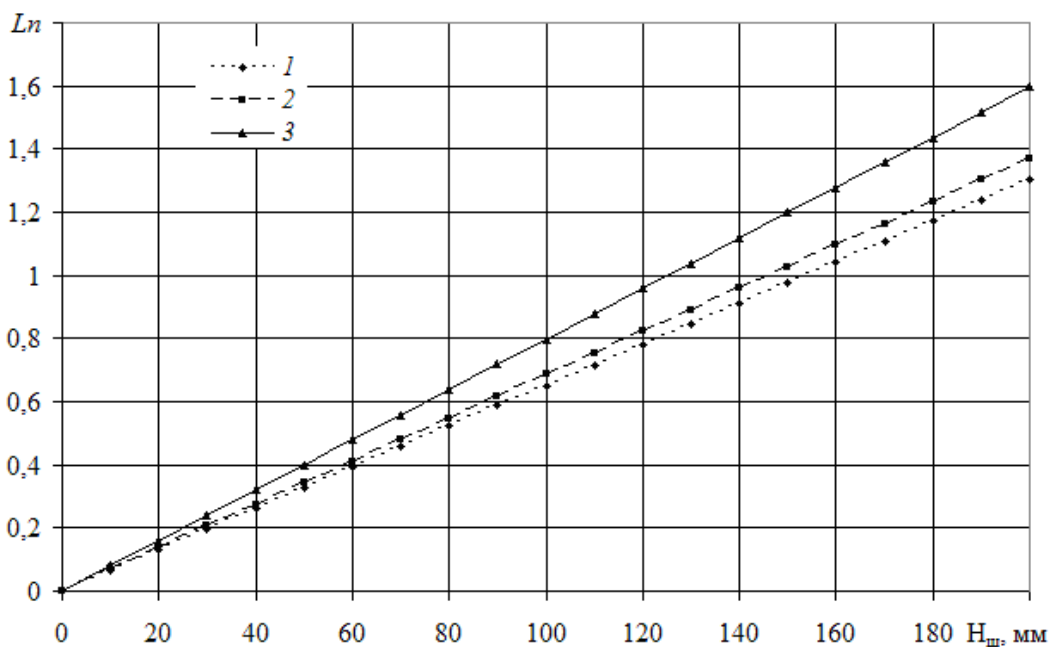
1 – 100, 2 – 120, 3 – 140

Рисунок 1 – Зміна температури теплоносія по висоті вібропсевдозрідженого шару інертного матеріалу при швидкості теплоносія 3 м/с та початковою температурою, °C

Для відповідних швидкостей теплоносія $v=2,8 - 3,2$ м/с та параметрів вібрації: амплітуда коливань $A=22$ мм, частота коливань $f=7,5$ Гц, що забезпечують інтенсивне перемішування інертних частинок, зміна початкової температури від 100 °С до 140 °С супроводжується збільшенням інтенсивності поглинання теплоти, що підводиться в шар, і, відповідно, збільшенням швидкості сушіння. Це збільшення характеризується коефіцієнтами теплообміну, які отримані на основі їх локальних значень шляхом усереднення по поверхні теплообміну.

Середнє значення коефіцієнтів теплообміну визначалось по кутовим показникам зміни температури теплоносія по висоті вібропсевдозрідженого шару інертного матеріалу, побудованих в напівлогарифмічній системі координат $\ln \frac{t_h - t_T}{t_1 - t_T} = \left[-\frac{6\alpha M_{ш}}{\rho_i a M_{п} c_{п}} \frac{h}{H_{ш}} \right]$, яка отримана шляхом перетворення

рівняння (10). Це дозволило отримати достатньо точні значення коефіцієнтів теплообміну, так як за основу був прийнятий принцип зміни температури теплоносія по висоті шару при ідеальному перемішуванні інертних частинок і наскрізного потоку теплоносія (рисунок 2). При цьому значення коефіцієнтів теплообміну при оптимальному гідродинамічному режимі, температурі теплоносія $100, 120, 140$ °С для швидкості теплоносія $3,2$ м/с відповідно рівне $82,7, 86,9, 101,3$ Вт/(м²·град), для $3,0 - 89,5, 97,8, 120,5$, для $2,8$ м/с – $109,4, 121,8, 138,3$ Вт/(м²·град). Це свідчить про їх збільшення з збільшенням температури та зменшенням швидкості теплоносія.



1 – 100, 2 – 120, 3 – 140

Рисунок 2 – Зміна температури теплоносія в зоні активного тепло масообміну вібропсевдозрідженого шару інертного матеріалу при швидкості теплоносія $3,2$ м/с та початковою температурою, °С

З аналізу отриманих результатів випливає, що при оптимальному режимі вібропсевдозрідження збільшення швидкості теплоносія сприяє інтенсивному перемішуванню частинок в шарі, приводить до інтенсифікації теплообміну та підвищенню температури висушених дріжджів.

При цьому висота зони активного теплообміну практично залишається постійною і знаходиться в межах – 160 – 200 мм, при зміні швидкості теплоносія від 2,8 м/с до 3,2 м/с.

У процесі математичного оброблення результатів експериментальних даних по теплообміну в вібропсевдозрідженому шарі між плівкою пивних дріжджів на поверхні інертного матеріалу та теплоносієм при неперервному режимі роботи установки отримано рівняння (12) для визначення коефіцієнтів теплообміну:

$$Nu = 4 \cdot 10^7 Re^{-0,33}, \quad (12)$$

при $v=3,2 - 2,8$ м/с; $Pr=0,7$; $t_l=100 - 140$ °С; $A=22$ мм; $f=7,5$ Гц.

Через велику питому поверхню частинок інертного матеріалу, як носія розпиленого продукту, процес теплообміну між ними і теплоносієм проходить дуже інтенсивно, що сприяє швидкому вирівнюванню температури теплоносія за зоною активного теплообміну. При цьому температура висушеної плівки пивних дріжджів практично залишається постійною по висоті шару і для інженерних розрахунків сушильних установок може бути прийнятою рівною температурі теплоносія на виході з шару. Так, для швидкості теплоносія 2,8 м/с при температурі теплоносія 140 °С, середнє значення температури частинки відповідно рівне 67 °С.

Висновки. Таким чином, враховуючи характер циркуляції інертного матеріалу у вібропсевдозрідженому шарі та зміни температури теплоносія по висоті шару, форсунки для подавання рідкого продукту доцільно розташовувати в діаметральній площині над зоною активного теплообміну $H_{аз}$. Висота зони змінюється в межах 160 – 200 мм за застосування як інертного матеріалу частинок фторопласту з $d_p=4,83$ мм, амплітудою та частотою коливань відповідно 22 мм і 7,5 Гц, швидкості теплоносія 2,8 – 3,2 м/с, та змінні температури в межах 120 – 140 °С.

Література

1. Куцакова, В.Е. Интенсификация тепло- и массообмена при сушке пищевых продуктов / В.Е. Куцакова, А.Н. Богатырев. – М.: Агропромиздат, 1987. – 236 с.
2. Куцакова, В.Е. Некоторые кинетические закономерности процесса сушки растворов в псевдооживленном слое инертных частиц / В.Е. Куцакова, Ю.В. Уткин // ТОХТ. – 1984. – Т. XVIII. – №4. – С. 107 – 114.
3. Сыромятников, Н.И. Тепло- и массообмен в кипящем слое / Н.И. Сыромятников, Л.К. Васанова. – М.: Химия, 1967. – 176 с.
4. Членов, В.А. Сушка сыпучих материалов в виброкипящем слое / В.А. Членов, Н.В. Михайлов. – М.: Стройиздат, 1967. – 224 с.