

SUBSTANTIATION OF THE OPERATING MODE OF THE EQUIPMENT FOR MYCELIUM BIOMASS DRYING

V. Serediuk, O. Chepeliuk, O. Chepeliuk

National University of Food Technologies

Key words:

*Rotary drum dryer
Convective-conductive
heat transfer
Mycelium
Drying
Temperature*

Article history:

Received 03.10.2019
Received in revised form
17.10.2019
Accepted 06.11.2019

Corresponding author:

O. Chepeliuk

E-mail:

lenasandul@yahoo.com

ABSTRACT

In order to increase the efficiency of biotechnology enterprises, it is necessary to ensure complete recycling of biosynthesis by-products. A mixture of wheat bran with mycelium biomass, which is formed in the production of citric acid, after drying, is advisable to use for animal feeding. The equipment traditionally used to dehydrate such mixtures is rotary dryers. The disadvantages inherent for them, especially the excessive heat consumption, do not allow businesses to increase their profitability.

To solve this problem, it is proposed to improve the rotary dryer design by placing the buckets on the inner surface of the drum with a slope of 1—2° to the generatrix of the cylinder, make them in the form of hollow buckets. The heating agent — hot air is supplied both inside the drum and into the cavity of the buckets, which allows to realize the convective-conductive heat exchange. This results in a significant increase in the amount of moisture extracted from the unit volume of the rotary dryer, reducing the material drying time. Regulating devices have been developed for supplying the heat agent into the bucket's cavities and for its further removal.

Investigation of the influence of the drum rotation frequency, the temperature and the heating agent speed on the temperature of the material layer was conducted using the application software Flow Vision and Solidworks Flow Simulation. When modeling it was taken into account the changes in the thermophysical characteristics of the mycelium during the drying process.

The results of the computational experiments confirmed the expediency of making the proposed changes in the basic rotary dryer design: the temperature of the material layer in the dryer reaches the required values much faster.

By the method of the full factorial experiment the regression equation was obtained, in accordance with which the drying result first of all is determined by the temperature of hot air, which is fed directly into the dryer and inside the buckets. The rational operating mode of the advanced dryer, at which the useful substances of the mycelium are stored, is the hot air temperature not above of 81.5°C.

ОБҐРУНТУВАННЯ РЕЖИМУ РОБОТИ ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ СУШІННЯ МІЦЕЛІАЛЬНОЇ БІОМАСИ

В. В. Середюк, О. О. Чепелюк, О. М. Чепелюк

Національний університет харчових технологій

Для підвищення ефективності роботи підприємств біотехнологічної промисловості необхідно забезпечити повне перероблення побічних продуктів біосинтезу. Суміш пшеничних висівок з міцеліальною біомасою, яка утворюється при виробництві лимонної кислоти, після висушування доцільно використовувати для відгодівлі тварин. Обладнанням, яке традиційно використовується для зневоднення таких сумішей, є барабанні сушарки. Притаманні їм недоліки, насамперед надмірні витрати теплоти, не дають можливості підприємствам підвищити рентабельність роботи.

Для вирішення цього завдання запропоновано удосконалити конструкцію барабанної сушарки, розмістивши по внутрішній поверхні барабана з нахилом $1\text{--}2^\circ$ до твірної циліндра насадки, виконані у вигляді порожнистих ковшів. Гріючий агент — гаряче повітря — подається і всередину барабана, і в порожнини ковшів, завдяки чому здійснюється конвективно-кондуктивний теплообмін. У результаті забезпечується значне збільшення напруження за вилученою вологою з одиниці об'єму барабанної сушарки, зменшується тривалість сушіння матеріалу. Для подачі теплоагента в порожнини ковшів і подальшого його відведення розроблені регулюючі пристрої.

Дослідження впливу частоти обертання барабана, температури і швидкості руху теплоносія на температуру шару матеріалу проведені з використанням прикладного програмного забезпечення Flow Vision і Solidworks Flow Simulation. У ході моделювання враховано зміни теплофізичних характеристик міцелію в процесі сушіння. Результати обчислювальних експериментів підтвердили доцільність внесення в базову конструкцію сушарки запропонованих змін: температура шару матеріалу в сушарці досягає потрібних значень значно швидше.

Методом повного факторного експерименту отримано рівняння регресії, згідно з яким результат висушування насамперед визначається температурою гарячого повітря, яке подається безпосередньо в сушарку і всередину ковшів. Раціональними режимами роботи удосконаленої сушарки, при яких зберігаються корисні речовини міцелію, є температура гарячого повітря не вище $81,5^\circ\text{C}$.

Ключові слова: барабанна сушарка, конвективно-кондуктивний теплообмін, міцелій, сушіння, температура.

Постановка проблеми. У промисловості особлива увага приділяється ефективному використанню матеріальних ресурсів, в тому числі й побічних продуктів, зокрема міцелію, що утворюється при виробництві лимонної

кислоти. Значний вміст у міцелії органічних і мінеральних речовин, вітамінів, ферментів робить його цінною сировиною для виробництва кормів для тварин [1]. Поживна цінність міцелію становить 0,9—1,2 корм. одиниці. На сьогодні лише незначна частина міцелію висушується, решта — використовується для відгодівлі тварин після інактивації та часткового зневоднення пресуванням, що обмежує тривалість його зберігання.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Одним зі способів перероблення міцеліальної біомаси є повторне використання грибкового міцелію для ферментації лимонної кислоти [2], однак складність реалізації цієї технології робить його нерентабельним. Ефективнішим є використання міцелію для виробництва кормів для тварин. За відомчими нормами, міцелій рекомендовано висушувати до вологості 10—12% у сушильних апаратах барабанного типу. Такі конструкції надійні в роботі, високопродуктивні й досить ефективні, мають порівняно низьку вартість, однак їх використання пов'язане з великими витратами енергоресурсів і потребує визначення спеціальних режимів для висушування конкретної продукції, тому вдосконалення сушарок барабанного типу є актуальним завданням.

Відомі результати експериментальних досліджень процесу сушіння, отримані методом синхронного аналізу [3]. Для впровадження їх у промислове виробництво необхідно визначити і враховувати масштабні коефіцієнти. Моделювання процесу сушіння в пакетах прикладних програм надає можливість створити геометричні моделі і задати граничні умови такими, щоб вони відповідали виробничим умовам.

Для отримання адекватних результатів при моделюванні процесу сушіння важливо враховувати зміни властивостей матеріалу, які відбуваються в ході теплових і масообмінних процесів. У науковій літературі недостатньо відомостей щодо характеристик продуктів, напівпродуктів і побічних продуктів мікробіологічного синтезу. Одними із небагатьох є праці [4; 5], спрямовані на ідентифікацію теплофізичних і сорбційно-структурних характеристик міцелію ністатину шляхом комплексного визначення теплофізичних характеристик, заснованого на вирішенні рівняння теплопровідності для необмеженого циліндра з граничними умовами першого роду, залежними від часу. В результаті оброблення експериментальних даних отримано кореляційні залежності коефіцієнтів теплопровідності, температуропровідності, питомої теплоємності міцелію від вмісту води в матеріалі U , який, у свою чергу, залежить від температури t [4]:

- максимальний гігроскопічний вологовміст матеріалу:

$$U_{\text{м.г}} = 2,540 - 3,919 \cdot 10^{-2} \cdot t + 6,580 \cdot 10^{-4} \cdot t^2 - 6,561 \cdot 10^{-6} \cdot t^3; \quad (1)$$

- коефіцієнт теплопровідності:

$$\lambda = 0,06 + 0,01e - 0,5 \left(\frac{U - 3,023}{0,134} \right)^2; \quad (2)$$

- коефіцієнт температуропровідності:

$$a = \frac{5,555 - 1,254U^2 + 0,077U^4}{1 - 0,213U^2 + 0,011U^4 + 1,54 \cdot 10^{-4}U^6} \cdot 10^{-8}; \quad (3)$$

- питома теплоємність міцелію:

$$c = 782,96 + 19,687 \cdot U. \quad (4)$$

Мета статті: обґрунтування режиму роботи удосконаленої барабанної сушарки, в якій використовується контактнo-конвективний спосіб обігріву, для сушіння суміші міцелію з висівками, яка буде використана як складова кормів для тварин.

Матеріали і методи. Об'єктом досліджень є процес сушіння суміші міцелію з висівками, що відбувається у сушильному апараті барабанного типу з конвективно-кондуктивним теплообміном. Предмет досліджень — режими роботи вдосконаленої барабанної сушарки.

Розглянуто висушування матеріалу в барабанній сушарці з насадками, виконаними у вигляді пустотілих ковшів, встановлених по внутрішній поверхні барабана по всій його довжині з нахилом 1—2° відносно твірної циліндра в напрямку розвантаження. Теплоагент подається всередину сушарки і в кожен із ковшів. Підведення і відведення теплоносія в ковші здійснюється з допомогою регулюючих пристроїв [6].

У ході дослідження використана методологія повного факторного експерименту та виконано імітаційне моделювання в пакетах Flow Vision і Solidworks Flow Simulation. Керованими параметрами було обрано частоту обертання барабана (3—5 об./хв), температуру (80—85°C) і швидкість подачі теплоносія (1—3 м/с). Цільовою функцією — температуру шару матеріалу, який висушується.

У ході моделювання враховані зміни теплофізичних характеристик (коефіцієнтів тепло- і температуропровідності, питомої теплоємності) міцелію в процесі сушіння.

Міцелій характеризується як перехідно-пористий матеріал [5], тому при проведенні обчислювальних експериментів використана модель «Пористе середовище з порозністю шару 0,54». Гідравлічний опір пористого середовища задано фільтром анізотропного опору.

Геометричні моделі барабана для сушіння, насадок у вигляді ковшів і завантажувального бункера (рис. 1) створені в програмах Solidworks і Компас 3D для подальшого моделювання в програмних комплексах Solidworks Flow Simulation і Flow Vision відповідно.

При постановці задачі задані початкові значення турбулізації потоку, початковий розподіл температури каркаса (міцелію) у всій розрахунковій області ($T_{\text{ini, carcass}} = 40^\circ\text{C}$).

Теплофізичні характеристики задані у вигляді залежностей від вологості (формули 2—4), який, у свою чергу, є функцією температури (формула 1).

Граничні умови (частота обертання барабана, температура теплоносія і швидкість його подачі), які описують взаємодію суміші міцелію з висівками з

елементами обладнання, змінювались у восьми серіях дослідів згідно з планом ПФЕ. На поверхнях контакту матеріалу з обладнанням задані граничні умови «Стінка» з логарифмічним профілем швидкості. На виході матеріалу із сушарки задана гранична умова «Вільний вихід» з атмосферним тиском.

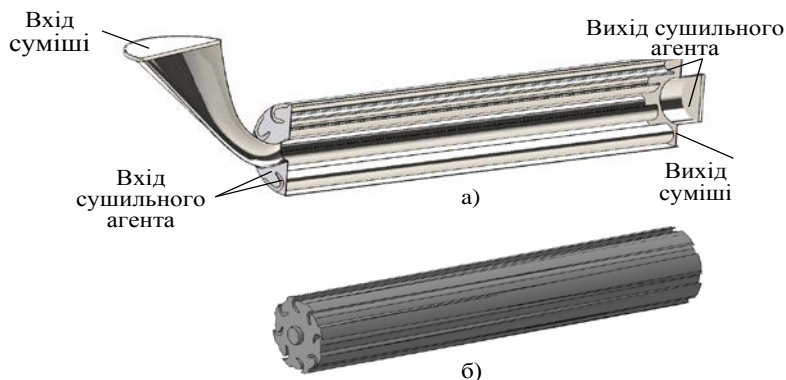


Рис. 1. Геометричні моделі барабанної сушарки, виконані у програмі Solidworks (а) і Компас-3D (б)

Результати і обговорення. Визначальним показником, який характеризує процес сушіння термочутливих матеріалів, є температура висушуваного продукту, оскільки перевищення її граничних значень призводить до інактивування ферментів руйнування інших корисних речовин у міцелії. Оскільки висушений з висівками міцелій передбачається використовувати на корм тваринам і це має бути продукт тривалого зберігання, важливо витримувати й задану кінцеву вологість продукту. Але у використаному програмному забезпеченні проаналізувати цей показник неможливо.

Результати повного факторного експерименту засвідчили, що серед трьох розглянутих параметрів на кінцевий результат (температуру шару матеріалу) найбільше впливає температура теплоагента, інші два параметри виявилися незначущими:

$$t_{\text{ш.м}} = 78,41 + 4,2 \cdot \frac{t - 82,5}{2,5},$$

де $t_{\text{ш.м}}$, t — температура шару матеріалу і теплоагента відповідно, °С.

Матеріал рухається в барабані, поступово прогріваючись від початкових 40°С до кінцевої температури, яка залежить від умов теплообміну, насамперед, температури теплоносія. В часі i , відповідно, по довжині барабана, температура шару міцелію змінюється за експоненційним законом (рис. 2), набуваючи найбільших значень 82,6°С за найбільшої з розглянутих температур. Різниця між базовим варіантом, в якому ковші не обігрівуються, і подаванням в них теплоносія температурою 85°С становить 2,5°С, або 3,1%.

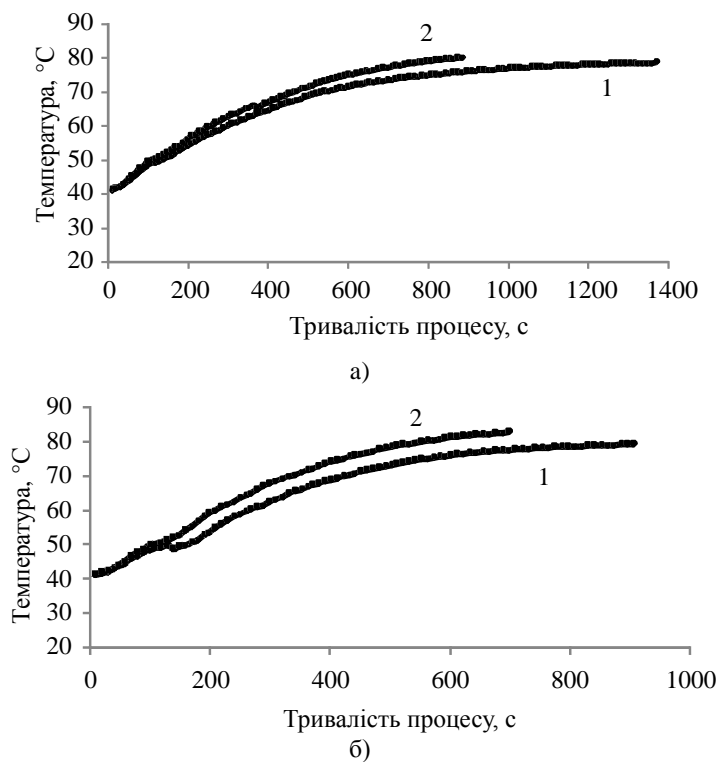


Рис. 2. Зміна в часі температури шару матеріалу в барабанній сушарці для варіантів без подачі (1) та з подачею (2) теплоносія в ковші при температурі теплоносія: а — 80°C, б — 85°C

Узагальнена залежність, яка характеризує вплив температури теплоносія на температуру шару матеріалу на виході з барабанної сушарки, в якій реалізований процес конвективно-кондуктивного теплообміну, представлена на рис. 3.

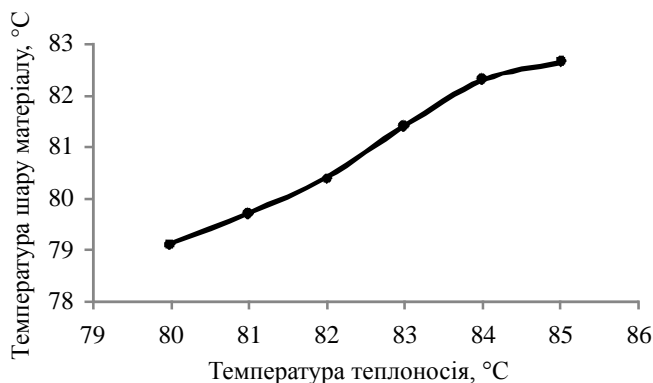


Рис. 3. Залежність температури шару матеріалу на виході із сушарки від температури теплоносія

При висушуванні міцелію рекомендується, щоб його температура не перевищувала 80°C для збереження поживних речовин і ферментів, тому для розглянутої конструкції сушарки температура теплоносія має становити не вище $81,5^{\circ}\text{C}$ (рис. 3). Саме це значення використано при проведенні обчислювальних експериментів у програмі Solidworks Flow Simulation. Їх результати свідчать, що за умов конвективно-кондуктивного теплообміну температура суміші міцелію з висівками досягає усталених значень 79°C на довжині сушарки 6 м і надалі не змінюється (рис. 4), що надає можливість зменшити довжину барабана сушарки з 8 до 6 м.

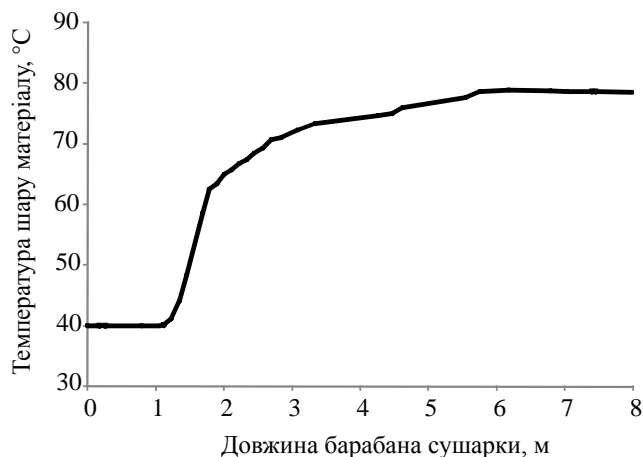


Рис. 4. Зміна температури шару матеріалу по довжині барабана

Перевагою запропонованої конструкції ковшів є можливість вивантаження матеріалу над потоком теплоносія, проходячи крізь який матеріал отримує більше теплоти і, відповідно, віддає більше вологи.

Продуктивність сушарки і якість висушування часточок вологого матеріалу залежить від тривалості їх перебування в барабані. А вона, у свою чергу, — від швидкості руху часточок.

Швидкість кожної із часточок циклічно змінюється по довжині барабана. При вході в барабан вологий матеріал потрапляє на ковші, в яких рухається до моменту висипання (цей етап триває близько 6 с). Швидкість часточок при цьому дорівнює куловій швидкості барабана. В момент висипання з ковшів швидкість різко збільшується внаслідок вільного падіння під дією сили тяжіння, а надалі цикл повторюється. Осьова складова швидкості часточки формується завдяки нахилу барабана, винесенню її з теплоносієм та нахилу ковшів відносно твірної барабана.

Узагальнена швидкість матеріалу у вигляді графічної залежності (рис. 5, 6) демонструє, що максимальні швидкості часточок спостерігаються на вході в сушарку при їх русі з приймального бункера. Швидкість вологого матеріалу інтенсивно зменшується. Її незначне підвищення на відстані 0,5 м від входу в барабан обумовлене конфігурацією ділянки виходу з бункера в барабан. Стабілізація значень швидкості відбувається приблизно на відстані 1 м від місця

входу продукту на рівні 0,3 м/с. Така закономірність характерна як для графіків, отриманих у FlowVision, так і у Solidworks Flow Simulation.

Характер отриманих залежностей однотипний. Як видно, швидкість матеріалу стабілізується на рівні 0,3 м/с. Результати зміни швидкості, отримані у FlowVision і Solidworks Flow Simulation, практично однакові, що свідчить про правильність постановки задачі й адекватність отриманих результатів.

Дані щодо швидкості руху матеріалу в сушарці складно отримати експериментальним шляхом. Визначення їх з допомогою імітаційного моделювання спрощує визначення тривалості перебування матеріалу в барабані і є корисним для інженерних розрахунків.

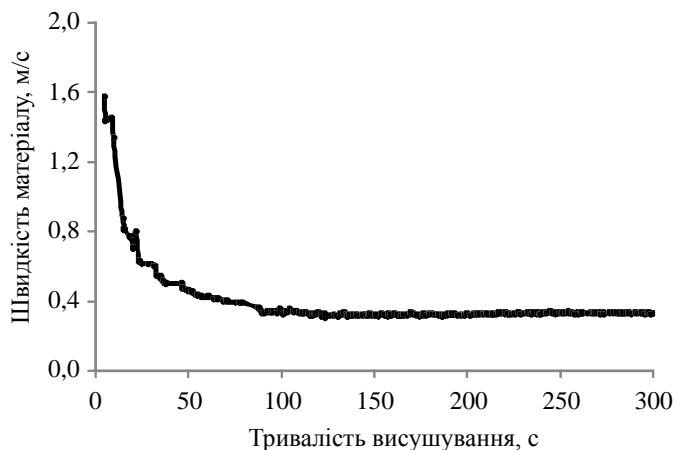


Рис. 5. Зміна швидкості матеріалу в часі, обчислена у програмі FlowVision

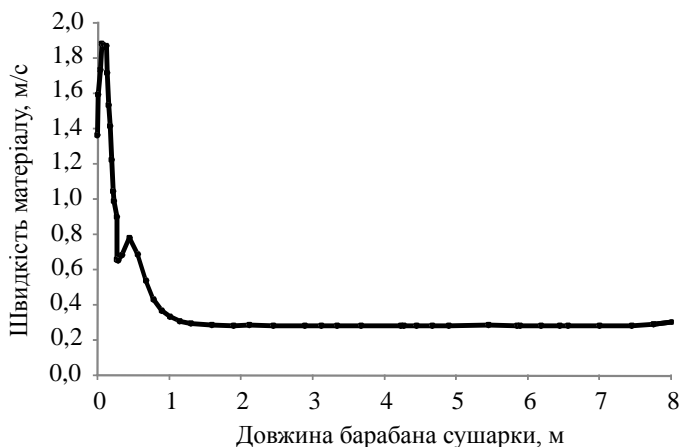


Рис. 6. Розподіл швидкості по довжині барабана, обчислений у програмі Solidworks Flow Simulation

Зі збільшенням швидкості руху теплоносія до 3 м/с процес сушіння скорочується і становить 12,6 хв. Оскільки за розрахунками швидкість виносу найменших часточок складає 3,03 м/с, швидкість теплоагента понад 3 м/с викорис-

товувати недоцільно. З додатковим підігріванням ковшів за рахунок подавання в них гарячого повітря матеріал прогрівається значно швидше.

Висновки

Насадки всередині барабана сушарки доцільно виконувати у вигляді порожнистих ковшів, в які подається теплоагент. Використання конвективно-кондуктивного теплообміну в барабанних сушарках інтенсифікує процес і забезпечує рівномірне прогрівання шару матеріалу до заданих значень, зменшує тривалість сушіння матеріалу.

Температура шару матеріалу, який висушується, змінюється за експоненційним законом і залежить насамперед від температури теплоагента. Рациональним режимом роботи удосконаленої сушарки для висушування суміші міцеляльної біомаси і висівок є температура теплоносія 81,5°C.

Література

1. Клишанец Е. Т., Троцкая Т. П., Апанович З. В. Исследование свойств хитина различного происхождения. *Вестник Гродзенскага дзяржаўнага ўніверсітэта імя Янкі Купалы. Серыя 6. Тэхніка*. 2015. № 1 (198). С. 99—104.
2. Ikram ul Haq, Sauda Ali, Asad Rehman. Re-use of fungal mycelium for the production of citric acid by *Aspergillus niger*. *Pakistan Journal of Botany*. 2003. № 35(4). P. 553—556.
3. Роман Т. О., Мазуренко О. Г., Кубайчук О. О., Вовкодав Н. І. Моделювання процесу сушіння ніжок печериці. *Наукові праці НУХТ*. 2015. Том 21. № 6. С. 147—153.
4. Чайка А. Ю., Исаев В. Н., Сливченко Е. С. Исследование теплофизических характеристик мицелия нистатина. *Известия вузов. Химия и химическая технология*. 2010. Т. 53, вып. 5. С. 119—120.
5. Чайка А. Ю., Исаев В. Н., Сливченко Е. С. Исследование сорбционно-структурных характеристик мицелия нистатина. *Известия вузов. Химия и химическая технология*. 2010. Т. 53, вып. 1. С. 100—102.
6. Середюк В. В., Прохоров О. М. Патент України 119355. Київ: ДП «Український інститут інтелектуальної власності». 2017.