

6. *Межов И. С.* Исследование влияния основных факторов на выход радиальных пиломатериалов / И. С. Межов, Ф. Н. Карпунин, Л. К. Осипова // *Деревообрабатывающая промышленность*. – 1996. – № 4. – С. 11-13.

7. *Межов И. С.* Основы повышения объемного и спецификационного выхода пиломатериалов и заготовок при раскросе бревен брусом-сегментным способом на специализированном оборудовании : автореф. дис. ... д-ра техн. наук : спец. 05.21.05 / И. С. Межов. – СПб., 1994. – 33 с.

8. *Мчедlishvili С. Н.* Влияние ориентированного по сучкам распиливания резонансных бревен развально-сегментным способом на качество радиальных пиломатериалов / С. Н. Мчедlishvili // *Новое в технологии и материалах деревообработ. пром-сти*. – М. : МЛТИ, 1987. – Вып. 190. – С. 25-28.

9. *Патент № 2310555* Российская Федерация. Способ раскроса бревен на радиальные пиленые заготовки / Матухнов М. М. ; заявитель и патентообладатель Матухнов Михаил Михайлович. – № 2006110914/03 ; заявл. 04.04.2006 ; опубл. 20.11.2007, Бюл. № 32.

10. *Марченко Н. В.* Способ выпилки радиальных пиломатериалов из круглых сортиментов / Н. В. Марченко, З. С. Сірко // *Annals of Warsaw University of Life Sciences – SGGW Forestry and Wood Technology*. – 2010. – № 71. – С.47-51.

11. *Патент* України на корисну модель № 82240. Спосіб отримання радіальних пиломатеріалів / Сірко З. С., Марченко Н. В., Головач В. М. ; заявник та патентовласник Національний університет біоресурсів та природокористування України. – № u 2013 01829 ; заявл. 14.02.2013 ; опубл. 25.07.2013, Бюл. № 14.

УДК 519.876.5:664.848.022

І.І. Медведкова, канд. техн. наук

Донецький національний університет економіки і торгівлі імені Михайла Туган-Барановського, м. Донецьк, Україна

ДЕЯКІ ОСОБЛИВОСТІ МАТЕМАТИЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ СУШІННЯ КУЛЬТИВОВАНИХ ГРИБІВ

И. И. Медведкова, канд. техн. наук

Донецкий национальный университет экономики и торговли имени Михаила Туган-Барановского, г. Донецк, Украина

НЕКОТОРЫЕ ОСОБЕННОСТИ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССА СУШКИ КУЛЬТИВИРУЕМЫХ ГРИБОВ

Inna Medvedkova, PhD in Technical Sciences

Donetsk National University of Economics and Trade named after Mykhaylo Tugan-Baranovsky, Donetsk, Ukraine

SOME PECULIARITIES OF MATHEMATICAL MODELLING OF THE PROCESS OF DRYING OF CULTIVATED MUSHROOMS

Запропоновано розв'язок завдання розподілу температурних полів у шарі продукту у процесі його зберігання методами математичного моделювання на прикладі сушіння свіжих культивованих грибів. Проведено аналіз сучасного стану практики сушіння грибної продукції, дано оцінку методів математичного моделювання тепломасопереносу в щільному шарі, що дозволяє одержати повну картину розподілу потенціалів переносу в тілі або системі тіл, простежити зміну полів потенціалів у часі й на цій основі дати детальний аналіз кінетики й динаміки процесу сушіння культивованих грибів.

Ключові слова: математичне моделювання, сушіння, культивовані гриби, якість, зберігання.

Предложено решение задачи распределения температурных полей в слое продукта при его хранении методами математического моделирования на примере сушки свежих культивируемых грибов. Проведен анализ современного состояния практики сушки грибной продукции, дана оценка методов математического моделирования тепломасопереноса в плотном слое, что позволяет получить полную картину распределения потенциалов переноса в теле или системе тел, проследить изменение полей потенциалов во времени и на этой основе дать детальный анализ кинетики и динамики процесса сушки культивируемых грибов.

Ключевые слова: математическое моделирование, сушка, культивируемые грибы, качество, хранение.

This article offers solutions for the distribution of temperature fields in the layer of the product during storage methods on the example of mathematical modeling of drying of fresh cultivated mushrooms. Analyzes the current state of practice drying mushroom products, and the estimation methods of mathematical modeling of heat and mass transfer in a dense layer that provides a broad

picture of the distribution of potentials transfer in the body or system of bodies, to track changes in the field potentials in time and on this basis to give a detailed analysis of the kinetics and dynamics of process of drying of cultivated mushrooms.

Key words: *mathematical modeling, drying, cultivated mushrooms, quality, storage.*

Постановка проблеми. Одним з розповсюджених методів збереження й переробки сільськогосподарської сировини є сушіння. У зв'язку з цим виникає необхідність у розробленні нових способів сушіння, що забезпечують високу якість готового продукту, створення умов для більш повної переробки зібраного врожаю, зменшення втрат, автоматизацію, механізацію й значну інтенсифікацію цього процесу, а також зниження питомих енерговитрат.

Рішення актуальних завдань у сфері техніки й технології сушіння безпосередньо пов'язують з наступними факторами: вивченням і поглибленням уяви про фізичну сутність і закономірність переносу енергії й речовини при різних методах сушіння; подальшим вивченням властивостей матеріалу, як об'єкта сушіння; застосуванням новітніх фізико-хімічних методів дослідження, обґрунтуванням методів управління механізмом переносу вологи всередині матеріалу у процесах сушіння; створенням науково обґрунтованої методики техніко-економічної оцінки сушильних установок.

Сушіння вологих матеріалів – це складний термо- і масодифузійний процес. Для складних багатокомпонентних систем, якою є сільськогосподарська сировина й зокрема – культивовані гриби, процес сушіння представляється у вигляді двох складових: теплофізичного й технологічного. Якщо теплофізичний процес сушіння визначає «чисте» переміщення тепла й вологи крізь товщу продукту, то технологічний являє собою сукупність процесів переміщення вологи й тепла, що супроводжуються хімічними, біохімічними й структурно-механічними змінами.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Сучасна теорія тепло- і масообміну розглядає внутрішній тепло- і масоперенос у вологих тілах як комплекс незворотних нестационарних термодинамічних явищ, органічно пов'язаних між собою, що впливають один на одного, та рушійних сил, які відбуваються під дією ряду термодинамічних факторів.

Швидкість і характер протікання цих процесів у підсумку визначають якість кінцевого готового продукту. Тому вибір способу сушіння, оптимального режиму й конструкції сушильного апарату повинні бути безпосередньо пов'язані з властивостями матеріалу, вимогами до кінцевого продукту, який повинен базуватися на наукових основах технології сушіння, до яких, безсумнівно, відноситься процес математичного моделювання.

В основу цієї теорії лягли роботи шкіл фізиків різних років (О. Онзагера, К. Денбига, С. де Гроота, І. Пригожина й ін.) [2], продовжені вченими країн СНД [5; 7].

Виділення не вирішених раніше частин загальної проблеми. Проблеми внутрішнього масопереносу в матеріалах при накладенні електромагнітних полів присвячено багато робіт.

Однак вони не охоплюють усіх завдань, що виникають при спробі одночасно охопити такі складні явища.

Низка питань, а саме: визначення коефіцієнтів переносу при накладенні електромагнітних полів, роль потоку вологи в загальному потоці переносу маси, швидкість релаксації потенційних полів у вологих матеріалах, аналітичний розв'язок нелінійних систем рівнянь тепло- і масообміну та ін. вимагають подальшого дослідження.

Мета статті. Головною метою цієї роботи є проведення дослідження й аналіз методів математичного моделювання тепломасообмінних процесів, що супроводжують сушіння й зберігання культивованих грибів, заснованих на дослідженні явищ переносу з метою раціоналізації енергетичної ефективності й оптимального управління технологічними параметрами цих процесів.

Завдання дослідження, необхідні для досягнення поставленої мети полягають в аналізі сучасного стану практики сушіння грибної продукції; оцінюванні методів математичного моделювання тепломасопереносу у щільному шарі; розв'язок завдання розподілу

температурних полів у шарі продукту при його зберіганні методами математичного моделювання.

Виклад основного матеріалу. Основою теорії сушіння є закономірності переносу тепла й вологи у вологих матеріалах за наявності фазових перетворень при взаємодії їх з нагрітими газами, гарячими поверхнями, а також у процесах накладення електромагнітних та іншої природи полів.

При сушінні вологих матеріалів різними методами мають місце нерозривно пов'язані, взаємообумовлені явища тепло- і масопереносу, які охоплюють як внутрішню частину вологого тіла, так і середовище, що омиває матеріал.

Сушіння являє собою складний технологічний тепло- і масообмінний процес, спрямований не тільки на збереження низки властивостей матеріалу, але (у багатьох випадках) і на їхнє поліпшення [1; 7]. Процес сушіння вологого матеріалу, найчастіше пов'язаний з витратою теплоти на фазове перетворення води і є найбільш енергоємним, трудомістким і вимагає більших витрат часу. У більшості випадків інтенсивність сушіння визначається швидкістю переміщення вологи з глибинних шарів матеріалу до поверхневих.

Дослідження показали, що цей процес, обумовлений структурою матеріалу, формами й енергією та іншими факторами ще важко керуються та недостатньо вивчений [3; 5; 7]. Тому при аналізі методів сушіння культивованих грибів досить важливим завданням є запропоновані даними методами засоби впливу на переміщення вологи усередині тіла ооміцетів.

Теорія незворотних процесів заснована на двох принципах: лінійності й взаємності.

Згідно з принципом лінійності потік P і сила F пов'язані між собою лінійною залежністю:

$$\begin{aligned} P_1 &= L_{11} \cdot F_1 + L_{12} \cdot F_2 + L_{13} \cdot F_3, \\ P_2 &= L_{21} \cdot F_1 + L_{22} \cdot F_2 + L_{23} \cdot F_3, \\ P_3 &= L_{31} \cdot F_1 + L_{32} \cdot F_2 + L_{33} \cdot F_3. \end{aligned} \quad (1)$$

Ця система лінійних рівнянь записана для процесу поширення потоків уздовж трьох напрямків – X , Y і Z . Тут кожен із напрямків отримує вплив з боку двох інших. Принцип взаємності полягає у рівності перехресних кінетичних коефіцієнтів.

Ці рівності свідчать про наявність симетрії у взаємному впливі потоків. Співвідношення взаємності виражають принцип мікроскопічного обертання. Ці співвідношення, як показав С. де Гроот [2], з успіхом можуть бути застосовані й до нестационарних явищ переносу невисокої інтенсивності.

Однак у випадку сильно інтенсивних нестационарних процесів принцип лінійності порушується. При цьому залежність між потоком P і термодинамічною силою F має нелінійний характер. Кількісна сторона взаємного впливу різних потоків може бути встановлена через диференціювання і тоді одержимо:

$$\begin{aligned} \left(\frac{\partial P_1}{\partial F_2} \right)_{X_1} &= \left(\frac{\partial P_2}{\partial F_1} \right)_{X_2}, \\ \left(\frac{\partial P_1}{\partial F_3} \right)_{X_1} &= \left(\frac{\partial P_3}{\partial F_1} \right)_{X_3}, \\ \left(\frac{\partial P_2}{\partial F_3} \right)_{X_2} &= \left(\frac{\partial P_3}{\partial F_2} \right)_{X_3}. \end{aligned} \quad (2)$$

Аналіз представлених рівностей достатньо провести на одному з них.

Виходячи з першої рівності, видно, що збільшення потоку тепла, віднесеного до збільшення кінетичної сили, що обумовлює дифузю F_2 , дорівнює збільшенню потоку

речовини, віднесеного до збільшення сили F_1 , що обумовлює тепло- і масоперенос в одному із трьох напрямків. Теплоперенос за іншими двома напрямками знаходить пояснення з інших двох рівностей.

Термодинамічні рушійні сили відповідного переносу в термодинаміці незворотних процесів визначаються зі співвідношення:

$$T \frac{\partial S_v}{\partial t} = P \cdot F, \quad (3)$$

де T – абсолютна температура, К;

S_v – ентропія, Дж.

Згідно з основними положеннями термодинаміки незворотних процесів, закон внутрішнього масопереносу стосовно сушіння вологих матеріалів [6] може бути записаний так:

$$P_m = -D_m \cdot \rho_0 \cdot (\nabla u - \delta \cdot \nabla T), \quad (4)$$

де D_m – коефіцієнт дифузії, $\text{м}^2/\text{с}$;

ρ_0 – щільність повітря при відповідній температурі, $\text{кг}/\text{м}^3$;

δ – термоградієнтний коефіцієнт, К^{-1} ;

∇u – градієнт вологості, $\%/ \text{м}$;

∇T – градієнт температури, $\text{К}/\text{м}$.

Із цієї формули видно, що температурний градієнт перешкоджає переміщенню вологи до поверхні тіла. Таким чином, виражений масоперенос характерний для конвективного методу підведення тепла, що найчастіше використовується у процесі сушіння культивованих грибів.

Дослідження [8] показали, що при застосуванні високоінтенсивних методів підведення тепла, як, наприклад, високочастотне нагрівання, значну роль відіграє градієнт тиску P . Висока швидкість підведення тепла при високочастотному нагріванні вологих матеріалів, як показали дослідження [6], викликає інтенсивне паротворення в продукті. Випаровування вологи відбувається у повному обсязі тіла, причому, у центрі тіла більше, ніж на поверхні, тому що температура центральних шарів вище температури поверхневих шарів [8]. Внаслідок цього виникає градієнт загального тиску, який є основною рушійною силою переносу пари усередині тіла.

Крім того, існує припущення, що в змінному електричному полі має місце також перенос вологи під дією електродифузії ($D_m^e \cdot \rho_0 \cdot \bar{E}$). Таким чином, $P_m = -D_m \cdot \rho_0 \cdot (\nabla u - \delta \cdot \nabla T) - K \cdot \nabla P - D_m^e \cdot \rho_0 \cdot \bar{E}$.

Ступінь впливу кожного із градієнтів, зазначених у рівнянні, визначається способом енергопідводу, його інтенсивністю, а також внутрішньою структурою матеріалу і його термічним станом.

Нині проведені глибокі дослідження вологісних і температурних полів при конвективному, кондуктивному та інфрачервоному засобах енергопідводу з метою виявлення можливостей для інтенсифікації процесу внутрішнього масопереносу за рахунок градієнтів ∇u і ∇T [3; 7].

При інтенсивному конвективному нагріванні в матеріалі також виникає надлишковий тиск, який, релаксуючись як до поверхні, так і до центру, створює негативний градієнт. Таким чином, у процесах конвективного, радіаційного й контактного сушіння єдиним позитивним градієнтом є градієнт вологовмісту ∇u . При малоінтенсивному високочастотному нагріванні вологих матеріалів градієнти ∇u , ∇T і ∇P сприяють переносу маси до поверхневих шарів матеріалу, що відрізняє цей вид нагрівання від інших.

При інтенсивному підведенні тепла вплив усіх градієнтів на масоперенос стає мізерно малим у порівнянні з масопереносом, обумовленим градієнтом тиску ∇P . У цьому ви-

падку рівняння переносу вологи в матеріалі має вигляд: $P_m = -K_p \cdot \nabla P$. На тепловий потік діють ці ж сили.

Перенос вологи у вологих матеріалах при їхньому сушінні залежить від фізичних і колоїдно-фізичних властивостей матеріалу й форм зв'язку вологи з кісткою тіла, від пористої структури тіла, а також умов сполучення матеріалу із зовнішнім середовищем. При цьому у вологому матеріалі перенос вологи може відбуватися у вигляді рідини й пари молярно-молекулярним шляхом [3; 7]. Поглинання й пересування вологи у вологих матеріалах значною мірою залежить від наявності в них капілярів різних розмірів. У процесі сорбції вологи з повітря при нормальному тиску заповнюються вологою тільки мікрокапіляри ($r < 10 \div 5$ мм).

Макрокапіляри ($r > 10 \div 5$ мм) здатні заповнюватися вологою тільки при безпосередньому зіткненні дисперсного тіла з рідиною й віддають вологу в атмосферу, насичену водяними парами. За наявності градієнта температури у вологому тілі спостерігається рух рідини у напрямку потоку тепла. Потенціалом плівкового переносу є градієнт розклинюючого тиску. Великий вплив на процес вологовіддачі вологих матеріалів при їхньому сушінні має циркуляція вологого повітря в макропорах. Останнє спостерігається за наявності градієнта температури.

При цьому відбувається термодифузійний розподіл вологого повітря (більш легкої водяної пари $\mu = 18$ і повітря $\mu = 28$ (μ – молекулярна маса)), що призводить до збагачення водяною парою нагрітих кінців капілярів і припливу більш сухого зовнішнього повітря до менш нагрітих кінців капілярів.

На основі законів збереження енергії й маси була отримана система диференціальних рівнянь переносу тепла й маси у вологих матеріалах за наявності фазових перетворень із урахуванням конвективного переносу тепла потоком пари й рідини в матеріалі при постійному тиску, яка має такий вигляд:

$$\begin{aligned} c \cdot \rho_0 \frac{\partial t}{\partial \tau} &= -\text{div} P_q + \varepsilon_{\text{фаз}} \cdot r \cdot \rho_0 \frac{\partial u}{\partial \tau} \\ \rho_0 \frac{\partial u}{\partial \tau} &= -\text{div} P_m, \end{aligned} \quad (5)$$

де $\varepsilon_{\text{фаз}}$ – критерій фазового перетворення.

При сушінні струмами високої частоти (СВЧ) вологих матеріалів за рахунок накладення електромагнітного поля виникають внутрішні джерела тепла.

При цьому система рівнянь переносу тепла набуває вигляду [7]:

$$\begin{aligned} c \cdot \rho_0 \frac{\partial t}{\partial \tau} &= -\text{div} P_q + \varepsilon_{\text{фаз}} \cdot r \cdot \rho_0 \frac{\partial u}{\partial \tau} + P_v \\ \rho_0 \frac{\partial u}{\partial \tau} &= -\text{div} P_m, \end{aligned} \quad (6)$$

де P_v – потужність джерела тепла в одиниці об'єму матеріалу, Вт/м³, яке визначається таким чином:

$$P_v = 0,555 \cdot f \cdot \varepsilon' \cdot \text{tg} \delta \cdot E^2 \cdot 10^{-6},$$

де f – частота, Гц;

ε' – відносна діелектрична проникність;

$\text{tg} \delta$ – тангенс кута діелектричних втрат;

E – напруженість електромагнітного поля, В/м.

Як видно, потужність джерела тепла в одиниці об'єму матеріалу прямо пропорційна відносній діелектричній проникності ε' , тангенсу кута діелектричних втрат $\text{tg} \delta$, частоті поля f і квадрату напруженості електричного поля E . Коефіцієнти переносу залежать як

від внутрішніх, так і від зовнішніх факторів системи. Тому розв'язок таких рівнянь роблять із припущенням, що коефіцієнти переносу постійні.

Теплофізичні коефіцієнти матеріалів визначаються експериментальним шляхом для кожного матеріалу окремо або для групи матеріалів [3]. Система диференціальних рівнянь представлена без обліку останнього члена рівняння:

$$\begin{aligned} c \cdot \rho_0 \frac{\partial t}{\partial \tau} &= -\operatorname{div} P_q + \varepsilon_{\text{фаз}} \cdot r \cdot \rho_0 \frac{\partial u}{\partial \tau} + P_v \\ \rho_0 \frac{\partial u}{\partial \tau} &= -\operatorname{div} P_m, \end{aligned} \quad (7)$$

Цей член може бути до деякої міри врахований у загальному потоці, якщо визначити коефіцієнти тепло- і масопереносу при накладенні електричних полів [4].

Зневажа четвертим членом у системі рівнянь

$$\begin{aligned} c \cdot \rho_0 \frac{\partial t}{\partial \tau} &= -\operatorname{div} P_q + \varepsilon_{\text{фаз}} \cdot r \cdot \rho_0 \frac{\partial u}{\partial \tau} + P_v \\ \rho_0 \frac{\partial u}{\partial \tau} &= -\operatorname{div} P_m, \end{aligned} \quad (8)$$

що враховує перенос маси термодинамічною силою E або використання в цій системі рівнянь коефіцієнтів тепло- і масопереносу, визначених без накладення електрополів високої частоти, призводить до занижених значень потенціалів переносу.

Висновки і пропозиції. Таким чином, система диференціальних рівнянь переносу разом з початковими й граничними умовами відображає в аналітичній формі основні риси досліджуваного процесу сушіння культивованих грибів, тобто є його математичною моделлю. Розв'язок моделі дозволяє одержати повну картину розподілу потенціалів переносу в тілі або системі тіл, простежити зміну полів потенціалів у часі й на цій основі дати детальний аналіз кінетики й динаміки процесу сушіння культивованих грибів, причому наближені методи напівемпіричного характеру не можуть замінити аналітичних методів дослідження.

Список використаних джерел

1. Гинзбург А. С. Технология сушки пищевых продуктов / А. С. Гинзбург. – М. : Пищевая промышленность, 1976. – 248 с.
2. Де Гроот. Неравновесная термодинамика / Де Гроот, П. Мазур. – М. : Мир, 2004. – 456 с.
3. Дущенко В. П. Влияние различных форм связи влаги, пористой структуры и температуры на коэффициент внутреннего переноса типичных дисперсных материалов / В. П. Дущенко, Х. Б. Байджанов, В. П. Василенко. – К. : Наукова думка, 1969. – 324 с.
4. Жмакин Н. П. Тепло- и массообмен при высокочастотном нагреве влажных тел / Н. П. Жмакин // Проблемы теплообмена : сб. – Минск, 1960. – 188 с.
5. Исследование переносы массы в капиллярно-пористом и капиллярно-пористоколлоидном материалах при наложении полей высокой частоты / О. А. Кремнев, В. Р. Боровский, В. Т. Мустяца, В. А. Шелиманов, Л. М. Минаевский // Тепло- и массообмен : сб. – 3-е издание. – К. : Наукова думка, 1998. – 210 с.
6. Лыков А. В. Применение метода термодинамики необратимых процессов к исследованию тепло- и массообмена / А. В. Лыков – М. : Энергия, 1985.
7. Лыков А. В. Теория сушки / А. В. Лыков. – 4-е издание. – М. : Энергия, 2008. – 470 с.
8. Рогов И. А. Сверхвысокочастотный нагрев пищевых продуктов / И. А. Рогов, С. В. Некрутман. – М. : Агропромиздат, 1986. – 351 с.