

ОДЕСЬКА ДЕРЖАВНА АКАДЕМІЯ ХАРЧОВИХ
ТЕХНОЛОГІЙ

ШИШКО ЛЮДМИЛА СТАНІСЛАВІВНА

УДК 664.8.047

**МОДЕЛЮВАННЯ ТЕПЛОМАСОПЕРЕНОСУ
В ПРОЦЕСІ КОНВЕКТИВНОГО СУШІННЯ
ХАРЧОВОЇ СИРОВИНИ**

Спеціальність 05.18.12 – процеси та обладнання харчових,
мікробіологічних та фармацевтичних
виробництв

А в т о р е ф е р а т

дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Харківській державній академії технології та організації харчування Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник: доктор технічних наук, професор
ПАХОМОВ Павло Леонідович,
Харківська державна академія технології та організації харчування, професор кафедри холодильної та торговельної техніки

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
БУРДО Олег Григорович,
Одеська державна академія харчових технологій, зав. кафедрою процесів та апаратів
кандидат технічних наук, доцент
ПОГОЖИХ Микола Іванович,
Харківська державна академія технології та організації харчування, доцент кафедри енергетики та фізики

Провідна установа: Одеська державна академія холоду
Міністерства освіти і науки України,
кафедра теплофізики, м. Одеса

Захист відбудеться “ 16 ” листопада 2001 р. о 10-30 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 41.088.01 Одеської державної академії харчових технологій за адресою: 65039, м. Одеса, вул. Канатна, 122.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Одеської державної академії харчових технологій за адресою: 65039, м. Одеса, вул. Канатна, 112.

Автореферат розісланий “ 12 ” жовтня 2001 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради

Моргун В.О.

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. В харчовій промисловості важливе значення має процес сушіння, тобто зневоднення вологої сировини шляхом випаровування. Обґрунтування і впровадження нових, досконаліших методів сушіння, що дозволяють отримувати високоякісний висушений продукт і інтенсифікувати процес сушіння, мають велике народногосподарське значення для України.

Можливості традиційного емпіричного підходу до оптимізації режиму теплової обробки і параметрів відповідного сушильного обладнання є обмеженими через необхідність в дорогих експериментальних стендах і установках, а також неминучих великих витрат електроенергії, конструкційних матеріалів, робочого часу і харчових ресурсів. Тому вдосконалення технології сушіння має базуватися на адекватному теоретичному розгляді та побудуванні на його основі математичних моделей процесів, що відбуваються в харчовій сировині при теплових впливах, з метою проведення інженерних розрахунків раціональних режимів і подальшого проектування технологічного обладнання для їх реалізації.

На цей час не створено надійних теоретичних передумов розрахунку параметрів технологічного процесу і немає опорних даних для відповідного сушильного агрегату на основі достатньо повних і точних знань закономірностей складного комплексу взаємопов'язаних процесів тепломасопереносу в харчовій сировині під час сушіння. Для одержання цих знань необхідні системні теоретичні дослідження з використанням сучасних методів математичної фізики і ефективної обчислювальної техніки.

Викладені міркування визначили вибір теми цієї дисертаційної роботи.

Дана робота є продовженням циклу робіт, виконаних в Харківській державній академії технології та організації харчування (ХДАТОХ), де ведуться роботи з проектування нового технологічного обладнання для сушіння харчової сировини змішаним теплопідводом (ЗТП-сушіння), здійснюються експерименти по сушінню сировини, вивчаються структурно-механічні та фізичні властивості харчової сировини, розглядається тепло- і масоперенос при тепловому впливі на сировину.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Обраний напрямок досліджень був пов'язаний з виконанням тематичних планів ХДАТОХ (зокрема, з темою 2-98-01Б "Фізико-хімічні і технологічні проблеми стану води в харчових продуктах"), а також з роботами в межах творчої співдружності з іншими науковими установами і виробничими підприємствами України.

Мета і задачі дослідження. Метою дослідження є наукове обґрунтування

математичної моделі тепломасопереносу в процесі сушіння харчової сировини, що дозволяє встановити раціональні значення параметрів вихідної сировини і режимів роботи сушильного обладнання.

Для досягнення цієї мети були поставлені та розв'язані такі задачі:

- проаналізувати особливості сушіння харчової сировини, проблеми сушильної техніки, рівень знань про тепломасоперенос у сировині в процесі конвективного сушіння, сучасні тенденції модельних уявлень процесу сушіння;

- розробити узагальнену математичну модель тепломасопереносу при сушінні харчової сировини у вигляді початково–крайової задачі для системи диференціальних рівнянь в частинних похідних параболічного типу; дослідити побудовану математичну модель методом малого параметра та застосувати метод малого параметра для рішення системи диференціальних рівнянь тепломасопереносу; побудувати алгоритм розрахунку та графічні залежності;

- уточнити тривалість прогріву харчової сировини з урахуванням неупорядкованої стадії нагрівання;

- для першого та другого періодів сушіння харчової сировини виділити основні процеси сушіння сировини, що підлягають кількісному опису і здійснити кількісну оцінку основних параметрів процесу сушіння харчової сировини;

- побудувати спрощену математичну модель для визначення тепловологих параметрів сировини при обдуванні її потоком нагрітого повітря, побудувати алгоритм розрахунку та графічні залежності;

- провести експериментальне дослідження сушіння смородини та зрівняти дослідні данні з розрахунком за розробленою математичною моделлю; провести виробничі іспити приведених теоретичних досліджень і надати рекомендації до їх практичного впровадження у харчове виробництво.

Об'єктом дослідження є процес сушіння харчової сировини та його оптимізація.

Предметом дослідження є розробка математичної моделі тепломасопереносу при сушінні харчової сировини та отримання аналітичних виразів для основних параметрів сушіння харчової сировини.

Методи дослідження. В основу роботи покладено метод математичної індукції і евристики. Теоретичні дослідження проводилися на базі використання класичних законів тепломасопереносу. Математична обробка результатів експерименту, рішення отриманих теоретичних виразів здійснювалися з використанням ЕОМ.

Наукова новизна одержаних результатів полягає в тому, що: проведено дослідження математичних моделей тепломасопереносу для двох періодів сушіння харчової

сировини і виділено основні процеси сушіння, що підлягають кількісному опису; проведено уточнення тривалості прогріву харчової сировини з урахуванням, крім стадії регулярного режиму, неупорядкованої стадії нагрівання; здійснено детальний аналіз системи рівнянь тепломасопереносу при сушінні вологих харчових продуктів, визначено співвідношення між їх складовими і вперше застосовано асимптотичний метод малого параметра для числового розв'язання цієї системи; отримано аналітичні вирази для основних параметрів сушіння харчової сировини: температури, вологовмісту, тиску і побудовано графічні залежності цих параметрів від координати й часу.

Практичне значення одержаних результатів полягає в розв'язанні науково–практичної проблеми отримання опорних даних для вибору раціональних значень параметрів вихідної сировини і режиму сушіння з використанням ЕОМ і розробці відповідного програмного забезпечення.

Реалізація результатів роботи. Результати роботи впроваджені на Херсонській макаронній фабриці при оптимізації умов сушіння і режимів нагріву короткорізаних макаронних виробів, що дало змогу одержати продукцію високої якості та економію електроенергії. Рекомендовано використання отриманих математичних виразів на виробництвах харчової промисловості для встановлення раціональних режимів сушіння різних видів харчової сировини.

Особистий внесок здобувача полягає в розробці методики дослідження, проведенні теоретичних досліджень процесів тепломасопереносу при сушінні харчової сировини, графічній обробці результатів досліджень і розробці програмного забезпечення для проведення розрахунків параметрів процесу сушіння харчової сировини. У матеріалах, опублікованих в співавторстві і використуваних у дисертації, усі теоретичні розробки належать дисертанту.

Апробація результатів дисертації. Матеріали дисертації доповідалися і обговорювалися на науково-практичних конференціях професорсько-викладацького складу Харківської державної академії технології та організації харчування (Харків, 1996, 1997 рр.), міжнародній науковій конференції "Прогресивні ресурсозберігаючі технології та їх економічна обґрунтованість у підприємствах харчування. Економічні проблеми торгівлі (Харків, 1998 р.), міжнародній конференції з математичного моделювання (Херсонська область, 1998 р.), а також на науково–технічних і науково–методичних конференціях Харківського державного технічного університету будівництва і архітектури (Харків, 1996–1999 рр.).

Публікації. За матеріалами дисертації опубліковано 7 наукових праць, в тому числі: 1 стаття в науковому журналі, 5 статей – в збірниках наукових праць і 1 тези доповіді.

Структура та обсяг дисертації. Дисертаційна робота складається з вступу, 4 розділів, висновків, списку використаних джерел і додатків. Дисертація викладена на 163 сторінках тексту, містить 3 таблиці (2 стор.) та 21 рисунок (20 стор.), а також 3 додатки (8 стор.). Список використаних джерел містить 121 найменування (9 стор.)

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовано актуальність теми дисертаційної роботи, сформульовано мету й задачі досліджень, об'єкт, предмет та методи дослідження, викладено наукову новизну і практичне значення одержаних результатів, наведено відомості про їх практичне впровадження.

У першому розділі “Аналіз сучасного рівня теорії і техніки сушіння харчової сировини” зроблено аналітичний огляд особливостей сушіння харчової сировини, проблеми сушильної техніки, розглянуто загальну картину тепломасопереносу при сушінні, тенденції розвитку модельних представлень процесу сушіння.

До особливостей сушіння харчової сировини відносяться значення температури сировини, її початкової вологості, температури сушильного агента, швидкість руху сушильного агента.

Огляд існуючих типів технологічних апаратів сушіння, передусім промислового призначення, привів до висновку, що для визначення оптимальних режимів проведення процесу і раціональних технічних параметрів відповідного обладнання необхідна надійна теоретична база – кількісний опис взаємопов'язаних процесів тепломасопереносу в продуктах при визначених граничних умовах на поверхні продукту. Для отримання такого опису, в свою чергу, є необхідними системні теоретичні дослідження за указаним напрямком.

Обґрунтовано принципи побудування математичної моделі для першого та другого періодів сушіння. Для першого періоду на стадії, коли втрата вологи продуктом не впливає суттєво на динаміку прогріву сировини, залежність усередненої температури продукту від часу (t) можна описати рішенням крайової задачі нестационарної теплопровідності при граничній умові III роду.

Точний опис динаміки тепломасопереносу в продукті у 2-му періоді сушіння є принципово можливим на основі розв'язання відомої повної системи рівнянь тепломасопереносу в капілярно-пористих тілах О.В. Ликова.

Для плоскої (одновимірної) геометрії тепломасопереносу розв'язання цієї системи було отримано О.В. Ликовим і Ю.О. Михайловим в аналітичній формі; але відповідні математичні вирази є дуже складними і не мають достатньої “гнучкості”, тобто не дають

можливості аналізувати зміну полів температури $t(x, \tau)$, вологовмісту $u(x, \tau)$ і надмірного тиску $p(x, \tau)$ під впливом технологічних факторів у реальних виробничих умовах. Тому для досягнення мети даної дисертаційної роботи було застосовано спрощення згаданої системи рівнянь з урахуванням особливостей конкретного методу сушіння і виділення декількох параметрів, значення яких можна оцінити теоретичними засобами.

Спрощена система рівнянь тепломасопереносу, подібно за формою до вихідної системи О.В. Ликова, пропонується нами в такому вигляді:

$$\frac{d\bar{\vartheta}}{d\tau} + \frac{2\alpha S}{C} \bar{\vartheta} = - \frac{\sigma r m_c}{C} \frac{d\bar{u}}{d\tau}, \quad (1)$$

$$\frac{d\bar{u}}{d\tau} = - K(\bar{u} - u_p), \quad (2)$$

$$\frac{d\bar{p}}{d\tau} + \chi \bar{p} = - \frac{\sigma}{c_g} \frac{d\bar{u}}{d\tau}, \quad (3)$$

де α – коефіцієнт тепловіддачі від сушильного агента до продукту, $B_T / (m^2 \cdot K)$; S – площа стінки контейнера для сушіння, m^2 ; σ – коефіцієнт (критерій) фазового перетворення: рідка волога – пар; r – питома теплота випаровування води, $Дж / кг$; m_c – маса сухих речовин в продукті, $кг$; величина K (c^{-1}) – коефіцієнт сушіння і відповідає відомому з літератури феноменологічному опису динаміки сушіння в період спадної швидкості; χ – коефіцієнт, визначається за формулою

$\chi = a_p \frac{S_o}{S} \frac{1}{\delta^2}$, S_o – площа, зайнята отворами для проходження пару на стінці

контейнера, m^2 ; δ – половина товщини шару продукту ("пластини"), m ; a –

коефіцієнт температуропровідності продукту, m^2 / c ; C – питома теплоємність

продукту, $Дж / кг \cdot K$, (зазначимо, що $\bar{\vartheta} = t_c - \bar{t}$ і замість C введено усереднену

величину \bar{C} для всього 2-го періоду сушіння, t_c – температура сушильного агента, $^{\circ}\text{C}$; \bar{t} – середня температура продукту $^{\circ}\text{C}$,).

Головною відзнакою системи (1) – (2) є те, що внаслідок введення усереднених значень температури, вологовмісту і тиску ($\bar{t}, \bar{u}, \bar{p}$, відповідно) отримано систему звичайних диференціальних рівнянь замість рівнянь у частинних похідних; це значно спрощує розв'язання системи і отримання залежностей $\bar{t}, \bar{u}, \bar{p}$ від часу τ , які становлять більший практичний інтерес, ніж нестационарні поля $t(x, \tau), u(x, \tau)$ і $p(x, \tau)$. Початковими умовами для системи (1) – (2) є параметри критичної точки – початку 2-го періоду сушіння, які позначимо індексом "k":

$$\bar{t}(\tau = 0) = t_k, \quad \bar{u}(\tau = 0) = u_k, \quad \bar{p}(\tau = 0) = p_k (\approx 0). \quad (4)$$

Розв'язання вказаної системи рівнянь дається такими формулами:

$$\bar{t} = t_c - \left[(\vartheta_k - \frac{M}{L-K})e^{-L\tau} + \frac{M}{L-K}e^{-K\tau} \right], \quad (\vartheta_k = t_c - \bar{t}_k) \quad (5)$$

$$\bar{u} = u_p + (u_k - u_p)e^{-K\tau}, \quad (6)$$

$$\bar{p} = (p_k - \frac{N}{\chi - K})e^{-\chi\tau} + \frac{N}{\chi - K}e^{-K\tau} \approx \frac{N}{\chi - K}(e^{-K\tau} - e^{-\chi\tau}), \quad (7)$$

де для скорочення запису введено такі позначення:

$$\frac{\sigma r m_c K (u_k - u_p)}{\bar{C}} \equiv M, \quad \frac{2\alpha}{\bar{C}} \equiv L, \quad \frac{\sigma K (u_k - u_p)}{c_g} \equiv N. \quad (8)$$

Позитивною ознакою цих формул є те, що до них входять лише такі параметри тепломасопереносу, які мають чіткий фізичний зміст і порівняно просто визначаються експериментальним шляхом.

У другому розділі “Математичні моделі тепломасопереносу в процесі сушіння та методи їх дослідження” побудовано математичну модель, що враховує конвективний

теплообмін, оскільки фактор конвективного теплообміну є переважним у процесах і конструюванні апаратів сушіння харчової сировини. Найбільш цікавим, з погляду динаміки процесу сушіння, є другий період сушіння, вхідні дані для якого (початкові і граничні значення) отримані за результатами першого періоду сушіння, на підставі цього і побудована математична модель другого періоду сушіння, при заданих граничних умовах другого роду .

Далі побудована математична модель досліджується асимптотичним методом малого параметра, де на кожному етапі наближень одержуємо задачі, розв'язувані автономно методом розділення змінних, що дає змогу отримати наближене рішення в аналітичній формі.

Застосований метод малого параметра і проведені на його основі чисельні розрахунки за допомогою ЕОМ дозволяють установити якісний характер взаємодії параметрів $u(x, \tau)$ (вологівмісту), $p(x, \tau)$ (тиску), $t(x, \tau)$ (температури) у процесі сушіння.

До однієї з основних моделей тепломасопереносу при сушінні відноситься модель процесу нагрівання харчової сировини, тому далі нами проаналізовано процес нагрівання харчової сировини, визначено час прогріву сировини з урахуванням неупорядкованої стадії нагрівання та в регулярному режимі нагрівання, тобто проведено уточнення часу прогріву харчового продукту .

Далі в розділі розглядається спрощена модель кінетики сушіння – задача дифузії. Для рішення цієї задачі пропонується метод R – функцій.

Закінчується розділ розглядом можливості пристосування найновіших методів розв'язання задач нелінійних теплових полів до розгляду проблем тепломасопереносу при сушінні харчових продуктів. Ці методи дозволяють проводити числові експерименти з використанням ЕОМ, і їх застосування в технологічній практиці дає значну економію матеріальних ресурсів і робочого часу. Для багатьох задач, що розв'язуються числовими методами з опорою на ЕОМ, вже створені стандартні програмні забезпечення. В цьому розділі наведено та проаналізовано числові методи розв'язання теплових задач на конкретних прикладах.

У третьому розділі "Розрахунково-експериментальне моделювання процесу сушіння харчової сировини" зроблено кількісні оцінки основних параметрів тепломасопереносу для першого і другого періодів сушіння харчової сировини на основі формул, отриманих у розд. 1. Додатково були обчислені значення деяких інших критеріїв тепломасопереносу, які входять в формули, отримані О.В. Ликовим і Ю.О. Михайловим на базі повної системи рівнянь тепломасопереносу (таблиця 1).

Таблиця 1.

Значення теплофізичних величин і критеріїв
тепломасопереносу для другого періоду сушіння

Критерії тепломасопереносу	Вихідні параметри	Табличні значення [6]	Отримані величини

Весь комплекс наведених даних утворює надійну опірну базу для інженерних розрахунків при проектуванні та вдосконаленні апарата, що реалізує даний процес сушіння.

Досліджено процес сушіння смородини і проведено порівняння отриманих досвідчених даних з розрахунком за розробленою моделлю для визначення тепловологих параметрів харчової сировини (рис. 3). Криві мають однаковий характер зміни, і незначна розбіжність абсолютних значень обумовлена двома факторами: наближеним характером

моделі, неточністю експериментальних досліджень.

Рис. 3. Експериментальна сушильна установка ХДАТОХ:

- 1 – вентилятор, 2 – сушильна камера, 3 – блок калориферів,
- 4 – функціональна ємність, 5 – електронний потенціометр,
- 6 – електронний самописний потенціометр, 7 – сітка,
- 8 – канал регулювання витрати сушильного агента.

У четвертому розділі “Практична реалізація” описано заходи по впровадженню результатів проведених досліджень в практику харчових виробництв, зокрема на

Рис. 4. Порівняння експериментальної і теоретичної залежностей сушіння моро-

женої смородини після обробки окропом, при $t = 80^{\circ} C$: 1 – експериментальна залежність кінетики сушіння; 2 – теоретична залежність.

Херсонській фабриці по виробництву короткорізаних макаронних виробів (вермішель, локшина тощо), де на сітці конвеєрної сушарки типу КСК – 4Г 90, при товщині шару 15...20 мм, висушуються макаронні вироби .

Для забезпечення високої якості висушеного продукту необхідно обрати оптимальні значення параметрів процесу, передусім тривалості сушіння, а також температури,

швидкості руху і відносної вологості повітря. Тому за формулою (20), за допомогою ЕОМ з використанням пакета програм Mathcad 7.0 (professional) будувалася залежність вологості в середині шару виробів на сітці від тривалості сушіння (рис. 5).

Рис. 5. Залежність вологості в середині макаронних виробів від тривалості сушіння.

З рис. 5 видно, що задана гранична вологість 13%, встановлена для макаронних виробів (з початковою вологістю 30%), досягається за час $\tau = 1800\text{с} = 30\text{хв}$ при температурі повітря 40°C , швидкості його руху $0,9\text{м/с}$ і вологості 55%. За цей час температура в середині виробів досягає 35°C при товщині шару $2 \cdot 10^{-2}\text{м}$.

Проведені технологічні випробування показали, що при вказаних значеннях параметрів процесу сушіння, передусім при його тривалості, яка не перевищує розрахункового значення (1800 с), досягається висока якість готової продукції – без тріщин, з гладкою поверхнею, збереженою формою тощо. Крім того, дотримання теоретичного значення тривалості сушіння у виробничих умовах дало змогу скоротити процес сушіння з одержанням відповідної значної економії електроенергії.

ВИСНОВКИ

1. На основі проведеного аналізу даних науково–технічної літератури з питань сушіння харчової сировини виявлено особливості сушіння харчової сировини в залежності від об'єкта сушіння, пов'язані зі скороченням тривалості сушіння і залежні від рівномірності нагрівання матеріалу та максимальним зниженням вологості в процесі сушіння до визначеної величини. Проведено аналітичний огляд найбільш розповсюджених технологічних апаратів сушіння, виявлені проблеми сушильної техніки. З огляду видно, що через велику розмаїтість принципів дії і конструкцій апаратів сушіння установлення раціональних значень параметрів процесу сушіння можливо лише на основі загальної теорії, що враховує закономірність тепломасопереносу в сировині, яка висушується, при визначених граничних умовах на її поверхні.

2. Розроблена узагальнена математична модель тепломасопереносу при сушінні харчової сировини у вигляді початково–крайової задачі для системи диференціальних рівнянь в частинних похідних параболічного типу. Обґрунтовано і реалізовано асимптотичний метод малого параметра для розв'язання повної системи рівнянь тепломасопереносу в продукті за умов конвективного сушіння. Отримано окреме рішення системи рівнянь тепло– і масопереносу при граничних умовах другого роду методом малого параметра для одомірної задачі (необмежена пластина, кінцевої товщини). Застосований метод малого параметра і проведені на його основі чисельні розрахунки за допомогою ЕОМ дозволяють установити якісний характер взаємодії параметрів: температури $t(x, \tau)$, вологовмісту $u(x, \tau)$ і тиску $p(x, \tau)$ в процесі сушіння харчового продукту.

3. Обґрунтована можливість застосування сучасних ефективних розрахункових методів математичної фізики, орієнтованих на використання стандартизованих пакетів програм для ЕОМ, для розв'язання задач теорії тепломасопереносу при сушінні харчових продуктів. Проаналізовано сучасні чисельні методи рішення теплових задач на конкретних прикладах, що відносяться до теорії тепломасопереносу при сушінні.

4. Отримано формулу для тривалості прогріву сировини з урахуванням так званої "неупорядкованої" стадії нагріву. В літературі з теорії сушіння розглядається, як правило, лише наступна стадія процесу прогріву – стадія регулярного режиму, хоча зневага "неупорядкованої" стадії нагріву приводить до визначеної помилки при обчисленні тривалості прогріву сировини.

5. Проаналізовані умови тепломасопереносу при сушінні. Проведено спрощення

повної системи рівнянь тепломасопереносу для плоскої геометрії задачі при обліку специфічних особливостей сушіння, а також за рахунок переходу до усереднених по об'єму значень температури, вологовмісту і надмірного тиску в продукті. Рішення системи має досить просту математичну форму і може використовуватися при різних інженерних розрахунках у технологічній практиці. Визначено можливі значення основних критеріїв тепломасопереносу на основі порівняння результатів попередніх експериментів і отриманих наближених залежностей основних характеристик процесу сушіння від часу. Отримані значення можуть бути використані як опірні база для інженерних розрахунків при проектуванні та вдосконаленні апарата для промислової реалізації сушіння.

6. Побудовано спрощену математичну модель для визначення тепловологих параметрів сировини при обдуванні його потоком нагрітого повітря. Отримано формулу для побудови графічної залежності $u(x, \tau)$. Проведено порівняння досвідчених даних, отриманих при експериментальному моделюванні процесу сушіння смородини на стенді ХДАТОХ, з розрахунком за отриманою формулою. Установлено, що криві мають однаковий характер зміни, і незначна розбіжність абсолютних значень обумовлено двома факторами: наближеним характером моделі, неточністю експериментальних досліджень. Таким чином, використання отриманих математичних виразів може бути рекомендовано на виробництвах харчової промисловості для встановлення раціональних режимів сушіння різних видів харчової сировини.

7. Проведені виробничі іспити приведених теоретичних досліджень. Розраховано залежності усереднених значень вологості й температури від часу сушіння для макаронних виробів з кінцевою вологістю 13% в конвеєрній сушарці типу КСК-4Г90, встановлено раціональну тривалість процесу сушіння –1800 с. Результати досліджень впроваджені у харчове виробництво, а саме на Херсонській макаронній фабриці, що дало змогу інтенсифікувати виробничий процес і досягти економії електроенергії не погіршуючи якість готової продукції.

Список опублікованих праць за темою дисертації

1. Пахомов П.Л., Шишко Л.С. Решение двумерных дифференциальных уравнений тепломассопереноса при кондуктивной сушке пищевых продуктов // Актуальні науково-методичні проблеми в підготовці спеціалістів вищої кваліфікації для торгівлі і харчування: Зб. наук. праць. Частина 1. – Харків: ХДАТОХ, 1997. –С. 365-368.

2. Пахомов П.Л., Шишко Л.С. Решение краевых задач тепломассопереноса при сушке пищевых продуктов с использованием системы “Поле” // Придні-провський науковий

вісник. Сер. "Машинобудування": – Дніпропетровськ: 1997. № 53 (64). –С. 12-13.

3. Пахомов П.Л., Синекон Н.С., Шишко Л.С. Об одной расчетной модели начально-краевой задачи тепломассопереноса // Прогресивні ресурсозберігаючі технології та їх економічна обґрунтованість у підприємствах харчування. Економічні проблеми торгівлі: Зб. наук. праць. Частина 2. – Харків: ХДАТОХ, 1998. –С. 46-48.

4. Шишко Л.С. Математическое моделирование тепломассопереноса в процессе сушки пищевого продукта // Прогресивні ресурсозберігаючі технології та їх економічна обґрунтованість у підприємствах харчування. Економічні проблеми торгівлі: Зб. наук. праць. Частина 2. – Харків: ХДАТОХ, 1998. –С. 130-134.

5. Шишко Л.С. Метод малого параметра для решения дифференциальных уравнений тепломассопереноса // Сб. науч. трудов Института математики НАН Украины. – К.: 1998. –С. 265-268.

6. Синекон Н.С., Шишко Л.С. Упрощённые модели кинетики сушки (задача диффузии) // Науковий вісник будівництва: Зб. наук. праць. – Харків: ХДТУБА, 1999. С. 164-168.

7. Шишко Л.С. Решение краевых задач теплопроводности при кондуктивной сушке // Тезисы докладов 51 научно-технической конференции преподавателей и студентов / Под ред. Д.Ф. Гончаренко. – Харьков: ХГТУСА, 1996. –С. 87.

АНОТАЦІЯ

Шишко Л.С. Моделювання тепломасопереносу в процесі конвективного сушіння харчової сировини. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.18.12 – процеси та обладнання харчових, мікробіологічних та фармацевтичних виробництв. – Одеська державна академія харчових технологій Міністерства освіти і науки України, Одеса, 2001.

Дисертацію присвячено питанням розрахунку нестационарних полів температури, вологовмісту та надмірного тиску в харчовій сировині під час сушіння на базі розв'язання системи рівнянь тепломасопереносу. В дисертації застосовано метод розв'язання системи рівнянь тепломасопереносу шляхом введення малого параметра і відповідного спрощення заданої системи. Встановлено, що запропонований підхід дає змогу розрахувати залежності основних параметрів процесу сушіння продуктів від часу. Запропоновано методику розрахунку темпу сушіння продуктів у конкретних умовах підведення теплоти до продукту від сушильного агента. Основні результати праці знайшли промислове впровадження при проектуванні вдосконаленої установки для сушіння макаронних виробів.

Ключові слова: сушіння, рівняння тепломасопереносу, розв'язання, числові методи,

темп сушіння, харчова сировина.

АННОТАЦІЯ

Шишко Л.С. Моделирование тепломассопереноса в процессе конвективной сушки пищевого сырья. – Рукопись.

Диссертация на соискание научной степени кандидата технических наук по специальности 05.18.12 – процессы и оборудования пищевых, микробиологических и фармацевтических производств. – Одесская государственная академия пищевых технологий Министерства образования и науки Украины, Одесса, 2001.

Диссертация посвящена вопросам расчета полей температуры, влагосодержания и избыточного давления в пищевом сырье во время сушки на базе решения соответствующих краевых задач теории тепломассопереноса. Проведенный анализ научно-технической литературы по данной проблеме позволил установить особенности сушки пищевых продуктов в зависимости от объекта сушки, связанные с сокращением продолжительности сушки и зависящие от равномерности нагрева материала и максимальным снижением влажности в процессе сушки до определенной величины. Проведен аналитический обзор наиболее распространенных технологических аппаратов сушки, выявлены проблемы сушильной техники. Из обзора видно, что из-за большого разнообразия принципов действий и конструкций аппаратов сушки, установление рациональных значений параметров процесса сушки возможно лишь на основе общей теории, учитывающей закономерность тепломассопереноса в высушиваемом сырье при определенных граничных условиях на его поверхности.

Показано, что при теоретическом рассмотрении процесса сушки целесообразно выделить два периода, различающиеся механизмами тепломассопереноса. Для первого периода зависимость температуры сырья от времени описывается решением соответствующей краевой задачи нестационарной теплопроводности при граничном условии третьего рода. На следующей стадии первого периода эту зависимость можно получить на основе уравнения теплового баланса для всей массы сырья. Изменение со временем влагосодержания сырья в первом периоде сушки описывается эмпирической формулой, в соответствие с которой темп сушки пропорционален движущей силе процесса – разности давления водяного пара вблизи поверхности сырья и в объеме сушильного агента. Динамика тепломассопереноса во втором периоде сушки может быть описана полной системой уравнений тепломассопереноса в пористом сырье; однако решение этой системы непригодно для применения в инженерной практике. Поэтому в данной работе упрощена полная система уравнений тепломассопереноса для плоской геометрии задачи. Решение системы имеет простую математическую форму и может использоваться при различных инженерных расчетах в технологической практике.

Определены возможные значения основных критериев тепломассопереноса на основе сравнения результатов предварительных экспериментов и полученных приближенных зависимостей основных характеристик процесса сушки от времени.

Подробно рассмотрены возможность и целесообразность применения эффективных методов математической физики, ориентированных на использование стандартных пакетов программ для ЭВМ. Проанализированы современные численные методы решения тепловых задач на конкретных примерах, которые относятся к теории тепломассопереноса.

Разработана общая математическая модель тепломассопереноса при сушке пищевого сырья в виде начально-краевой задачи для системы дифференциальных уравнений в частных производных параболического типа. Обоснован и реализован асимптотический метод малого параметра для решения полной системы уравнений тепломассопереноса в продукте при конвективной сушке. Получено отдельное решение системы уравнений при граничных условиях второго рода методом малого параметра для одномерной задачи (неограниченная пластина, конечной толщины). Примененный метод малого параметра и проведенные на его основе численные расчеты с помощью ЭВМ позволяют установить качественный характер взаимодействия параметров: температуры $t(x, \tau)$, влагосодержания $u(x, \tau)$ и давления $p(x, \tau)$ в процессе сушки пищевого продукта.

Получена формула для определения продолжительности прогрева сырья с учетом так называемой "неупорядоченной" стадии нагрева. В литературе по теории сушки рассматривается, как правило, лишь следующая стадия процесса прогрева - стадия регулярного режима.

Построена упрощенная математическая модель для определения тепловлажностных параметров сырья при обдуве его потоком нагретого воздуха. Получена формула для построения графической зависимости $u(x, \tau)$. Проведено сравнение опытных данных, полученных при экспериментальном моделировании процесса сушки смородины, с расчетом по полученной формуле. Установлено, что кривые имеют одинаковый характер изменения.

Проведены производственные испытания приведенных теоретических исследований. Рассчитаны зависимости усредненных значений влажности и температуры от времени для макаронных изделий с конечной влажностью 13% в конвейерной сушилке типа КСК-4Г90, установлена рациональная продолжительность процесса сушки - 1800 с. Результаты исследований внедрены в пищевое производство, а именно на Херсонской макаронной фабрике, что дало возможность интенсифицировать производственный процесс и достигнуть экономии электроэнергии, не ухудшая качество готовой продукции.

Ключевые слова: сушка, уравнения тепломассопереноса, решение, численные методы, темп сушки, пищевое сырье.

SUMMARY

Shishko L.S. Modeling of heat and mass transfer in process by drying of food raw materials.– Manuscript.

Thesis for a candidate's degree by specialty 05.18.12 – processes and devices of food, microbiological and pharmaceutical manufactures.– Odessa State Academy of Food Technology, Ministry of Education of Ukraine, Odessa, 2001.

The dissertation is devoted to the topics of calculating the fields of temperature, water content and surplus pressure in a food raw material by drying on the base of solving the appropriate boundary-value problems of heat and mass transfer theory. In the dissertation a new method of solving the heat and mass transfer equations system is elaborated by introducing the small parameter and subsequent simplifying the mentioned system. There is established that the proposed approach enables to calculate the time dependencies of basic process parameters of drying the products with the well-known thermo-physical properties. The procedure of calculating the rate of drying the products is proposed for concrete conditions of heat supply to the product from a drying agent. The main results of the work have found an industrial utility in the designing of the improved system for drying the macaroni foods.

Key words: drying, equations of heat and mass transfer, solution, numerical methods, rate of drying, food raw materials.

Підп. до друку 01. Формат 60x84 1/16.

Папір друкарський №1. Друк. на різнографі. Ум. друк. арк. 0,9.

Замовл. № Тираж 100 прим.

Одеська державна академія харчових технологій, Одеса – 39, вул.. Канатна, 112.