

ОДЕСЬКА НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ ХАРЧОВИХ ТЕХНОЛОГІЙ

БОШКОВА ОЛЬГА ЛЕОНІДІВНА

УДК 664.692.040.2.086.4

**СУШІННЯ КОРОТКОРІЗАНИХ МАКАРОННИХ ВИРОБІВ ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ
МІКРОХВИЛЬОВОГО ЕЛЕКТРОМАГНІТНОГО ПОЛЯ**

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

Автореферат

дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Одеса - 2008

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Одеській національній академії харчових технологій
Міністерства освіти і науки України

Науковий керівник: доктор технічних наук, професор
Калінін Лев Георгійович, Одеська національна
академія харчових технологій,
кафедра процесів і апаратів, професор кафедри

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Поперечний Анатолій Микитович,
Донецький національний університет економіки
і торгівлі імені Михайла Туган-Барановського,
кафедра обладнання харчових виробництв,
професор кафедри

доктор технічних наук, професор
Дорошенко Олександр Вікторович,
Одеська державна академія холоду,
кафедра технічної термодинаміки, професор кафедри

Захист відбудеться 03.07.2008 р. о 14 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради
Д 41.088.01 при Одеській національній академії харчових технологій, за адресою: вул. Канатна,
112, м. Одеса, 65039.

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

Автореферат розісланий 30.05.2008р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради,
д.т.н., професор

К.Г. Іоргачова

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ.

Актуальність теми. Необхідність пошуку нових енергозберігаючих методів сушіння, а також збільшення обсягів випуску харчової продукції вітчизняного виробництва, зокрема, макаронних виробів, є потребою в створенні нового обладнання для цього виробництва. Найбільш енергоємною ланкою в процесі виробництва макаронних виробів є процес сушіння. До комплексу устаткування для виробництва макаронних виробів входить сушильна камера, у яку надходять сформовані після вакуумного преса вироби. Звичайно сушіння здійснюється за допомогою конвективного методу. Досвід роботи з конвективними сушарками та аналіз даних щодо обсягу виробництва й енергетичних витрат показують, що цей процес необхідно вдосконалювати. Традиційним засобом сушіння властива низка недоліків, головними з яких є великі тривалість та трудомісткість процесу, великі розміри устаткування, енерго- та ресурсомісткість.

Найбільш перспективним представляється сушіння в мікрохвильовому електромагнітному полі, у цьому випадку нагрівання здійснюється безпосередньо в самому матеріалі, без підігріву проміжного агента, і саме сушіння відрізняється високою інтенсивністю – можливі скорочення тривалості процесу в 10...30 разів. Однак докладні дослідження закономірностей процесу сушіння макаронних виробів у мікрохвильовому полі не проводилися, що не дозволяє ефективно використати цей метод. Крім того, розрахунок процесу сушіння в цьому випадку викликає труднощі: не вирішене завдання розрахунку полів температур та вологозмісту у макаронних виробках при сушінні в різні моменти часу, що не дозволяє проводити розрахунки сушарок. Ця проблема може бути вирішена при аналітичному моделюванні процесів, що відбуваються в колоїдному капілярно-пористому тілі під впливом мікрохвильового поля. У зв'язку із цим доцільно розглянути диференціальні рівняння тепловологопереносу при наявності внутрішніх джерел теплоти (мікрохвильове поле) в умовах випару вологи в процесі мікрохвильової обробки. Для цього необхідним є проведення експериментальних робіт з дослідження кінетики сушіння одиничного макаронного виробу та макаронних виробів в умовах, що моделюють процес на виробництві. У процесі досліджень варто вивчити особливості процесу сушіння, характеристики колоїдного капілярно-пористого тіла, механізм нагрівання діелектричного матеріалу при його взаємодії з електромагнітним полем мікрохвильової частоти, розглянути можливі зміни структури матеріалу в процесі сушіння, вивести основні закономірності для швидкості сушіння. Для практичного застосування результатів також необхідне проведення експериментів по визначенню раціонального режиму ведення процесу, при якому одночасно будуть виконуватися вимоги ГОСТ 875-92 "Вироби макаронні. Загальні технічні умови" і забезпечення економічної ефективності пристрою.

Проведений аналіз стану питання переходу на нові технології сушіння дозволяє зробити висновок про актуальність як самого напрямку, так і завдань дійсного дослідження.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.

Дисертаційна робота виконана у рамках держбюджетної тематики кафедри процесів і апаратів та проблемної науково-дослідної лабораторії ОНАХТ ("Розробка стратегії принципів та методології удосконалення енерготехнологій АПК" № 0103U003436).

Мета і завдання досліджень.

Метою роботи є обґрунтування і вибір технологічних режимів сушіння короткорізаних макаронних виробів при використанні мікрохвильового електромагнітного поля (МХ ЕМП), що передбачає необхідність рішення наступних завдань:

- дослідження особливостей сушіння короткорізаних макаронних виробів при використанні МХ поля;
- розробка математичної моделі процесу сушіння одиничного макаронного виробу при МХ нагріванні для розрахунку полів температур і вологозмісту.
- верифікація математичної моделі шляхом зіставлення розрахункових та експериментальних даних. визначення умов застосовності моделі;
- експериментальне дослідження кінетики сушіння різних видів макаронних виробів

як колоїдних капілярно-пористих тіл, узагальнення даних, отримання емпіричних залежностей;

- узагальнення емпіричних даних для короткорізаних макаронних виробів при сушінні в умовах МХ нагрівання в різних режимних умовах;
- отримання технологічних рекомендацій к веденню сушіння макаронних виробів при використанні МХ поля;
- вивчення можливості підвищення коефіцієнт корисної дії (ККД) робочої камери, встановлення залежності ККД мікрохвильової камери від навантаження макаронними виробами;
- визначення режиму МХ сушіння, який доцільно рекомендувати для практичного використання;
- обґрунтування конструктивних особливостей установки для характерних умов сушіння макаронних виробів.

Предмет дослідження – кінетика сушіння макаронних виробів з використанням МХ ЕМП.

Об'єкт дослідження – короткорізані макаронні вироби, різних форм і розмірів.

Методи дослідження – аналітичні й експериментальні методи дослідження впливу МВ ЕМП на інтенсифікацію процесу сушіння макаронних виробів з використанням сучасних апробованих методик.

Наукова новизна отриманих результатів.

- запропонована математична модель процесів тепловологопереносу при сушінні короткорізаних макаронних виробів з товщиною не більше 2 мм у вологому стані. Цільові завдання вирішені в умовах припущень, що температура по товщині виробу не змінюється, що було підтверджено відповідними розрахунками й експериментами. Вхідні в розрахункову модель коефіцієнти визначені експериментальними шляхом і містять у собі в неявному вигляді внутрішній і зовнішній дифузійний опір масопереносу;

- встановлено основні кінетичні залежності процесу сушіння колоїдного капілярно-пористого тіла при наявності внутрішніх джерел теплоти, які визначаються дією мікрохвильового електромагнітного поля;

- розроблено методики дослідження кінетики сушіння макаронних виробів при мікрохвильовому підведенні енергії, специфіка якого виключає можливість використання стандартних засобів виміру температури в умовах роботи генератора мікрохвильової енергії;

- отримано дані експериментального дослідження кінетики сушіння короткорізаних макаронних виробів і отримані основні залежності, що зв'язують вологовміст із часом сушіння, тривалістю процесу, вихідною потужністю магнетрона й масою завантаження;

- отримана залежність зміни вологовмісту від питомої поверхні макаронних виробів, що пропонується враховувати в моделі технологічного процесу сушіння;

- встановлено, що при використанні мікрохвильового нагрівання для сушіння макаронних виробів доцільно використати циклічне нагрівання, при якому чергуються періоди вмикання й вимикання магнетрону;

- отримано залежності вологовмісту й температури від часу сушіння в безрозмірному узагальненому виді;

- отримані параметри процесу сушіння у вигляді комбінації, при яких вироби відповідають прийнятим державним стандартам.

Практичне значення отриманих результатів.

На основі теоретичних і експериментальних досліджень розроблено проект на дослідно - конструкторську роботу „Розробка мікрохвильової установки для сушіння макаронних виробів”

Визначено залежності для вологовмісту і температури в безрозмірному вигляді, які узагальнюють експериментальні дані для макаронних виробів різних видів при різних режимах, відібраних за принципом застосовності до макаронних виробів за результатами експериментів.

Отримані рекомендації по підвищенню коефіцієнта корисної дії камери, що дозволяє мінімізувати енергетичні втрати.

Математична модель сушіння макаронних виробів у мікрохвильовому полі дає можливість розрахунковим шляхом отримувати значення вологовмісту й температури макаронного виробу протягом часу сушіння. Результати у вигляді методик розрахунку мікрохвильових сушарок

макаронних виробів при проектуванні нового мікрохвильового обладнання впроваджені на двох підприємствах м. Одеса: Південна Філія Радіопромислової Електроніки МАІ та ТОВ ООВ „Інжмаш”.

Особистий внесок здобувача. Особистий внесок полягає в розробці методик, створенні лабораторних установок, плануванні й проведенні експериментальних досліджень, математичній обробці й узагальненні отриманих результатів. Здобувачем особисто розроблена і апробована математична модель сушіння макаронних виробів з урахуванням внутрішніх джерел теплоти, отримані аналітичні залежності, що описують зміну середньої температури у матеріалі при сушінні в мікрохвильовому полі, проведена апробація з урахуванням даних експериментів. Здобувачем отримані залежності для вологовмісту й температури матеріалу в безрозмірному виді, що дозволяють встановити зміну за часом умов процесу при мікрохвильовому й циклічних підведенні енергії, проведені теплові й гідравлічні розрахунки й пророблене схемне рішення мікрохвильового пристрою для сушіння макаронних виробів з використанням мікрохвильового підведення енергії.

Апробація роботи. Основні положення дисертації доповідались і обговорювались на: I Міжнародної науково-практичної конференції "Наука и технологии: шаг в будущее - 2006" (Белгород, Росія, 2006); II Міжнародної науково-практичної конференції "Харчові технології - 2006" (Одеса, 2006); Міжнародній науково-практичній конференції школи - семінар "Повышение энергетической эффективности пищевых и химических производств" (Одеса, 2007).

Публікації. По темі дисертаційної роботи опубліковано 7 робіт: з них 4 у фахових виданнях, тези 2 доповідей, в яких представлені основні результати досліджень.

Структура й обсяг роботи Дисертаційна робота складається із вступу, чотирьох розділів, загальних висновків, списку використаних літературних джерел, що включає 168 найменувань і додатків (51 сторінка). Роботу викладено на 132 сторінках, включаючи 47 рисунків (11 сторінок), 17 таблиць (6 сторінок).

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтована актуальність роботи, сформульовані мета та задачі досліджень, визначено наукову новизну й практичну цінність отриманих результатів, особистий здобувача в проведених дослідженнях та публікаціях за темою дисертаційної роботи.

У першому розділі “Сучасний стан проблеми практичного застосування нових технологій та моделювання процесу сушіння колоїдних капілярно-пористих тіл” розглянутий сучасний стан проблеми впровадження нових технологій і дослідження процесу сушіння колоїдних капілярно-пористих тіл, розглянуті особливості мікрохвильової обробки харчових продуктів, досліджений механізм мікрохвильового нагрівання і фактори, що впливають на діелектричні властивості продуктів, представлена інформація про наукові і практичні результати дослідження впливу мікрохвильового електромагнітного поля на діелектричні матеріали. Проаналізовано існуючі моделі, що описують процес перетворення МХ-енергії у внутрішню енергію тіла при сушінні колоїдних капілярно-пористих тіл. Представлений аналіз способів сушіння капілярнопористих тіл й існуючого устаткування. Описано існуючі математичні моделі процесів сушіння. Всі існуючі моделі засновані на рішенні системи диференціальних рівнянь Ликова при численних припущеннях, при цьому жодна з моделей не може бути безпосередньо застосована до сушіння макаронних виробів. Закони переміщення теплоти й вологи в колоїдних капілярно-пористих тілах (вологих матеріалах) повинні враховувати зв'язок вологи з матеріалом, тому що зміна характеру зв'язку вологи змінює фізичні властивості тіла. Знаходження полів вологовмісту й температури пов'язане з рішенням системи диференціальних рівнянь масо- і теплопереносу при відповідних граничних умовах, що відображають спосіб і режим сушіння. Нестационарні поля вологовмісту й температури (динаміка процесу сушіння) визначаються закономірностями волого- і теплопереносу всередині тіла, а також зовнішнім волого- і теплообміном з навколишнім середовищем. Зміни вологовмісту й температури тіла із часом (кінетика процесу сушіння) у першу чергу визначаються закономірностями взаємодії тіла з навколишнім середовищем, тобто зовнішнім тепло- і масообміном.

У другому розділі “ Аналітичне дослідження сушіння макаронних виробів у

мікрохвильовому електромагнітному полі” створена математична модель сушіння макаронних виробів у мікрохвильовому електромагнітному полі. Розглядається процес сушіння одиничного макаронного виробу, який можна представити у вигляді пластини товщиною d . Процес сушіння вологих тіл є типовим нестационарним процесом волого- і теплопереносу, для якого була складена система диференціальних рівнянь стосовно до пластини (одномірне задача) у відсутності градієнта загального тиску:

$$\rho c \frac{d\bar{t}}{d\tau} = \alpha (\bar{t} - t_{жс}) \frac{F}{V} + J_1 - J_2 \quad (1)$$

$$\rho \frac{du}{d\tau} = \frac{J_1}{r} - \frac{c}{r} \frac{d\bar{t}}{d\tau} - \frac{F}{Vr} \alpha (\bar{t} - t_{жс}) \quad (2)$$

де ρ – густина макаронного виробу, $кг/м^3$; c – теплоємність, $Дж/(кг \cdot K)$; α – коефіцієнт тепловіддачі від поверхні виробу до навколишнього середовища, $Вт/(м^2 \cdot K)$; V – об’єм макаронного виробу, $м^3$; $t_{жс}$ – температура навколишнього середовища, $°C$; F – площа поверхні макаронного виробу, $м^2$; r – питома теплота паротворення, $Дж/кг$; J_1 – внутрішнє джерело теплоти, обумовлено дією МХ поля, $Вт/м^3$; J_2 – внутрішнє джерело теплоти, обумовлено випаром води, $Вт/м^3$.

Множник $\alpha (\bar{t} - t_{жс}) \frac{F}{V}$ урахує теплоту, що приділяється від поверхні тіла шляхом природної конвекції, $\frac{J_1}{r}$ – потік вологи, що випарувався за рахунок дії внутрішніх джерел теплоти. Дані вихідні рівняння отримані з урахуванням того, що процес вирівнювання температури в тілі відбувається суттєво інтенсивніше, чим відвід теплоти з поверхні, тобто завдання є зовнішньому, що було доведено розрахунками, наведеними в роботі. Тому математична модель у вигляді диференціальних рівнянь суттєво спрощувалася завдяки умові $\frac{dt}{dx} = 0$.

Рівняння (2) є балансовим для зміни вологовмісту матеріалу при сушінні. Воно може бути записано в другому вигляді:

$$\rho \frac{du}{d\tau} = \frac{- \left[J_1 - \rho c \frac{d\bar{t}}{d\tau} - \frac{F}{V} \alpha (\bar{t} - t_{н.с.}) \right]}{r} \quad (3)$$

У рівнянні (3) у чисельнику представлений тепловий потік $J_{вип}$, який затрачується на випар води, у вигляді різниці теплового потоку J_1 , який генерується в матеріалі під дією мікрохвильового поля, і теплових потоків, які йдуть на нагрівання матеріалу $\rho c \frac{d\bar{t}}{d\tau}$ і охолодження при конвекції $\frac{F}{V} \alpha (\bar{t} - t_{о.с.})$. Значення $\frac{J_{вип}}{r}$ відповідає кількості води, яка випаровується з тіла за одиницю часу. Знак мінус перед рівнянням означає, що враховується зміна вологовмісту в матеріалі, яке падає в процесі сушіння.

При розробці моделі прийнято, що усередині тіла діє джерело теплоти (мікрохвильове поле), що залежить від часу в експонентній формі:

$$J_1 = J_{10} e^{-\gamma_1 t} \quad (4) \quad J_{10} = P_{вих} \cdot \eta_{\kappa} / V \quad (5)$$

де J_{10} – максимальна питома потужність джерела, обумовлена дією генератора мікрохвильової енергії, $Вт/м^3$; γ_1 – коефіцієнт ослаблення електромагнітної енергії в матеріалі за часом, $1/с$. Теплота, що витрачається на випар води, враховується у вигляді негативного джерела внутрішнього джерела J_2 :

$$J_2 = J_{20} e^{-\gamma_2 t} \quad (6) \quad J_{20} = \rho \cdot N \cdot r \quad (7)$$

де J_{20} – максимальна питома потужність джерела, обумовлена теплою випару, $Вт/м^3$;
 γ_2 – коефіцієнт ослаблення швидкості сушіння, $1/с$.

Аналіз експериментальних даних привів до висновку, що інтенсивність втрати вологи міняється за експонентним законом так, що швидкість сушіння в будь-який момент часу можна

представити залежністю $N = N_0 e^{-\gamma_2 t}$ (де N_0 – швидкість на початку процесу сушіння).

Рішення диференціальних рівнянь тепломасопереносу (1,2) стосовно до сушіння макаронних виробів дозволило одержати залежності для розрахунку температури (8) і вологовмісту (9) під час сушіння:

$$\bar{t} = t_{н.с.} + \frac{J_{10}}{\frac{\alpha F}{V} - \gamma_1 \rho c} e^{-\gamma_1 t} - \frac{J_{20}}{\frac{\alpha F}{V} - \gamma_2 \rho c} e^{-\gamma_2 t} + \left(\frac{J_{20}}{\frac{\alpha F}{V} - \gamma_2 \rho c} - \frac{J_{10}}{\frac{\alpha F}{V} - \gamma_1 \rho c} \right) e^{-\frac{\alpha F}{\rho c V} t} \quad (8)$$

$$u = u_0 - \frac{J_{20} \gamma_2 \rho c V - \alpha F}{\rho r \alpha F - \gamma_2 \rho c V} e^{-\gamma_2 t} - \frac{J_{20} \gamma_2 \rho c V - \alpha F}{\rho r \alpha F - \gamma_2 \rho c V} \quad (9)$$

Отримані аналітичні залежності були апробовані на дослідних даних. Результати показують хорошу збіжність результатів для виробів, які наближені до умов, прийнятих при складанні моделі (плоский макаронний виріб з товщиною не вище $\delta \leq 2 \text{ мм}$). Приклад розрахунку і його зіставлення з даними експерименту наведений на рис.1:

Встановлено, що залежності можуть бути використані як елемент і при циклічному режимі сушіння, коли мікрохвильова енергія подається через певні інтервали часу, при цьому в період паузи (вимикання магнетрона) варто також враховувати зміну вологовмісту.

У третьому розділі “Експериментальне дослідження кінетики сушіння макаронних виробів при використанні мікрохвильового нагрівання” наведені результати дослідження кінетики сушіння макаронних виробів при використанні мікрохвильового нагрівання. Приводиться методика проведення експерименту та опис експериментальної мікрохвильової установки.

Експериментальна установка камерного типу включала магнетрон із частотою генерації $2,45 \text{ ГГц}$ і робочу камеру обсягом 20 дм^3 прямокутного перетину з розмірами $306 \times 201 \times 322 \text{ мм}$. Вихідна потужність магнетрона варіювалася в межах $100 \dots 850 \text{ Вт}$. Початковий вологовміст макаронних виробів, які були отримані відразу після вакуумного преса, визначалося ваговим методом і відповідало 43% і 30% .

Для дослідження були виготовлені дві експериментальні ячейки, в які розміщалися макаронні вироби. Перша експериментальна ячейка виготовлений з одного шару радіопрозорї сітки, друга експериментальна ячейка складається із трьох шарів сітки, розташованих на відстані 7 см по висоті одна від іншої, на які розкладалися макаронні вироби. Вагу макаронних виробів при цьому можна було збільшити до 300 г . Експеримент проходив із трикратним повторенням для зниження похибки дослідів.

Проведено дослідження кінетики виходу вологи з капілярно-пористого тіла при різній пористості матеріалу. Криві кінетики виходу вологи показують, що існує ділянка на кривих, яка може бути визначена як період постійної швидкості виходу вологи.

$$m = m_0 \cdot \exp(-k \cdot \tau) \quad (10)$$

де m_0 – початкова маса, $г$; τ – тривалість, $с$; k – темп виходу вологи.

Проведено дослідження впливу режимних параметрів на швидкість сушіння макаронних виробів і якість продукції. Характер кривих показує, що при збільшенні тривалості нагрівання вологовміст швидко знижується, що обумовлено ростом температури матеріалу. Однак

використання однократного МХ нагрівання пов'язане з певними труднощами, тому що всередині матеріалу можуть утворюватися повітряні пухирці. Це пояснюється колоїдними властивостями матеріалу: різке нагрівання призводить до перетворення внутрішньої вологи в пару, що утворює пухирці усередині тіла. Подальше збільшення тривалості однократного МХ нагрівання приводить до зміни кольору виробів. Виявлено, що однократне МХ нагрівання матеріалу повинно становити 15...20 с при питомому тепловому потоці не вище 500 Вт/кг (ККД магнетрону 70 %). При проведенні експериментів змінними параметрами були маса матеріалу, потужність магнетрона, тип макаронних виробів, тривалість періодів мікрохвильового і конвективного сушіння.

Період сушіння з найменшою похибкою описується різними залежностями, що свідчить про зміну структури матеріалу. Так, спочатку колоїдна структура матеріалу наприкінці процесу переходить у капілярно-пористу, що полегшує вихід вологи з нього. При однократному МХ нагріванні для питомої потужності $P_{num} \leq 0,6$ кВт/кг виявлялась ділянка, де температура незначно змінювалась. Цю ділянку можна відзначити як ділянку постійної швидкості сушіння. При $P_{num} > 0,6$ температура матеріалу безперервно збільшується на протязі всього процесу сушіння. Для практичного застосування такі умови неприпустимі, тому при отриманні емпіричних залежностей, які рекомендовані до теплових розрахунків сушарок, опрацьовувались тільки ті дані, які підходять до макаронних виробів. Експериментально доведено, що початковий вологовміст не оказує впливу на швидкість сушіння.

Кінетика сушіння макаронних виробів у раціонально підібраному режимі, коли виконується відповідність ГОСТ і при цьому витрати енергії нижче, ніж при конвективному сушінні, представлена на рис.2. Дана залежність була отримана для наступних умов експерименту: маса завантаження $m = 150$ г; вихідна потужність магнетрона – 800 Вт; тривалість періоду МХ нагрівання – 20 с; тривалість періоду продувки – 1 хв. Таким чином, експериментально доведена можливість інтенсивного сушіння макаронних виробів у мікрохвильовому полі при використанні циклічних режимів.

Аналіз кінетики сушіння дозволив зробити висновок, що в ході сушіння температура матеріалу не повинна перевищувати 60°C, у противному випадку висока інтенсивність мікрохвильового сушіння здатна призводити до такого побічного ефекту, як наростання механічних і температурних напруг у матеріалі, що впливає на його якість. Для рішення даної проблеми було запропоновано чергувати періоди мікрохвильового нагрівання із продувкою холодним повітрям. У такому режимі були отримані позитивні результати. При безперервному МХ нагріванні швидкість сушіння була вище, ніж при нагріванні із проміжною продувкою, що пов'язано зі зниженням температури матеріалу в період його обдування повітрям. Дослідження показали, що при однократному нагріванні у МХ полі одержувані макаронні вироби не відповідали ГОСТ 875-92. і тому було вирішено перейти на інші режими, при яких мікрохвильове нагрівання чергувалося із продувкою повітрям або витримкою макаронних виробів на відкритому повітрі. Було встановлено, що найбільш підходящим є умови, коли період нагрівання був в 4 рази менше періоду продувки. Основним критерієм вибору часу нагрівання повинна бути температура: її значення не повинне перевищувати 60 °С.

Експериментальні дані за інтегральним вологовмістом й температурою матеріалу оброблені у вигляді узагальнених кривих кінетики сушіння й нагрівання – залежностей безрозмірних поточних вологовмістів u/u_0 і температури t/t_1 від безрозмірного комплексу $N\tau / u_0$, що досить повно враховує умови взаємозалежного тепломасопереносу в процесі сушіння. Методика такої обробки в безрозмірному вигляді була запропонована проф. В.А. Календер'ян у 1982. і з того часу успішно використовується при відповідних дослідженнях. Узагальнені криві представлені на рис.3 і 4.

Рівняння, що описують процес сушіння при $0,03 \leq N\tau / u_0 \leq 1,1$, мають поліноміальний вигляд:

$$\frac{\bar{u}}{u_0} = 0,955 + 0,39 \frac{N\tau}{u_0} - 2,62 \left(\frac{N\tau}{u_0}\right)^2 + 1,53 \left(\frac{N\tau}{u_0}\right)^3, \quad (11)$$

$$\frac{\bar{t}}{t_1} = 0,412 + 3,072 \left(\frac{N\tau}{u_0}\right) - 5,58 \left(\frac{N\tau}{u_0}\right)^2 + 3,53 \left(\frac{N\tau}{u_0}\right)^3, \quad (12)$$

де N – швидкість сушіння, c^{-1} .

Формули (11) і (12) справедливі із середньоквадратичною похибкою 4,0 % і 5,3 % відповідно.

Досліджувалася залежність ККД робочої камери від визначальних факторів (маса завантаження макаронних виробів, вихідна потужність магнетрона). Результати дослідження наведені в табл.1.

Видно, що ККД камери при сушінні макаронних виробів не перевищує 57 %. При нагріванні води ККД камери досягає 70 %, що пов'язане з її високими діелектричними властивостями.

Зі збільшенням маси величина поглиненої енергії й ККД камери збільшуються. Втрати теплоти в осередку, які обумовлені променистим теплообміном між матеріалом і стінками камери й конвективним теплообміном з повітрям, збільшуються з ростом розмірів і температури зразка. Теплові розрахунки проводилися за відомими залежностями. Вони показали, що при неповному завантаженні камери величина мікрохвильової енергії, перетвореної у внутрішню енергію вологого матеріалу, істотно нижче мікрохвильової енергії, випромінюваної генератором. При недовантаженні камери по масі, що спостерігалось в експериментах, не вся енергія мікрохвильового поля поглиналася зразком – частина її поверталася назад у магнетрон. З табл. 1 видно, що зі збільшенням маси збільшується кількість тепла, сприйнята безпосередньо зразком. Відповідно до наведених даних, при аналізі експериментальних даних по кінетиці сушіння макаронних виробів варто орієнтуватися не на значення вихідної потужності магнетрона, а на значення $Q_{кор}$, і визначати величину теплових втрат, а також ККД мікрохвильової камери.

Таблиця 1

Результати розрахунку ККД камери залежно від маси завантаження макаронних виробів

$m, кг$	$\bar{t}, ^\circ C$	$Q_{кор}, Вт$	$Q_l, Вт$	$Q_k, Вт$	$Q_n, Вт$	η_k
0,04	72	25,4	1,30	6,90	33,60	0,19
0,06	76	29,65	1,25	7,10	38,00	0,21
0,08	84	36,02	2,08	10,50	48,60	0,27
0,12	85	36,44	3,10	11,70	51,24	0,28
0,20	87	46,30	5,00	18,10	69,40	0,39
0,24	93	54,30	7,90	22,00	84,20	0,47
0,50	95	67,40	10,60	27,40	102,40	0,57
1,00	97	63,50	11,20	27,00	101,70	0,57
2,00	93	58,30	12,60	28,30	99,20	0,55

Примітки: 1. \bar{t} – температура матеріалу наприкінці процесу сушіння;

2. вихідна потужність магнетрона – 180 Вт.

Проводився аналіз впливу одночасного збільшення маси матеріалу й вихідної потужності магнетрона. Доведено, що економічно доцільно збільшувати завантаження камери, а для забезпечення високої продуктивності установки варто підвищувати потужність магнетрона. Результати аналізу різних дослідів, наведені для рівного інтервалу зміни вологовмісту, показують, що питомі витрати електроенергії на сушіння падають при одночасному збільшенні маси й

вихідної потужності магнетрону (табл. 2).

Порівняння економічної ефективності проведено із пристроєм для сушіння макаронних виробів, що випускається серійно підприємствами. Конвективна конвеєрна сушарка призначена для сушіння 300 кг короткорізаних макаронних виробів протягом 3 годин, нагрів повітря здійснюється ТЕНами загальною потужністю 90 кВт. Використання МХ для сушіння здатне значно зменшити потужність.

Аналіз даних показав, що при безперервному підведенні МХ енергії можливе зменшення потужності, необхідної для сушіння даної кількості макаронних виробів, в 3 рази. Також режим із продувкою (20 с із МХ + 1 хв продувка гарячим повітрям – 5 циклів, потім – 15 с МХ + 1 хв – продувка – 5 циклів) в 3,75 рази зменшує енерговитрати. Однак цей режим важко реалізувати на установці конвеєрного типу.

Таблиця 2

Вплив збільшення маси й вихідної потужності магнетрона на питомі витрати електроенергії

Потужність магнетрона $P_{\text{вих.}} \text{ Вт}$	Маса матеріалу $m, \text{ кг}$	Швидкість сушіння $N \cdot 10^5, \text{ с}^{-1}$	Тривалість $\phi, \text{ хв}$	Витрати на сушіння $P \cdot 10^{-6}, \text{ Дж/кг}$
80	0,05	0,58	8,5	0,816
160	0,20	0,48	10,5	0,504
160	0,06	0,71	7,0	1,120
240	0,10	1,10	4,5	0,648
240	0,20	1,67	3,0	0,216

У четвертому розділі “Проектування й розрахунок установки для сушіння макаронних виробів із застосуванням мікрохвильового нагрівання” на основі даних, отриманих експериментально, проведені розрахунки мікрохвильових установок безперервної і періодичної дії для промислового застосування, що призначені для сушіння макаронних виробів, і проаналізована можливість застосування існуючих комплектуючих матеріалів для їх виготовлення й деталей, специфічних для мікрохвильової техніки. Надані теплові розрахунки установок, що включають розрахунок тривалості сушіння, розрахунок потужності магнетронів, тепловий розрахунок магнетрона, гідравлічний розрахунок системи повітряного охолодження. Для установки безперервної дії додатково проведений розрахунок швидкості руху конвеєрної стрічки і її довжини. Розрахунок тривалості сушіння проводився за умови, що на один цикл необхідно висушити $M_{\text{вл.м.}} = 50 \text{ кг}$ макаронів з початковим вологовмістом $U_0 = 0,3 \text{ кг/кг}$, кінцеве $U_k = 0,14 \text{ кг/кг}$. Тривалість сушіння складе $\tau = 2400 \text{ с}$; при цьому швидкість сушіння $N = 5,42 \cdot 10^{-5} \text{ с}^{-1}$ – оптимальна швидкість, яка була отримана експериментально. Розрахунок потужності магнетронів і облік експериментальних даних, які полягають у тім, що доцільно використати циклічний режим сушіння, показав, що для прийнятих умов загальна вихідна потужність магнетронів повинна скласти 6 кВт. Доцільно вибрати магнетрони потужністю 0,6 кВт, для яких застосовується повітряна система охолодження. Повітряна система також підходить для магнетронів потужністю до 1 кВт, однак у цьому випадку складніше буде організувати циклічне мікрохвильове підведення енергії. Аналіз існуючих антен (щілинних, спіральних і рупорних) довів, що найбільш прийнятною є рупорна антена, ККД якої може бути не нижче хвилевідно-щілинний, при цьому її виготовлення значно простіше й дешевше. Крім того, використання рупорної антени дозволяє здійснити процес циклічного МХ нагрівання в установці із конвеєрною стрічкою. На підставі отриманих даних виконана розробка загального виду й визначений принцип роботи мікрохвильової установки для сушіння макаронних виробів. Схема

запропонованої установки безперервної дії представлена на рис. 5

Макаронні вироби через завантажувальний вузол 1 безупинно попадають на конвеєрну стрічку і проходять послідовно зони мікрохвильового нагрівання й тіньові зони, у яких макаронні вироби втрачають вологу в умовах природної конвекції. Пройшовши верхню конвеєрну стрічку, вироби пересипаються на конвеєрну стрічку нижнього ярусу, де триває процес циклічного сушіння. Мікрохвильова енергія надходить від магнетронів через рупорні антени 4, які формують опромінювану зону. Самі магнетрони розташовані у повітроводах 5, які у закріплені на металевих пластинах 3, приварених до бічних стінок камери. Для охолодження магнетронів передбачені вентилятори 6, кожний з яких розрахований на забезпечення теплового режиму двох паралельно включених в аеродинамічну мережу магнетронів. Конвеєрна стрічка повинна бути виготовлена з радіопрозорої сітки. Такі сітки також звичайно застосовуються в установках для сушіння макаронних виробів (зокрема, зразок такої сітки був отриманий від фірми БИД, Дніпропетровськ і успішно випробований в умовах мікрохвильового поля).

Таким чином, конвеєрна стрічка робочою довжиною 5 м проходить 10 попарно зв'язаних магнетронів (з метою рівномірної обробки макаронних виробів за всією її шириною), при цьому маса макаронів, одночасно оброблювана в камері, становить 50 кг. На виході з камери макаронні вироби збираються в ємності, де вони повинні охолонути й стабілізуватися. Установка встановлюється на каркасі, що може бути оснащений колесами 8 для її транспортування. Окремо варто розглянути питання безпеки роботи на установках, що використовують пристрої для генерації мікрохвильової енергії. Для забезпечення рівня випромінювання МХ енергії за межі установки менш 5 мкВт/м^2 необхідно, щоб конструкція робочої камери була зварена, однак необхідність доступу в робочу камеру визначає наявність у ній відкритих щілин, через які макаронні вироби завантажуються й вивантажуються. Для мінімізації виходу МХ енергії розміри щілинного виходу і його довжина повинні бути такі, щоб він являв собою позамежний хвилевід.

ВИСНОВКИ

1. Досліджена і експериментально обґрунтована можливість сушіння макаронних виробів з використанням мікрохвильового поля. Отримані раціональні режими сушіння, при використанні яких якість виробів відповідає існуючим стандартам, а тривалість сушіння та економічна ефективність дозволяє перейти до створення нових ефективних сушарок з кращими показниками енергозбереження.
2. Розроблена математична модель сушіння для макаронних виробів адекватно відображає залежність основних характеристик процесу сушіння (вологості, температури) від теплофізичних характеристик (теплоємності, щільності, коефіцієнту теплопровідності) та потужності МХ поля.
3. Встановлено, що математична модель сушіння одиничного макаронного виробу при МХ нагріванні з використанням коефіцієнтів ослаблення, які були отримані експериментально, вірно описує кінетику сушіння, що підтверджується результатами зіставлення розрахункових і експериментальних даних.
4. Виявлено, що розрахункові дані, отримані для плоских макаронних виробів і для виробів, які можна представити як плоскі (при співвідношенні зовнішнього й внутрішнього діаметрів $d_n / d_{вн} < 1,8$), задовільно погодяться з експериментальними даними. Встановлено, що розрахункові аналітичні формули для вологості й температури макаронних виробів при МХ сушінні можна використати як елемент розрахунку для способів сушіння, що використовують циклічні режими.
5. Доведено, що колоїдні властивості матеріалу не дозволяють рекомендувати однократний МХ нагрів, тому що в матеріалі можуть утворюватися повітряні кульки.
6. Встановлено, що під час мікрохвильового нагрівання температура матеріалу не повинна перевищувати $60 \text{ }^\circ\text{C}$, у протилежному випадку будуть відбуватися неприпустимі зміни структури матеріалу й втрата їх товарного виду.

7. Встановлено, що для раціонального використання електроенергії, а також для отримання необхідного товарного виду макаронних виробів, слід чергувати періоди МХ підводу енергії з періодами паузи – під час паузи температура матеріалу не повинна знижуватися більш ніж на 5 °С, тому що при подальшому нагріванні більше енергії буде витратитися на нагрівання матеріалу.
8. Експериментально встановлено, що ККД камери при сушінні макаронних виробів, із властивими цьому матеріалу діелектричними характеристиками, не перевищує 57 % при вихідній потужності магнетрона 180 Вт. При цьому для нагрівання води значення ККД становить 70 %. Для збільшення ККД доцільно використати нові магнетрони, максимальне значення ККД яких становить 90 %.
9. Доведено, що при безперервному підведенні МХ енергії можливо зменшення потужності, необхідної для сушіння даної кількості макаронних виробів, в 3 рази, в порівнянні з конвективною сушаркою. Також режим із продувкою (20 с - МХ нагрівання + 1 хв продувка гарячим повітрям - 5 циклів, потім - 15 с МХ + 1 хв - продувка - 5 циклів) в 3,75 рази зменшує енерговитрати. Однак, практично цей режим важко реалізувати. Тому до практичного використання рекомендується режим, при якому експозиція в МХ полі чергується з паузою в продовж 60 с.
10. Показано, що отримані дані з кінетики сушіння макаронних виробів в МХ полі можуть бути основою для розробки мікрохвильової сушарки. Для забезпечення рівномірного сушіння при використанні мікрохвильової енергії доцільно застосовувати конвеєрну установку, однак треба особливу увагу приділяти безпеці роботи й звести до мінімуму втрати МХ енергії через технологічні вікна. Для цього вхід у пристрій і вихід повинні бути розраховані як позамежні хвилеводи. Для забезпечення зонального нагрівання макаронних виробів доцільно використати рупорні антени, які передають МХ енергію.

Перелік опублікованих наукових праць

1. Калинин Л.Г. Моделирование процесса извлечения влаги из капиллярно-пористых структур под воздействием микроволнового электромагнитного поля / Л.Г. Калинин, О.Л. Бошкова // Наук. пр. ОНАХТ № 28, Т.2, Одесса,– 2006.– С. 275-278.

Сформулювала модель виділення вологи з капілярно-пористих тіл під впливом мікрохвильового поля для матеріалів з різним значенням еквівалентного діаметру пор.

2. Бошкова О.Л. Особенности сушки макаронных изделий в микроволновом поле / Л.Г. Калинин, О.Л. Бошкова // Тепловые режимы и охлаждение радиоэлектронной аппаратуры – 2007. – Вып.1 С. 105-110.

Здобувач на підставі даних власних експериментів провела теплові розрахунки експериментів з ціллю виявлення залежності ККД робочої мікрохвильової камери від маси завантаження та потужності магнетрона та навела необхідні рекомендації щодо вибору режимних параметрів сушіння.

3. Бошкова О.Л. Математическое моделирование сушки макаронных изделий в тонком слое при микроволновом нагреве / Л.Г. Калинин, О.Л. Бошкова // Наук. пр. ОНАХТ № 30, Т.1, Одеса – 2007.– С. 30-35.

Здобувач розробила математичну модель процесу сушіння макаронних виробів в диференціальної формі та отримала її рішення у вигляді залежностей вологозмісту та температури матеріалу від часу сушіння та порівняла дані аналітичного розрахунку з експериментальними даними.

4. Бошкова О.Л. Особенности режимов сушки макаронных изделий/Калинин Л.Г., Бошкова О.Л. // Наук. пр. ОНАХТ № 30, Т.1, Одеса – 2007.– С. 133-137.

Здобувач отримала криві кінетики сушіння макаронних виробів при різних значеннях потужності мікрохвильового поля, отримала та навела узагальнюючі залежності, проаналізувала ре-

зультати та навела рекомендовану к впровадженню установку для сушіння макаронних виробів.

5. Бошкова О.Л. Устройство для сушки макаронных изделий с применением микроволнового нагрева / Л.Г.Калинин, О.Л. Бошкова // Наук. пр. ОНАПТ № 30, Т.2, Одеса – 2007.– С. 203-206.

Здобувач отримала основні параметри роботи мікрохвильового пристрою конвеєрного типу, схемне рішення якого дозволяє здійснити циклічний нагрів матеріалу

6. Бошкова О.Л. Исследование кинетики выхода влаги их пористого материала под действием микроволнового излучения / Л.Г. Калинин, И.Л. Бошкова, О.Л. Бошкова // Мат-лы I Межд. науч.-практ. конф. «Наука и технологии: шаг в будущее – 2006». Белгород, Руснаучкнига 2006 г. – Т.14. «Технические науки». – С. 82 – 84.

Здобувач здійснила проведення експериментів, провела обробку експериментальних даних та аналіз результатів.

7. Бошкова О.Л. Сушка макаронных изделий с использованием пульсирующих режимов микроволнового нагрева / Л.Г. Калинин, О.Л. Бошкова // Тез. докл. II Межд. Науч.-практ. конф. «Пищевые технологии – 2006». ОНАПТ, Одесса-2006. - С. 77.

Розробила методики проведення експериментів, виконала експериментальні дослідження та отримала рекомендації стосовно раціонального режиму сушіння макаронних виробів.

АНОТАЦІЯ

Бошкова О.Л. Сушіння короткорізаних макаронних виробів із застосуванням мікрохвильового електромагнітного поля. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.18.12 – Процеси та обладнання харчових, мікробіологічних та фармацевтичних виробництв. – Одеська національна академія харчових технологій, Одеса, 2007.

У дисертаційній роботі аналітично й експериментально досліджене сушіння короткорізаних макаронних виробів із застосуванням енергії електромагнітного поля мікрохвильової частоти, з метою визначення оптимальних режимів сушіння, а також дослідження особливостей процесу виведення вологи з колоїдного капілярно-пористого тіла при об'ємному підведенні теплоти. У дисертації запропонована математична модель процесу сушіння для макаронного виробу, довжина якого дозволяє зневажити кінцевими ефектами. Рішення закладених у модель диференціальних рівнянь дає можливість розрахувати середній вологовміст і температуру матеріалу. Порівняння експериментальних і розрахункових даних показує хорошу збіжність. Для визначення основних закономірностей процесу сушіння в рамках поставленої задачі були проведені експерименти, при яких досліджувався вплив форми виробів, маси завантаження, потужності, що підводиться, експозиції МХ нагрівання на тривалість процесу і якість кінцевого продукту. Отримано, що раціонально періоди МХ нагріву чергувати з періодами, протягом яких волога, яка вийшла до поверхневих шарів, випаровується. Експериментальні дані задовільно узагальнюються аналітичною залежністю в безрозмірному виді, яка застосовна для макаронних виробів різного виду в досліджуваному діапазоні параметрів процесу. Визначені режими сушіння, які можуть бути рекомендовані для промислового застосування. Розроблена конвеєрна установка, яка реалізує циклічне сушіння макаронних виробів. Розрахунки показують, що запропонована технологія сушіння економічно вигідніше використовуваної в цей час технології, заснованої на конвективному підводі теплоти.

Ключові слова: сушіння, макаронні вироби, мікрохвильове поле, об'ємне нагрівання, математична модель, узагальнена залежність.

АННОТАЦИЯ

Бошкова О.Л. Сушка короткорезанных макаронных изделий с применением микроволнового электромагнитного поля. – Рукопись.

Диссертация на соискание научной степени кандидата технических наук по специальности 05.18.12 – процессы и оборудование пищевых, микробиологических и фармацевтических производств. – Одесская национальная академия пищевых технологий, Одесса, 2007.

В диссертационной работе аналитически и экспериментально исследована сушка коротко-резанных макаронных изделий с применением энергии электромагнитного поля микроволновой частоты, целью которых было определение оптимальных режимов сушки, а также исследование особенностей процесса удаления влаги из коллоидного капиллярно-пористого тела при объемном подводе теплоты. В диссертации предложена математическая модель сушки для макаронного изделия, длина которого позволяет пренебречь концевыми эффектами, а толщина не превышает 2 мм, что, как показывают расчеты для исследуемого материала, дает возможность пренебречь изменением температуры по толщине. Решение заложенных в модель дифференциальных уравнений позволяет рассчитать среднее влагосодержание и температуру материала. Научно обоснована применимость предлагаемой модели для проведения расчетов основных параметров процесса. Исследование достоверности математической модели при анализе влияния изменения теплофизических характеристик материала и условий теплообмена позволило установить, что она качественно верно отражает зависимость изменения влагосодержания и температуры материала от начальных и граничных условий. Сравнение экспериментальных и расчетных данных показывает хорошую сходимость результатов, что говорит о достоверности модели, при этом в расчете были использованы коэффициенты ослабления, полученные экспериментальным путем. При этом проведение расчетов для макаронных изделий, форма которых существенно отличается от принятых условий, приводит к существенному увеличению погрешности. Предлагаемая модель может быть также использована как элемент расчета при режимах сушки, когда микроволновая энергия подводится циклично. Для определения основных закономерностей процесса сушки в рамках поставленной задачи были проведены эксперименты, при которых исследовалось влияние формы изделий, массы загрузки, подводимой мощности, экспозиции МВ нагрева на длительность процесса и качество конечного продукта. Определено, что при правильно подобранных режимных параметрах микроволновой нагрев, для которого характерна однонаправленность градиентов температуры и давления, приводит к интенсивному выходу влаги из центральных слоев материала к поверхностным, что значительно уменьшает диффузионное сопротивление, и целесообразно обеспечить процесс последующего испарения влаги в жидком состоянии с поверхностных слоев в процессе естественной конвекции. Экспериментально получено, что рационально периоды МВ нагрева чередовать с периодами паузы, в течение которых влага, вышедшая к поверхностным слоям, испаряется. Экспериментальные данные удовлетворительно обобщаются аналитической зависимостью в безразмерном виде, которая применима для макаронных изделий различного вида в исследуемом диапазоне параметров процесса. Определены режимы сушки, которые могут быть рекомендованы для промышленного применения. Рекомендуемая скорость сушки составляет $N = 5,42 \cdot 10^{-5} \text{ с}^{-1}$. Разработана конвейерная установка, которая реализует циклическую сушку макаронных изделий. При этом следует особое внимание обращать на массу загружаемого материала, т.к. уменьшение загрузки ниже граничного значения приводит к падению КПД рабочей камеры, что приводит к перерасходу электроэнергии и снижению ресурса работы магнетрона. Отмечается, что изготовление конвейерной установки, включающей магнетроны, должно учитывать особые требования к безопасности работы персонала, для чего следует предусмотреть на входе и выходе заградительные волноводы. Расчеты показывают, что предлагаемая технология сушки экономически выгоднее используемой в настоящее время технологии, основанной на конвективном подводе теплоты.

Ключевые слова: макаронные изделия, сушка, микроволновое поле, объемный нагрев, математическая модель, обобщенная зависимость.

SUMMARY

Boshkova O.L. Drying of Short-Cut Pasta with Application of Microwave Electromagnetic Field. – Manuscript.

Thesis on competition of the Candidate of Sciences (Engineering) academic degree in specialty

05.18.05 – “Processes and Equipment of Food, Microbiological, and Pharmaceutical Productions”, Odessa National Academy of Food Technologies, Odessa, 2007.

In this Thesis the drying of short-cut pasta with application of electromagnetic field energy of microwave frequency has been investigated analytically and experimentally with the aims of determining the optimum drying regimes, as well as of studying of features of the moisture removal from a capillary-porous body at volumetric heat supply. A mathematical model of pasta drying process has been suggested in the Thesis for pasta lengths that allow one to neglect the end-effects. The solution of differential equations incorporated by the model allows one to calculate the average moisture content and temperature of the material. Comparison of experimental and calculated data shows good convergence. This speaks for the reliability of the model. For determination of the basic relationships of the drying process within the defined problem experiments have been carried out with investigation of the influence of the pasta form, mass load, power input, MW exposition on the process duration and product quality. The conclusion is supported that it is rational to alternate periods of MW heating with periods, during which the moisture appeared at the product surface can evaporate. Experimental data can satisfactorily be generalized by an analytical dependence of dimensionless variables, which is applicable for different pasta kinds in the entire investigated parameters range. Drying modes that can be recommended for industrial applications have been determined. A conveyer type dryer has been developed that realizes the cyclic drying process for pasta. Calculations show that the suggested drying technology is more economic than the now in use technology based on a convection heat supply.

Keywords: drying, pasta, microwave field, volumetric heating, mathematical model, generalized dependence.

Підписано до друку __.__.2007 р. Формат 60×90/16. Об'єм 0,9 умов. друк. арк.
Замовлення №__. Тираж 100 прим.