

ХАРКІВСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ХАРЧУВАННЯ ТА ТОРГІВЛІ

ПОТАПОВ ВОЛОДИМИР ОЛЕКСІЙОВИЧ

УДК 664.834.2

**НАУКОВІ ОСНОВИ АНАЛІЗУ ТА КЕРУВАННЯ
КІНЕТИКОЮ СУШІННЯ ХАРЧОВОЇ СИРОВИНИ**

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

АВТОРЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового ступеня
доктора технічних наук

Харків – 2007

Дисертацією є рукопис.

Роботу виконано в Харківському державному університеті харчування та торгівлі Міністерства освіти і науки України.

Науковий консультант: доктор технічних наук, професор

Погожих Микола Іванович,

Харківський державний університет харчування та торгівлі,
завідувач кафедри енергетики та фізики

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор

Бурдо Олег Григорович,

Одеська національна академія харчових технологій,
завідувач кафедри процесів та апаратів харчових
виробництв

доктор технічних наук, професор

Мальований Мирослав Степанович,

Національний університет “Львівська політехніка”,
завідувач кафедри екології та охорони навколишнього
середовища

доктор технічних наук

Малецька Кіра Дмитрівна,

Інститут технічної теплофізики НАН України,

провідний науковий співробітник

відділу тепломасообміну в дисперсних системах

Провідна установа: Національний університет харчових технологій, кафедра процесів і апаратів харчових виробництв та технології консервування, Міністерство освіти і науки України, м. Київ

Захист відбудеться “18” травня 2007 р. о 10⁰⁰ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.088.01 Харківського державного університету харчування та торгівлі за адресою: вул. Клочківська, 333, м. Харків, 61051.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Харківського державного університету харчування та торгівлі за адресою: вул. Клочківська, 333, м. Харків, 61051.

Автореферат розісланий “18” квітня 2007 р.

Вчений секретар

спеціалізованої вченої ради

Дубініна А.А.

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Збільшення обсягів виробництва в харчовій і переробній промисловості на фоні подорожчання енергоресурсів викликає потребу в розробці перспективних енерго- й ресурсозберігаючих технологій та устаткування. Найбільші енерговитрати в цих галузях припадають на тепло- й масообмінні процеси, зокрема на процес сушіння. У той же час традиційний підхід у технологічних і проектно-конструкторських розробках, заснований на експериментальних дослідженнях, вимагає істотних капітальних вкладень і не завжди дозволяє одержувати оптимальні інженерні рішення, що є суттєвою перешкодою для переоснащення переробної промисловості. Тому актуальною проблемою є не лише створення нових енергозберігаючих технологій та устаткування, але й зниження фінансових витрат на сам процес розробки. Одним з перспективних напрямків вирішення зазначеної проблеми є розробка нових методів розв'язання комплексу задач теорії сполучених процесів перенесення з метою підвищення ефективності сушильного устаткування, оптимізації процесу сушіння харчової сировини за енерговитратами та якістю сушеної продукції.

Сучасна теорія сполучених процесів перенесення, що застосовується до сушіння харчової сировини, має низку протиріч. Якщо в статистиці процесу сушіння активно використовується поняття структури вологи, її енергії зв'язку, то у рівняннях динаміки застосовуються твердження нерівноважної термодинаміки, які не враховують основи вчення про форми зв'язку вологи. У результаті на практиці для опису кінетики сушіння та інженерних розрахунків використовуються емпіричні формули, отримані для певного виду харчової сировини, технології сушіння та виду устаткування. І хоча кінетико-емпіричні моделі вирішують низку технологічних і технічних завдань, проте вони не дають змоги аналізувати внутрішні механізми перенесення з метою одержання оптимальних режимів сушіння за показниками якості харчової сировини або економічності процесу, а отже, цілеспрямовано керувати процесом.

Тому першочерговим завданням у зазначеній проблемі є розробка методів аналізу та керування процесом сушіння на підставі загальної фізичної моделі харчової сировини, яка б ураховувала її молекулярно-кінетичні особливості, фізико-хімічні зміни у процесі сушіння та пов'язувала їх з технологічними режимами процесу та параметрами устаткування.

Такий загальний підхід дозволяє ефективно розраховувати раціональні режими сушіння харчової сировини та проектувати нове обладнання. Усе це й стало підставою для вибору теми дисертаційної роботи.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота виконувалася відповідно до тематичних планів наукових досліджень кафедри енергетики та фізики ХДУХТ у межах держбюджетних тем: №5-95-97Б “Застосування фізичних методів досліджень для контролю та аналізу процесів технологічної обробки харчових продуктів”, №2-98-01Б “Фізи-

ко-хімічні та технологічні проблеми стану води в харчових продуктах”, №15-02-4Б “Проблеми драглеутворення та сушіння харчових продуктів”, №16-05-07Б (№ держреєстрації 0105U002044) “Дослідження фізичних властивостей та процесів переробки харчової сировини”, а також госпдогвірної теми №18-05-06Д (№ держреєстрації 0105U007472) “Розробка проекту технічних умов і технологічної інструкції на подрібнене сушене м'ясо” у межах діяльності Центру сушіння ХДУХТ.

Мета і задачі дослідження. Метою дослідження є розробка принципів зниження енергетичних витрат і підвищення якості готової продукції в процесах сушіння харчової сировини шляхом регулювання параметрів сушильного агента на основі фізико-математичної моделі кінетики сполучених процесів перенесення.

Виходячи з мети досліджень, сформульовано наступні задачі:

- проаналізувати сучасний стан теорії та методів моделювання сполучених явищ переносу в процесах сушіння та виявити науково-технічну проблему;
- сформулювати та обґрунтувати фізичну модель харчової сировини як об'єкта сушіння на основі молекулярно-кінетичного підходу;
- розробити молекулярно-кінетичну модель процесів сорбції-десорбції вологи та одержати їх аналітичний опис;
- обґрунтувати та розробити фізико-математичну модель еволюції структури вологи в процесі сушіння колоїдних капілярно-пористих тіл з урахуванням їх деформування;
- створити фізико-математичну модель кінетики сполучених процесів перенесення маси, енергії, імпульсу під час сушіння харчової сировини;
- провести експериментальну перевірку отриманих рівнянь з метою визначення впливу параметрів сушильного агента на коефіцієнти перенесення, тепло-масообмінні, структурно-механічні характеристики та кінетику змінювання показників якості харчової сировини в процесі сушіння;
- розробити концепцію розрахунку раціональних режимів сушіння харчової сировини та алгоритми оптимального керування кінетикою сушіння;
- розробити методику розрахунку сушильного устаткування, що враховує кінетику фазового складу вологи та гідродинаміку в об'ємі апарата;
- розробити програмне забезпечення для аналізу кінетики сполучених процесів перенесення та інженерних розрахунків сушильного устаткування;
- провести впровадження результатів досліджень у виробництво.

Об'єктом дослідження є процес сушіння харчової сировини.

Предметом дослідження є кінетика процесів перенесення маси, енергії, імпульсу під час сушіння харчової сировини.

Методи дослідження представлені стандартними та оригінальними методиками експериментальних досліджень кінетики процесів перенесення, статистичними методами обробки експе-

риментальних даних, аналітичними та чисельними методами розв'язання систем диференціальних рівнянь із використанням обчислювальної техніки.

Наукова новизна одержаних результатів. В основу теоретичних і експериментальних досліджень покладено наукову концепцію: структура та властивості вологи в харчовій сировині є визначальними чинниками сполучених процесів перенесення маси, енергії, імпульсу, кінетика яких зумовлює існування та вибір раціональних технологій сушіння та способів їхньої апаратурної реалізації.

На підставі проведених теоретичних і експериментальних досліджень уперше:

- розроблено молекулярно-кінетичну модель стану структури вологи як системи слабо взаємодіючих частинок дисперсного середовища у полі сил Ван-дер-Ваальса, що утворене дисперсною фазою, яка є загальною для описання статички, динаміки та кінетики сушіння харчової сировини;

- обґрунтовано фізичну модель харчової сировини як об'єкта сушіння, засновану на уявленні про гетероенергетичний стан вологи, що дозволяє розділяти механізми внутрішнього масоперенесення для вільної та зв'язаної вологи;

- доведено, що ефект динамічного структурування вологи, який полягає в змінюванні кількісного співвідношення між вільною та зв'язаною вологою, є визначальним чинником сполучених явищ перенесення маси, енергії, імпульсу та визначає динаміку та кінетику більшості технологічних процесів обробки харчової сировини;

- доведено, що фізичними характеристиками, які визначають динамічну поведінку вологи, є енергія зв'язку мономолекулярного шару та характеристики пористої структури, які змінюються внаслідок деформації сировини в процесі сушіння;

- отримано систему диференціальних рівнянь кінетики сполучених процесів перенесення під час сушіння, що заснована на гетероенергетичній моделі структури вологи та реологічній моделі пружно-в'язкого тіла;

- отримані рівняння, що описують кінетику вільної та зв'язаної вологи, температури, тиску парогазової суміші, деформацій і механічних напружень для випадків низько- і високотемпературного конвективного сушіння харчової сировини;

- розроблено теоретичні основи планування багатоступеневих режимів сушіння харчової сировини зі змінними параметрами сушильного агента, що засновані на принципі мінімізації цільової функції якості;

- обґрунтовано та розроблено універсальний підхід до методів розрахунку раціональних режимів сушіння харчової сировини на основі керування кінетикою процесу, що дозволяє прогнозувати якість готової продукції та знижувати енерговитрати.

Практичне значення отриманих результатів полягає у наступному:

- розробці принципів аналізу процесів попередньої підготовки харчової сировини до сушіння та умов зберігання готової продукції на основі експериментального визначення за ізотермами сорбції-десорбції: енергії зв'язку, структури вологи, параметрів диференціальної функції розподілу капілярів за радіусами;
- розробці класифікації харчової сировини як об'єкта сушіння за структурно-енергетичним параметром, що являє собою відношення середніх витрат енергії на видалення зв'язаної вологи до витрат на видалення вільної вологи;
- розробці методів розрахунку тривалості сушіння залежно від параметрів сушильного агента та фізичних характеристик харчової сировини;
- розробці методики прогнозування змінювання вмісту біологічно активних речовин у процесі сушіння харчової сировини та розрахунку раціональних режимів, що забезпечують мінімально можливі втрати якості сировини за низько- та високо-інтенсивних способів сушіння;
- розробці двоступеневих технологічних режимів для сушіння харчової сировини, що забезпечують зниження енерговитрат на 10...40% і зменшення втрат вітамінного складу на 10...30%;
- розробці універсальних алгоритмів керування кінетикою сушіння харчової сировини за наступними критеріями оптимальності: обмеження за втратами біологічно активних речовин, обмеження за максимальними механічними напруженнями, обмеження за енерговитратами;
- створенні комплексу програм, що забезпечують визначення фізичних характеристик харчової сировини за даними сорбційних і кінетичних експериментів;
- розробці комплексу програм для автоматизації інженерних розрахунків сушильного устаткування, включаючи програми моделювання гідродинамічних, теплових і концентраційних полів в об'ємі сушильних установок;
- розробці конструкцій вискоелективного устаткування для сушіння, копчення та гідротермічної обробки харчової сировини, створенні та випробуванні дослідно-промислових зразків та їх серійному виробництві на машинобудівному підприємстві ПП "Технолог" (м. Харків);
- розробці та впровадженні комплексу програм для автоматизації інженерних розрахунків тепломасообмінного устаткування на підприємстві СП "Венда, ЛТД" (м. Харків);
- розробці та впровадженні нормативно-технічної документації для виробництва сушеного м'ясного фаршу на підприємстві ТОВ "Золотий Фенікс" (м. Харків).

Особистий внесок здобувача полягає в аналізі стану проблеми, формулюванні наукової концепції та мети досліджень, постановці задач досліджень, складанні програм досліджень, участі у проведенні патентного пошуку та наукових експериментів, обробці дослідних даних, узагальненні отриманих результатів і формулюванні висновків, підготовці матеріалів до публікації та складанні заявок на винаходи, розробці нормативної та проектної документації, а також проведенні заходів із впровадження науково-технічних розробок у виробництво.

Апробація результатів дисертації. Основні положення дисертаційної роботи доповідалися, обговорювалися та були схвалені на Міжнародній конференції “Развитие массового питания, гостиничного хозяйства и туризма в условиях рыночных отношений” (м. Київ, 1994 р.); Науково-технічній конференції “Потребительская кооперация в переходный период. Проблемы и перспективы” (м. Полтава, 1995 р.); IX Міжнародній конференції „Удосконалення процесів та апаратів хімічних, харчових та нафтохімічних виробництв” (м. Одеса, 1996 р.); Науково-практичній конференції “Стан і проблеми розвитку торгівлі й харчування в Україні” (м. Харків, 1997 р.); Міжнародній науково-методичній конференції “Стратегічні напрямки розвитку підприємств харчових виробництв і торгівлі” (м. Харків, 2002 р.); Міжнародній науково-практичній конференції “Управлінські та технологічні аспекти розвитку підприємств харчування та торгівлі” (м. Харків, 2003 р.); Міжнародній науково-практичній конференції “Современные энергосберегающие тепловые технологии (сушка и термовлажностная обработка материалов)” (м. Москва, 2002 р.); Міжнародній науково-практичній конференції “ Актуальні проблеми харчування: технологія та обладнання, організація і економіка” (м. Святогорськ, 2003 р.); Міжнародній конференції “Проблемы промышленной теплотехники” (м. Київ, 2001, 2003, 2005 рр.); IV Міжнародній науково-практичній конференції “Наука і соціальні проблеми суспільства: харчування, екологія, демографія” (м. Харків, 2006 р.); наукових конференціях професорсько-викладацького складу ХДУХТ (1995-2006 рр.).

Зразки розробок було представлено на міжнародних виставках-ярмарках “Наука Харківщини - 2000” (м. Харків, 2000 р.), “Слов'янський базар” (м. Харків, 2000 р.), “Наука Харківщини-2002” (м. Харків, 2002 р.), “Наука Харківщини - виробництву 2004” (м. Харків, 2004 р.).

Публікації. За результатами досліджень опубліковано 50 наукових праць у тому числі 37 статей (серед яких 25 статей у наукових фахових виданнях, затверджених ВАК України), 1 патент на винахід РФ і 1 деклараційний патент України, 11 тез доповідей на наукових конференціях.

Структура та обсяг роботи. Дисертаційна робота складається зі вступу, 8 розділів, висновків, списку використаних джерел, що включає 308 найменувань, у тому числі 46 іноземних та 6 додатків. Роботу викладено на 348 сторінках, вона містить 146 рисунків, 31 таблицю.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ

У вступі обґрунтовано актуальність теми дисертаційної роботи, сформульовано мету і задачі дослідження, викладено наукову концепцію, новизну і практичне значення одержаних результатів, наведено відомості щодо реалізації та апробації роботи.

У першому розділі “Сучасний стан теорії та методів моделювання внутрішніх і зовнішніх процесів перенесення в процесах сушіння харчової сировини” проведено аналіз теорії сушіння харчової сировини. Відзначено, що теорія сполучених явищ перенесення в цей час перебуває на

новому етапі розвитку, який характеризується переглядом класичних уявлень про статику, динаміку і кінетику сушіння. Зауважено, що існуючі фізико-математичні моделі динаміки явищ внутрішнього перенесення, засновані на феноменологічних лінійних співвідношеннях Онзагера, не враховують для вологи динамічні ефекти міжфазної взаємодії та адекватну реологічну модель харчової сировини як об'єкта сушіння. Тому на практиці для аналізу процесу сушіння найчастіше використовують різноманітні кінетичні моделі. Показано, що існуючі емпіричні моделі кінетики сушіння мають добру адекватність з експериментальними даними, але не можуть бути використані для наукового аналізу процесу, бо містять коефіцієнти, що не пов'язані з моделями динаміки та статички сушіння.

Наголошено на те, що відсутність фізичних моделей, які б пов'язували кінетику внутрішніх процесів перенесення та змінювання показників якості харчової сировини, стримує розробку нових енерго- та ресурсозберігаючих технологій сушіння та знижує ефективність розробки нового та експлуатацію діючого сушильного устаткування. З огляду на це сформульовано задачі дослідження, що спрямовані на досягнення мети дисертаційної роботи.

У другому розділі “Наукова гіпотеза. Задачі та методики досліджень” обґрунтовано наукову концепцію роботи.

Показано, що головна структурна особливість харчової сировини — енергетична неоднорідність вологи всередині колоїдного капілярно-пористого тіла (ККПТ) може бути основою єдиної моделі для статички, динаміки та кінетики сушіння. При цьому найбільш простий і експериментально контрольований спосіб класифікації структури вологи — це поділ її на “вільну” і “зв'язану”. Відзначено, що енергія зв'язку вологи та характер пористої структури повинні впливати не лише на теплофізичні, масообмінні та електричні властивості сировини, але й на хімічні, біохімічні та мікробіологічні зміни її в процесі сушіння.

З огляду на це запропоновано гетероенергетичну модель харчової сировини як об'єкта сушіння. На відміну від класичної моделі, де волога вважається енергетично однорідною, запропоновано в явному вигляді враховувати різні механізми масоперенесення вільної та зв'язаної вологи (рис. 1).

У такій моделі потоки як вільної, так і зв'язаної вологи описуються класичним дифузійним законом, проте мають істотно різні коефіцієнти масопровідності унаслідок різної енергії активації для вільної та зв'язаної вологи:

$$; \quad (1)$$

$$, \quad (2)$$

- де, — густина потоку вільної та зв'язаної вологи відповідно, $\text{кг}/\text{м}^2\cdot\text{с}$;
 — концентрація сухих речовин в об'ємі вологого тіла, $\text{кг}/\text{м}^3$;
 , — ефективний коефіцієнт масопровідності вільної та зв'язаної вологи відповідно, $\text{м}^2/\text{с}$;
 , — градієнт вологовмісту вільної та зв'язаної вологи відповідно, $\text{кг}/\text{кг}$.

Рис. 1. Потоки вільної та зв'язаної вологи у гетероенергетичній моделі об'єкта сушіння

Існування у відкритій термодинамічній системі компонентів з різним часом релаксації до стаціонарного стану може призводити до нелінійних ефектів їхнього взаємного перетворення. Це безпосередньо випливає із принципу мінімуму виробництва ентропії І. Пригожина, відповідно до якого в гетерогенній відкритій системі повинні виникати внутрішні потоки, що взаємно компенсують один одного. Це зумовлює визначальний вплив еволюції структури вологи на фізико-хімічні властивості харчової сировини у процесі сушіння.

Обґрунтовано використання класичної молекулярно-кінетичної теорії для опису еволюції структури вологи під час сушіння.

Для вирішення комплексу задач, що впливають з висунутої гіпотези, було розроблено нові експериментальні методики кількісного аналізу структури й енергії зв'язку вологи в харчовій сировині на основі методів ЯМР-спектроскопії та низькотемпературної диференціальної калориметрії. Наведено описи оригінальних методик: чисельного моделювання гідродинамічних, теплових і концентраційних полів у робочому об'ємі конвективних сушарок, методики обробки істотно нелінійних математичних моделей для вирішення зворотних задач і задач регресійного аналізу. Описано комплекс програм для автоматизації наукових та інженерних розрахунків.

У третьому розділі “Молекулярно-кінетична модель структури вологи у харчовій сировині” запропоновано структуру вологи характеризувати кількістю “вільної” та “зв'язаної” вологи та її розподілом за енергією зв'язку з дисперсною фазою. При цьому молекулярно-кінетичну модель поведінки у тепло-масообмінних процесах наведено класичною нерівноважною системою слабо взаємодіючих часток, що перебувають у зовнішньому силовому полі сил Ван-дер-Ваальса, що утворене дисперсною фазою. Доведено, що за цих припущень функцією розподілу молекул є функція Максвелла-Больцмана.

Обґрунтовано молекулярно-кінетичну границю поділу молекул на “вільні” і “зв'язані”, яка визначається із рівності їх потенційної та кінетичної енергії. За цих умов отримано кількісне співвідношення для розрахунку відносної концентрації зв'язаної вологи:

де — відносна концентрація молекул зв'язаної вологи, м^{-3} ;

N_b — число молекул зв'язаної вологи;

N — загальне число всіх молекул;

V — об'єм тіла, м^3 ;

E — кінетична енергія молекул, Дж;

— граничне значення кінетичної енергії молекул зв'язаної вологи, Дж;

— потенційна енергія молекул у полі сил Ван-дер-Ваальса, Дж;

\vec{r} — координата молекул, м;

k_B — стала Больцмана, Дж/К;

T — температура, К.

Відносна частина молекул зв'язаної вологи, що містяться в довільному об'ємі тіла V , розраховується наступним чином:

(4)

де A_b — безрозмірна відносна частина молекул зв'язаної вологи.

При цьому

(5)

де A_f — безрозмірна відносна частина молекул вільної вологи.

Наведено експериментальні дані, отримані методом ЯМР, та виконано теоретичне обґрунтування виявленого ефекту динамічного структурування вологи, що полягає в зміні кількісного співвідношення між вільною та зв'язаною вологою, зумовленій динамікою температури та деформацій ККПТ в процесі сушіння. Для розрахунку величини зазначеного ефекту запроваджено коефіцієнт динамічного структурування вологи, який вказує на відносну кількість молекул, що змінюють свій енергетичний стан від “вільного” до “зв'язаного” в одиницю часу.

Проведено кількісні розрахунки структури вологи у капілярах різного радіуса та форми. На рис. 2 наведено залежності відносного вмісту вільної та зв'язаної вологи A_f, A_b у циліндричних капілярах радіуса за різної температури.

Доведено, що динамічне поведіння вологи в сполучених процесах перенесення визначається, у першу чергу, енергією зв'язку мономолекулярного шару та характеристиками пористої структури сировини, зокрема диференціальною функцією розподілу капілярів за радіусами. При цьому деформації внаслідок зсідання або набрякання зумовлюють визначальний вплив на структуру вологи. Оскільки в тепломасообмінних процесах харчової сировини майже завжди змінюється

її температура та пористість, то це буде викликати змінювання стану вологи і, як наслідок, збільшення або зменшення енерговитрат на її видалення. Це зумовлює практичне значення вивчення еволюції структури вологи у конкретних способах сушіння.

Рис. 2. Відносний вміст вільної та зв'язаної вологи залежно від характерного розміру пор за постійної питомої енергії зв'язку мономолекулярного шару 10 кДж/моль : 1 – $T=223 \text{ К}$; 2 – $T=293 \text{ К}$; 3 – $T=373 \text{ К}$

Виконані розрахунки величини ефекту динамічного структурування вологи для основних способів сушіння: конвективного низькотемпературного та високотемпературного, сублімаційного сушіння та сушіння змішаним теплопідведенням (ЗТП-сушіння). На рис. 3, 4 наведено характерне змінювання концентрації зв'язаної вологи у плоскому фрагменті ККПТ розміром $20 \times 20 \text{ нм}$ під час сушіння різними способами. Проведені розрахунки показали, що в процесі ЗТП-сушіння кількість зв'язаної вологи зменшується на 10% відносно її первісного вмісту, тоді як у процесі низькотемпературного конвективного сушіння кількість зв'язаної вологи зростає в середньому на 10%. Відповідно до цього пропорційно змінюються загальні енерговитрати на видалення вологи з сировини.

Запропоновані уявлення про структуру вологи покладено в основу молекулярно-кінетичної моделі процесів сорбції-десорбції харчової сировини за наступних припущень: молекули на стінках капілярів циліндричної форми знаходяться у полі сил Ван-дер-Ваальса за розподілом Максвелла-Больцмана, диференціальна функція розподілу пор за радіусами відповідає логарифмічно нормальному розподілу.

Рис. 3. Поле концентрацій зв'язаної вологи у процесі конвективного низькотемпературного сушіння

Рис. 4. Поле концентрацій зв'язаної вологи у процесі ЗТП-сушіння

Отримано рівняння ізотерми сорбції-десорбції ККПТ тіла у наступному вигляді:

(6)

(7)

(8)

(9)

де w_∞ — рівноважний вологовміст, кг/кг;

φ — безрозмірна відносна вологість повітря;

— безрозмірна диференціальна функція розподілу пор за радіусами;

Π — безрозмірна пористість ККПТ;

R_G — газова стала, Дж/кг·К;

ρ_w — густина води, кг/м³;

m і σ_R — безрозмірні параметри логарифмічно нормального розподілу $f_{II}(R^*)$;

R^* — безрозмірний радіус капілярів;

R — радіус капіляра, м;

d_0 — радіус молекули води, м.

З метою практичного застосування цих рівнянь знайдено наближені інженерні формули. Запропоновано методику, що дозволяє вирішувати обернену задачу, тобто за даними лише однієї експериментальної ізотерми сорбції-десорбції отримувати: параметри диференціальної функції розподілу пор за радіусами, максимальний гігроскопічний вологовміст, вологовміст мономолекулярного шару, його енергію зв'язку, кількість вільної та зв'язаної вологи. Це надає можливість вирішувати повний комплекс задач, пов'язаних з аналізом процесів попередньої підготовки харчової сировини перед сушінням та режимів зберігання готової продукції.

З метою аналізу енерговитрат на процес сушіння запропоновано знаходити середню енергію зв'язку вологи в сировині \bar{r}_b як осереднене значення за відомою функцією розподілу капілярів за радіусами $f_l(R^*)$ та енергією зв'язку моношару. Для цього введено безрозмірний структурно-енергетичний параметр Q_b^* , що являє собою відношення середніх витрат енергії на видалення зв'язаної вологи до витрат на видалення вільної вологи:

$$, \quad (10)$$

де m_f, m_b — маса вільної та зв'язаної вологи в сировині відповідно, кг;

\bar{r}_b — середня питома енергія зв'язку вологи, Дж/кг;

r_f — питома теплота випаровування вільної вологи (схована теплота пароутворення), Дж/кг;

A_b^0 — безрозмірний початковий вміст зв'язаної вологи.

Цей параметр є індивідуальною характеристикою сировини, бо враховує конкретну структуру її пористості через величину \bar{r}_b . Це дало можливість класифікувати харчову сировину за структурно-енергетичним параметром, що характеризує додаткові енерговитрати, пов'язані з видаленням зв'язаної вологи. Показано, що найбільші додаткові енерговитрати (до 50% порівняно з витратами на видалення вільної вологи) необхідні під час сушіння макаронних виробів та зернових культур ($=0,3 \dots 0,5$). Середню групу сировини з величиною $=0,2 \dots 0,29$ представляють більшість овочів та деякі крупи, причому для картоплі додаткові витрати енергії найбільші ($Q_b^* = 0,3$). Найменші відносні енерговитрати характерні для фруктів ($=0,10 \dots 0,19$).

У четвертому розділі “Кінетичні рівняння сполучених явищ перенесення для процесу сушіння харчової сировини” запропоновано підхід до складання системи рівнянь кінетики процесів перенесення, заснований на законі збереження фізичної субстанції в інтегральній формі.

Рівняння кінетики перенесення i -ї субстанції для середніх за об’ємом значень має наступний вигляд:

$$\frac{d\bar{\Psi}^i}{d\tau} = \dots \quad (11)$$

де $\bar{\Psi}^i$ — середня концентрація фізичної субстанції (маси, енергії, імпульсу);

τ — поточний час;

\bar{j}_{Ψ}^i — середня густина дифузійного (молекулярного) потоку субстанції;

v_v^i — середня швидкість конвективного (молярного) потоку субстанції;

\bar{I}_{Ψ}^i — середня об’ємна потужність внутрішніх джерел, стоків субстанції;

R_V — відношення об’єму тіла до його площі поверхні.

$$\dots \quad (12)$$

$$\dots \quad (13)$$

де $\bar{\Psi}^i$ — рівноважне значення субстанції при $\tau \rightarrow \infty$;

$i, j = 1 \dots n, n$ — число фізичних параметрів стану вологого тіла;

— коефіцієнт опору для потоку i -ї субстанції, викликаного j -м потенціалом перенесення;

— коефіцієнт потенціалопровідності;

— коефіцієнт потенціалообміну.

Для отримання системи кінетичних рівнянь було застосовано наступні спрощення та допущення, які забезпечують фізично коректний та експериментально адекватний опис кінетики: коефіцієнти перенесення та фізичні характеристики вважаються сталими в процесі сушіння, якщо параметри сушильного агента не змінні; ефект динамічного структурування вологи враховується як внутрішнє джерело (стік) форм зв’язку вологи; у рівнянні теплоперенесення враховується середня енергія зв’язку вологи; приймається реологічна модель пружно-в’язкого тіла в рівняннях перенесення імпульсу; враховується мінімальна кількість рушійних сил у рівнянні (12).

На підставі цього було отримано систему диференціальних рівнянь кінетики сполучених

процесів перенесення під час сушіння харчової сировини:

$$; \quad (14)$$

$$; \quad (15)$$

$$; \quad (16)$$

$$; \quad (17)$$

$$, \quad (18)$$

де Ra — критерій Рамзіна, Ko — критерій Косовіча.

У рівняннях (17, 18) використані безрозмірні нормовані змінні: μ — вологовміст вільної та зв'язаної води; T — температура; P — тиск; ϵ — відносна деформація. Кінетичні коефіцієнти перенесення мають розмірність s^{-1} . Вони обернено пропорційні коефіцієнту опору (13), а тому безпосередньо пов'язані із середніми значеннями тепломасообмінних і структурно-механічних характеристик харчової сировини.

Знайдено в наближенні малого параметра аналітичні рішення отриманої системи для випадків низько- та високотемпературного сушіння, ЗТП-сушіння. Зокрема для низькотемпературного сушіння отримано наступні рівняння, що описують кінетику вільної води (19), зв'язаної води (20), температури (21), деформації (22), механічних напружень (23):

$$; \quad (19)$$

$$; \quad (20)$$

$$; \quad (21)$$

$$; \quad (22)$$

$$, \quad (23)$$

де сталі виражені через кінетичні коефіцієнти перенесення та початкові частки вільної та зв'язаної води.

Саме тому отримані рівняння дозволяють аналізувати фізику впливу зовнішніх та внутрішніх чинників на кінетику процесу харчової сировини. Зокрема вперше отримано рівняння, що дозволяють розраховувати не лише тривалість процесу низькотемпературного конвективного сушіння (24), але й критичний вологовміст, за якого кількість вільної води дорівнює кількості зв'язаної води (25), максимальну відносну деформацію (26) і максимальні механічні напруження (27), що спричинені зсіданням у процесі сушіння:

$$; \quad (24)$$

$$; \quad (25)$$

$$; \quad (26)$$

$$. \quad (27)$$

Доведено, що для зниження тривалості сушіння необхідно використовувати такі технологічні прийоми та режими, які, у першу чергу, призводять до зменшення коефіцієнта динамічного структурування води k .

Для основних способів конвективного сушіння встановлено характер впливу коефіцієнтів перенесення та фізичних характеристик на максимальні значення температури, деформації, меха-

нічних напружень, надлишкового тиску парогозової суміші у сировині. Знайдено умови отримання сушеної продукції без зсідання в процесі високотемпературного сушіння.

У п'ятому розділі “Використання кінетичних рівнянь для аналізу процесу сушіння харчової сировини” здійснено експериментальну перевірку рівнянь, що описують кінетику сполучених явищ перенесення в процесі сушіння. Показано, що похибка запропонованих кінетичних рівнянь для опису експериментальних даних становить 5...10%. У результаті аналізу численних експериментальних даних одержано кореляцію між кінетичними коефіцієнтами та параметрами сушильного агента: температурою, швидкістю руху, вологістю. Таким чином, доведено можливість використання кінетичних рівнянь для знаходження коефіцієнтів внутрішнього та зовнішнього перенесення, тепломасообмінних та структурно-механічних характеристик харчової сировини та впливу на них технологічних режимів сушіння. Розроблено відповідний алгоритм аналізу кінетичних даних та створено програми для автоматизації їх статистичної обробки.

Проведений аналіз експериментальних даних дозволив уперше за даними кінетики вологовмісту одночасно отримати дані про змінювання структури вологи. На рис. 5 наведено дані про змінювання вмісту зв'язаної вологи в процесі конвективного сушіння картоплі. На рис. 6 - порівняння цих даних та даних, отриманих методом ЯМР, які узгоджуються між собою.

Характер цих залежностей підтверджує особливості структури вологи в картоплі, а саме необхідність більших відносних витрат енергії на сушіння порівняно з іншими овочами. Як видно з рис. 5 вміст зв'язаної вологи в процесі сушіння картоплі змінюється дуже повільно, що і пояснює більшу тривалість сушіння та додаткові енерговитрати.

Рис. 5. Зміна вмісту зв'язаної вологи в процесі сушіння картоплі за різної температури сушильного агента: 1 - 45°C; 2 - 65°C; 3 - 85°C; 4 - 105°C; 5 - 110°C; 6 - 130°C; 7 - 150°C; ----- лінія критичного вологовмісту

Рис. 6. Розрахункові (—) та експериментальні дані (×, o) вмісту зв'язаної вологи в процесі конвективного сушіння картоплі залежно від температури та вологості: 1 - $w=40\%$; 2 - $w=20\%$

Встановлено, що коефіцієнт дифузії зв'язаної вологи зростає з температурою сильніше, ніж коефіцієнт дифузії вільної вологи, що, очевидно, викликано збільшенням рухливості молекул, обмежених силовою взаємодією з дисперсною фазою. Тому за високих температур сушіння вся волога поводить себе як вільна (рис. 7), що є проявою зазначеного вище ефекту динамічного структуру-

вання вологи.

Для температурної залежності коефіцієнтів дифузії вільної та зв'язаної вологи овочів знайдено наступну апроксимацію:

$$D = D_0 \exp(n(T - T_0)) \quad (28)$$

де D_0 — коефіцієнт дифузії за температури $T_0=293$ К, $\text{м}^2/\text{с}$;

n — безрозмірний емпіричний коефіцієнт.

Параметри рівняння (28) наведено у табл. 1. Встановлено, що величина коефіцієнта динамічного структурування вологи, який показує інтенсивність перетворення форм зв'язку вологи у процесі конвективного сушіння залежить лише від температури сушильного агента та майже не залежить від виду рослинної сировини (рис. 8), що викликано близькими структурно-енергетичними характеристиками досліджуваних овочів:

$$D = D_0 \exp(n(T - T_0)) \quad (29)$$

Рис. 7. Коефіцієнти дифузії вільної (1) і зв'язаної (2) вологи в моркві (а), буряку (б), цибулі (в) за різної температури сушильного агента

Таблиця 1

Параметри рівняння температурної залежності коефіцієнта дифузії
вільної та зв'язаної вологи в овочах

Сировина	Температура сушильного агента, °С	Вільна волога		Зв'язана волога	
		, м ² /с	<i>n</i>	, м ² /с	<i>n</i>
Картопля	40.....120	$6,53 \cdot 10^{-11}$	10,9	$2,79 \cdot 10^{-11}$	13,4
	120.....160	$2,79 \cdot 10^{-11}$	13,4	-	-
Морква	70.....130	$7,79 \cdot 10^{-10}$	5,47	$3,52 \cdot 10^{-10}$	7,77
	130.....160	$3,52 \cdot 10^{-10}$	7,77	-	-
Буряк	70.....130	$9,34 \cdot 10^{-10}$	4,54	$3,62 \cdot 10^{-10}$	7,23
	130.....160	$3,62 \cdot 10^{-10}$	7,23	-	-
Цибуля	70.....120	$1,04 \cdot 10^{-10}$	6,41	$4,54 \cdot 10^{-11}$	8,77
	120.....160	$4,54 \cdot 10^{-11}$	8,77	-	-

Знайдено, що коефіцієнт конвективної фільтраційної дифузії (30) зростає з температурою сушильного агента внаслідок збільшення середнього радіуса капілярів у процесі високотемпературного нагрівання та пов'язаного з цим “набрякання” сировини:

$$, \quad (30)$$

де

— коефіцієнт конвективної фільтраційної дифузії вологи за температури $T_k=373$ К, м²/с;

— безрозмірні емпіричні коефіцієнти.

Параметри рівняння (30) наведено у табл. 2.

Показано, що аналіз кінетики температури дозволяє визначити середню питому енергію зв'язку та середні теплофізичні характеристики харчової сировини в процесі сушіння.

Отримані результати наведено в табл. 3. Вони добре корелюють з даними експериментальних теплофізичних вимірювань, що підтверджує адекватність запропонованої наукової концепції.

Рис. 8. Вплив температури сушіння овочів на величину коефіцієнта структурної зміни вологи: 1 - картопля; 2 - морква; 3 - буряк, 4 - цибуля

Таблиця 2

Параметри рівняння температурної залежності коефіцієнта конвективної фільтраційної дифузії вологи в овочах

Сировина	D_p , м ² /с	A_p	m
Картопля	$1,49 \cdot 10^{-5}$	13,37	0,89
Морква	$6,46 \cdot 10^{-5}$	0,67	0,61
Буряк	$5,17 \cdot 10^{-5}$	2,47	0,73
Цибуля	$8,06 \cdot 10^{-6}$	4,60	0,85

Таблиця 3

Середні теплофізичні характеристики деяких овочів у процесі сушіння

Сировина	Коефіцієнт теплопровідності , Вт/м·К		Середня питома теплоємність c_T , Дж/кг·К	Середня питома енергія зв'язку, кДж/кг
	A_λ	m		
Картопля	0,30	3,45	3313	68
Морква	0,41	1,77	3568	23
Буряк	0,29	3,49	3526	72

Знайдені залежності дозволяють системно аналізувати технологічні режими сушіння через встановлений зв'язок між параметрами сушильного агента та середніми значеннями коефіцієнтів перенесення та фізичних характеристик сировини з метою вибору раціональних варіантів їх проведення.

У шостому розділі “Раціональні режими сушіння харчової сировини” запропоновано концепцію оптимального керування кінетикою сушіння харчової сировини, яка полягає у цілеспрямованому змінюванні процесних і технологічних чинників з метою підвищення якості готової

продукції та зниження енерговитрат. Проаналізовано три найбільш важливих критерії вибору раціональних режимів сушіння: обмеження за втратами біологічно активних речовин, обмеження за максимальними механічними напруженнями, обмеження за енерговитратами.

В основу кінетичної моделі прогнозування якості харчової сировини в процесі сушіння було покладено допущення про те, що реакції з біологічно активними речовинами описуються рівнянням бімолекулярної реакції з константою в класичному максвелівському наближенні. Для кінетики відносної концентрації корисного компонента α отримано наступний вираз:

$$\frac{d\alpha}{dt} = -k_{\alpha\beta} \alpha \beta, \quad (31)$$

де α — безрозмірна середня за об'ємом концентрація компонента α ;

α — поточна концентрація компонента α , м⁻³;

α_0 — концентрації компонента α в початковий момент часу, м⁻³;

$k_{\alpha\beta}$ — частотний фактор константи бімолекулярної реакції для початкової температури сировини T_0 , м³/с;

$n_{\alpha 0}$ — концентрація вологи в сировині в початковий момент часу, м⁻³;

A_{β} — безрозмірна відносна кількість молекул компонента β в початковий момент часу;

ω — безрозмірний поточний вологовміст;

T — середня поточна температура сировини, К;

$E_{\alpha\beta}$ — питома енергія активації реакції між компонентами α та β , Дж/моль.

Згідно з (31) кінетика хімічних реакцій визначається константою відповідної реакції та кінетикою сушіння, яка, у свою чергу, визначається режимом сушіння. Встановлено, що характер змінювання залишкової концентрації корисної речовини (тобто її концентрації наприкінці сушіння) із змінюванням температури сушіння може розвиватися за наступними варіантами. Для низькоінтенсивних процесів зі збільшенням температури сушіння втрати корисних речовин будуть зростати. Для високоінтенсивних процесів з підвищенням температури втрати будуть знижуватися, якщо виконується нерівність (32), що можливо для реакцій з не дуже великою енергією активації та в певному діапазоні температур

$$\frac{E_{\alpha\beta}}{RT^2} > \frac{d\alpha}{\alpha dt}, \quad (32)$$

де

T — безрозмірна температура сировини;

T_0 — початкова температура сировини, К;

— безрозмірний фактор Больцмана для енергії активації реакції;

m — безрозмірний показник ступеня температурної залежності кінетичного коефіцієнта дифузії вологи.

Хімічні реакції з високою енергією активації для будь-якого процесу теплового сушіння завжди будуть відбуватися зі збільшенням втрат корисних речовин з підвищенням температури сушильного агента.

Зазначене дозволяє знаходити оптимальні режими сушіння, у першу чергу, овочів та фруктів, які містять низку корисних речовин, шляхом аналітичного моделювання заданого способу сушіння з метою мінімізації втрат біологічно активних речовин.

На рис. 9, 10 наведено області існування оптимальних режимів, за яких залишкова концентрація корисного компонента максимальна в процесі високоінтенсивних способів сушіння: ЗТП-сушіння, сушіння в киплячому шарі. Втрати вітамінів при цьому не перевищують 10...15% замість 40...60% за умов традиційних низькоінтенсивних способів сушіння: в щільному шарі, стрічкове.

Для низькоінтенсивних процесів сушіння, які на сьогоднішній день залишаються основними в харчовій промисловості, розроблено алгоритм оптимального багатоступеневого сушіння зі зміною температури сушильного агента, коли на першому етапі застосовується високотемпературний сушильний агент, а на другому сушіння при помірних температурах (рис. 11). Показано, що під час оптимального режиму зміни температури за вологовмістом між першим і другим етапом втрати речовин на 5...10% нижче, ніж під час використання одноступеневих режимів.

Рис. 9. Залишкова концентрація корисного компонента в продукті залежно від температури ЗТП-сушіння та енергії активації хімічних реакцій

Рис. 10. Залишкова концентрація корисного компонента в продукті залежно від температури та енергії активації хімічних реакцій під час сушіння в киплячому шарі ($Re=600$)

У табл. 4 наведено розроблені раціональні режими сушіння для деяких видів харчової сировини.

Розроблено раціональні режими сушіння за критерієм обмеження за максимальними механічними напруженнями для виробництва макаронних виробів. Встановлено, що найбільш економічними є двоступеневі режими сушіння макаронних виробів, за яких сушіння на першому етапі

відбувається за “жорстких” режимів прямоструменевого сушіння до вологовмісту $w=32...35\%$, за температури $55...60^\circ\text{C}$ та $\varphi=0,55...0,6$, а потім у режимі рециркуляції з $t_\infty=55...60^\circ\text{C}$ та $\varphi=0,6...0,7$. Такі режими дозволяють в 1,5...2 рази скоротити тривалість процесу сушіння без втрати якості макаронних виробів через розтріскування.

Рис. 11. Моделювання зміни залишкової концентрації біологічно активних речовин у процесі низькоінтенсивного сушіння овочів: а) - схема двоступеневого режиму; б) - залишкова концентрація корисного компонента під час варіації режимних параметрів w_2^* , $t_{\infty 2}$ і постійних значень $Re=150$, $=10$, де 1 - температура сушильного агента, 2 - температура матеріалу; 3 - область оптимального двоступеневого режиму

Розроблено раціональні режими сушіння за критерієм обмеження енерговитрат. Отримано рівняння для закону оптимальної зміни швидкості сушильного агента, що забезпечує задану кінетику температури та вологовмісту сировини та компенсує тепловтрати. Енергетична ефективність порівняно з режимом сушіння за умов постійної витрати сушильного агента розраховується за формулою:

(33)

де q^* — безрозмірний коефіцієнт зниження енерговитрат на процес сушіння зі змінною витратою повітря;

τ_c — тривалість процесу сушіння, с;

v_∞ — постійна швидкість сушильного агента, м/с;

$v_\infty(\tau)$ — змінна швидкість сушильного агента, м/с.

Таблиця 4

Рациональні режими сушіння овочів за критерієм обмеження втрат біологічно активних речовин

Фактор Больцмана для енергії активації хімічної реакції	Високоінтенсивне сушіння		Низькоінтенсивне сушіння Re=100...200	
	ЗТП-сушіння	Сушіння в киплячому шарі Re=2000...3000	Перший етап:	
			$t_\infty = 100^\circ\text{C}$	
			Другий етап:	
=12...13 (морква, буряк, гарбуз)	$t_\infty = 75...80^\circ\text{C}$	$t_\infty = 125...130^\circ\text{C}$	=0,8...0,82	$t_\infty = 65...70^\circ\text{C}$
=14...15	$t_\infty = 70...75^\circ\text{C}$	$t_\infty = 120...125^\circ\text{C}$	=0,83...0,85	$t_\infty = 50...55^\circ\text{C}$

(картопля)				
------------	--	--	--	--

Показано, що найбільш економічним технічним рішенням є використання асинхронних електродвигунів, які мають дві стандартні частоти обертання зі співвідношенням 1:2. Розраховано оптимальний момент зниження швидкості обертання електродвигуна, коли енерговитрати на процес сушіння знижуються на 10...40% (рис. 12).

На основі запропонованих критеріїв вибору раціональних режимів було розроблено універсальні алгоритми оптимального керування процесом сушіння харчової сировини у двох модифікаціях. Оптимальне керування кінетикою сушіння — алгоритм, що забезпечує виконання заданого критерію оптимізації на основі рівнянь, які зв'язують зміну кінетичних коефіцієнтів з параметрами сушильного агента. Адаптивне-оптимальне керування — алгоритм, що відрізняється наявністю адаптивного блоку, який корегує кінетичні коефіцієнти за луною системи “сушильна установка-сировина” на зовнішнє збурення.

Рис. 12. Ефект енергозбереження під час використання двоступеневого режиму сушіння залежно від тривалості сушіння за постійної витрати сушильного агента: 1 — $Re=100$; 2 — $Re=150$; 3 — $Re=200$; 4 — $Re=250$

У цьому розділі “Розвиток методів інженерних розрахунків сушильних установок” описано вдосконалену методику теплового розрахунку, що враховує кінетику вільної та зв'язаної вологи і дозволяє точніше проводити розрахунок остаточних енерговитрат на процес:

$$, \quad (34)$$

де Q — потужність калорифера, Вт;

c_a — теплоємність вологого повітря, Дж/кг·К;

$t_{\infty 0}, t_{\infty}$ — температура на вході та виході з калорифера, °С;

L_m — масова витрата сушильного агента на сушіння, кг/с;

S_{Σ} — загальна площа випаровування сировини, м²;

$Q_{\text{пот}}$ — загальна потужність теплових втрат, Вт.

Розроблено методику гідродинамічного розрахунку, засновану на чисельному моделюванні поля швидкостей сушильного агента в об'ємі конвективної сушарки. Зокрема, під час проектування рециркуляційних сушарок камерного типу вирішено питання про одержання найкращої рівномір-

ності сушіння у всіх лотках із сировиною (рис. 13). На основі моделювання форми та розмірів бічної стінки сушарки (рис. 14), профілю входної швидкості в сушильну камеру, відстані між лотками розраховувався коефіцієнт нерівномірності поля швидкостей сушильного агента, що дозволило визначити оптимальну геометрію вентиляційного тракту за показниками рівномірності нагрівання та металоємності конструкції.

Створено комплекс програмного забезпечення для автоматизації інженерних розрахунків сушарок.

Рис. 14. Схема розрахунку сушарки з рециркуляцією: 1 — вентилятор; 2 — калорифер; 3 — лотки з сировиною

У **восьмому розділі** “Практична реалізація науково-технічних розробок” показано, що економічні переваги запропонованого аналітичного підходу до проектно-конструкторських і технологічних розробок порівняно із традиційним емпірично-аналітичним підходом полягають в істотному зниженні строків розробок і фінансових витрат. Крім того, на сьогоднішній день це єдиний можливий спосіб підвищити ефективність роботи вже існуючого сушильного устаткування за рахунок кінетичної оптимізації технологічних режимів.

Упроваджено у виробництво комплекс програм для автоматизації наукових і інженерних розрахунків тепломасообмінного устаткування. Розроблено та впроваджено у виробництво серію нових сушильних та копильних установок камерного типу з продуктивністю від 20 до 200 кг/год сировини. Відмінною рисою цього устаткування є потужна аеродинамічна система з оптимальною конфігурацією вентиляційних каналів, можливість регулювання вологості середовища, електронний блок керування, модульно-збірна конструкція корпусу. Це дозволяє використовувати сушильні установки в широкому діапазоні технологічних режимів від прямотрумененого сушіння до термовологісної обробки.

Рис. 15. Відносна швидкість на осі міжлоткового простору по висоті сушильної камери за різних кутів нахилу бічної стінки

Копильні камери для гарячого та холодного копчення продуктів обладнані димогенератором із системою очищення диму. Камери для гарячого копчення мають електричний парогенератор

для варіння виробів. Усі розроблені установки керуються універсальним електронним блоком, що реалізує, в тому числі, розроблені двоступеневі технологічні режими.

Проведено випробування та впровадження у виробництво проектно-технічної документації, технологій і устаткування. Визначено перспективні напрямки розвитку методів оптимального керування процесами сушіння для різноманітного асортименту харчової сировини.

ВИСНОВКИ

1. Аналізом літературних джерел встановлено, що актуальною проблемою є пошук нових методів вирішення комплексу задач теорії сполучених явищ перенесення, які дозволяють оптимізувати процес сушіння за енерговитратами, прогнозувати якість продукції та знизити собівартість процесу розробки нових технологій і устаткування. Відсутність єдиної фізичної моделі харчової сировини для статистики, динаміки та кінетики сушіння є науковою суттю зазначеної проблеми. Показано, що основою такої моделі може бути найбільш характерна структурна особливість колоїдних капілярно-пористих тіл — наявність двох істотно різних структур вологи — вільної та зв'язаної.

2. Показано, що у межах молекулярно-кінетичних уявлень вологу в гетерогенних системах можна розглядати як систему слабо взаємодіючих частинок, що перебувають у полі сил Ван-дер-Ваальса. При цьому молекулярно-кінетична границя поділу молекул на “вільні” і “зв'язані” визначається із рівності їх потенційної та кінетичної енергії, а їх кількісне співвідношення обчислюється за розподілом Максвела-Больцмана.

3. Розроблено молекулярно-кінетичну модель процесів сорбції-десорбції вологи, на основі якої виведено рівняння ізотерм колоїдного капілярно-пористого тіла, що враховує структури вологи, її енергію зв'язку та диференціальну функцію розподілу капілярів за радіусами. Експериментальною перевіркою підтверджено адекватність моделі, що описує експериментальні ізотерми з похибкою 4...8%. Запропоновано класифікацію харчової сировини як об'єкта сушіння за структурно-енергетичним параметром, що являє собою відношення середніх витрат енергії на видалення зв'язаної вологи до витрат на видалення вільної вологи та враховує особливості капілярно-пористої структури сировини.

4. Теоретично обґрунтовано та експериментально підтверджено ефект динамічного структурування вологи, що полягає у зміні кількісного співвідношення між вільною і зв'язаною вологою, яку викликають сполучені процеси перенесення. Показано, що зсідання та зниження температури сировини призводить до збільшення частини зв'язаної вологи, а набрякання та збільшення температури — до зростання частини вільної вологи. Запроваджено коефіцієнт динамічного структурування вологи, який вказує на відносну кількість молекул, що змінюють свій енергетичний стан в одиницю часу.

5. Розроблено підхід до складання системи диференціальних рівнянь кінетики сполучених процесів перенесення, заснований на законі збереження фізичної субстанції в інтегральній формі, принципі суперпозиції для експериментально значимих потоків і феноменологічних співвідношень між густиною потоку та потенціалом перенесення. Отримано систему диференціальних рівнянь кінетики сполучених процесів перенесення маси, енергії та імпульсу для колоїдного капілярно-пористого тіла, засновану на гетероенергетичній моделі структури вологи та реологічній моделі пружно-в'язкого тіла. Знайдено її аналітичне рішення та отримано рівняння для визначення кінетики вільної, зв'язаної вологи, температури, деформації та механічних напружень, тиску парогазової суміші.

6. Експериментальною перевіркою підтверджено адекватність рівнянь, що описують кінетику сполучених явищ перенесення в процесі сушіння харчової сировини з похибкою 5...10%. На підставі аналізу експериментальних даних отримано аналітичні залежності, що пов'язують коефіцієнти перенесення маси, енергії, імпульсу, тепломасообмінні, структурно-механічні характеристики харчової сировини та параметри сушильного агента, що дозволяє аналізувати та керувати кінетикою сушіння .

7. Розроблено концепцію оптимального керування кінетикою сушіння харчової сировини, що полягає у виборі параметрів сушильного агента, які забезпечують мінімізацію однієї з трьох цільових функцій: обмеження за втратами біологічно активних речовин, обмеження за максимальними механічними напруженнями, обмеження за енерговитратами. Отримано аналітичні рівняння, що дозволяють розраховувати змінювання концентрації біологічно активних речовин за відомою кінетикою тепло-масообмінних процесів. Визначено оптимальні багатоступеневі режими для низькоінтенсивних та високоінтенсивних способів сушіння харчової сировини.

8. Розроблено методики, що підвищують точність інженерних розрахунків під час проектування сушильного устаткування: теплового розрахунку сушильних установок, яка враховує кінетику вільної та зв'язаної вологи; гідродинамічного розрахунку, яка враховує розподіл швидкостей потоку в об'ємі сушарки.

9. Створено комплекс програмного забезпечення для обробки експериментальних даних ізотерм сорбції-десорбції, кінетики вологовмісту, температури, тиску, деформації в процесі сушіння, автоматизації розрахунку матеріального балансу сушильних установок на основі електронної I-d діаграми, автоматизації теплового та гідродинамічного розрахунків конвективних сушильних установок різних типів.

10. Розроблено конструкції високоефективного устаткування для сушіння, копчення та гідротермічної обробки харчової сировини. Створено та випробувано дослідно-промислові зразки цього устаткування та розпочато їх серійне виробництво на машинобудівних підприємствах. Здійснено заходи щодо упровадження раціональних режимів сушіння у вигляді норматив-

но-технічної документації на нові види сушеної продукції. Проведено апробацію виконаних досліджень на науково-практичних конференціях, промислових підприємствах, виставках-ярмарках.

11. Показано, що економічний ефект від впровадження оптимальних за енергозбереженням режимів сушіння складає 31,7 тис. грн для лінії з виробництва макаронних виробів продуктивністю 160 кг/год. Під час сушіння овочів за раціональними режимами втрати вітамінів знижуються на 20...30% у високоінтенсивних способах сушіння та на 5...10% у низькоінтенсивних порівняно з традиційними режимами сушіння.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Погожих Н.И., Потапов В.А. Рациональные режимы и условия процесса СТП-сушки овощей// Новые технологии пищевых производств и актуальные проблемы развития торговли и общественного питания: Сб. научн. тр. - Харьков: ХГАТОП, 1995. - С. 228-230.

2. Погожих Н.И., Потапов В.А., Сомов А.С. Экспериментальная установка для моделирования процесса СТП-сушки// Новые технологии пищевых производств и актуальные проблемы развития торговли и общественного питания: Сб. научн. тр. – Харьков: ХГАТОП, 1995. - С. 268-269.

3. Черевко А.И., Погожих Н.И., Потапов В.А., Иващенко С.С. Влияние степени заполнения функциональных емкостей на производительность процесса СТП- сушки// Актуальні науково-методичні проблеми в підготовці спеціалістів вищої кваліфікацій для торгівлі і харчування: Зб. наук. пр. - Харків: ХДАТОХ, 1997. - Ч.1. - С. 157-161.

4. Погожих Н.И., Цуркан Н.М., Потапов В.А. Исследование процесса сушки материалов смешанным теплоподводом вблизи критических режимов// Актуальні науково-методичні проблеми в підготовці спеціалістів вищої кваліфікації для торгівлі і харчування: Зб. наук. пр. - Харків: ХДАТОХ, 1997. - Ч.1. - С. 343-346.

5. Потапов В.А. Кинетическое уравнение сушки с учетом неизотермической массопроводности// Актуальні науково-методичні проблеми в підготовці спеціалістів вищої кваліфікацій для торгівлі і харчування: Зб. наук. пр. - Харків: ХДАТОХ, 1997. - Ч.1. - С. 353-355.

6. Погожих Н.И., Сомов А.С., Потапов В.А. Новая технология сушки пищевых продуктов// Придніпровський науковий вісник. Сер. Машинобудування. - Дніпропетровськ: Наука і освіта, 1997. - С. 1-3.

7. Черевко А.И., Погожих Н.И., Потапов В.А., Иващенко С.С. Новая технология сушки пищевых продуктов// Питание и общество. - 1997. - №3. - С. 33-35.

8. Потапов В.О. Метод визначення параметрів суттєво нелінійних емпіричних залежностей// Прогресивні ресурсозберігаючі технології та їх економічна обґрунтованість у підприємствах харчування. Економічні проблеми торгівлі: Зб. наук. пр. - Харків: ХДАТОХ, 1998 - Ч.1. - С. 84-87.

9. Погожих Н.И., Потапов В.А., Цуркан Н.М. Анализ кинетики СТП-сушки при переменных режимах// Прогресивні ресурсозберігаючі технології та їх економічна обґрунтованість у підприємствах харчування. Економічні проблеми торгівлі: Зб. наук. пр. - Харків: ХДАТОХ, 1998. - Ч.1. - С. 117-120.
10. Погожих Н.И., Сомов А.С., Потапов В.А. Распределение статического давления на поверхности функциональной емкости// Прогресивні ресурсозберігаючі технології та їх економічна обґрунтованість у підприємствах харчування. Економічні проблеми торгівлі: Зб. наук. пр. - Харків: ХДАТОХ, 1998. - Ч.1. - С. 140-143.
11. Цуркан Н.М., Погожих Н.И., Потапов В.А. Влияние степени заполнения функциональных емкостей на кинетику СТП-сушки// Нові технологи та удосконалення процесів харчових виробництв: Зб. наук. пр. - Харків: ХДАТОХ, 1999. - С. 171-174.
12. Потапов В.А. О влиянии молярного переноса на кинетику сушки капиллярно-пористых материалов// Нові технології та удосконалення процесів харчових виробництв: Зб. наук. праць - Харків: ХДАТОХ, 1999. - С. 162-168.
13. Цуркан Н.М., Погожих Н.И., Потапов В.А. Экспериментальный метод определения эффективных теплообменных характеристик капиллярно-пористых тел// Технологии в машиностроении: Вестник ХГПУ. - Харьков: ХГПУ, 2000. - Вып. 89. - С. 57-60.
14. Погожих Н.И., Сомов А.С., Потапов В.А. Гидравлические характеристики канала сушильного агента для СТП-сушки// Прогресивні технології та удосконалення процесів харчових виробництв: Зб. наук. пр. - Харків: ХДАТОХ, 2000. - Ч.2. - С. 185-190.
15. Потапов В.А. Феноменологическая система уравнений кинетики сушки капиллярно-пористых коллоидных материалов//Прогресивні технології та удосконалення процесів харчових виробництв: Зб. наук. пр. - Харків: ХДАТОХ, 2000. - Ч.2. - С. 49-53.
16. Погожих Н.И., Цуркан Н.М., Потапов В.А. Влияние размеров функциональной емкости на продолжительность СТП-сушки// Прогресивні технології та удосконалення процесів харчових виробництв: Зб. наук. пр. - Харків: ХДАТОХ, 2000. - Ч.2. - С. 134-137.
17. Гришин М.О., Погожих М.І., Потапов В.О. Модель процесу сушіння змішаним теплопідводом// Наукові праці ОДАХТ. - Одеса, 2001. - Вип. 22. - С. 17-20.
18. Гришин М.А., Погожих Н.И., Потапов В.А. Эффект динамического структурирования влаги в процессе сушки //Промышленная теплотехника. - 2001. - Т.23. - №4-5. - С. 100-105.
19. Потапов В.А. Модель влияния форм связи влаги на кинетику сушки// Прогресивні ресурсозберігаючі технології та їх економічне обґрунтування у підприємствах харчування. Економічні проблеми торгівлі: Зб. наук. пр. - Харків: ХДАТОХ, 2001 - Ч.1. - С. 309-317.
20. Потапов В.А., Цуркан Н.М., Рябик Л.Р. Экспериментальное определение кинетических коэффициентов при конвективной сушке картофеля// Прогресивні ресурсозберігаючі технології та

їх економічне обґрунтування у підприємствах харчування. Економічні проблеми торгівлі: Зб. наук. пр. – Харків: ХДАТОХ, 2001. – Ч.1. - С. 299-305.

21. Потапов В.О. Взаємозв'язок стану вологи і деформації в процесі сушіння колоїдних капілярно-пористих тіл// Прогресивні ресурсозберігаючі технології та їх економічне обґрунтування у підприємствах харчування. Економічні проблеми торгівлі: Зб. наук. пр. – Харків: ХДАТОХ, 2002. – Ч.1. - С. 186-192.

22. Потапов В.А. Особенности нелинейной регрессии при моделировании кинетики сушки// Геометричне та комп'ютерне моделювання: Зб. наук. пр. – Харків: ХДАТОХ, 2002. - С. 125-129.

23. Потапов В.А. Система линейных дифференциальных уравнений кинетики свободной и связанной влаги в процессе сушки коллоидных капиллярно-пористых тел// Вісник ХДТУСГ “Сучасні напрямки технології та механізації процесів переробних і харчових виробництв”. - Вип. 16. - Харків, 2003. - С. 54-58.

24. Потапов В.А., Погожих Н.И. Модель поведения влаги в процессах сушки// Промышленная теплотехника. - 2003. - Т.25. - №4 - С. 423-425.

25. Потапов В.О., Погожих М.І. Молекулярно-кінетичний метод аналізу кінетики сушіння колоїдних капілярно-пороватих матеріалів// Наукові праці ОНАХТ. – Одеса, 2003. - Вип. 26. - С. 270-274.

26. Потапов В.О. Вплив форм зв'язку вологи на кінетику високоінтенсивних процесів сушіння// Прогресивні ресурсозберігаючі технології та їх економічне обґрунтування у підприємствах харчування: Зб. наук. пр. - Харків: ХДУХТ, 2003. - Ч.1. - С. 487-493.

27. Потапов В.А., Погожих Н.И. Молекулярно-кинетическая модель процессов сорбции-десорбции коллоидных капиллярно-пористых материалов// Східно-Європейський журнал передових технологій. - 2004. - №2(8). - С. 42-45.

28. Михайлов В.М., Синєкоп М.С., Потапов В.О., Ляшенко Б.В. Розробка методики та програмного комплексу для визначення теплового стану кулінарних виробів// Східно-Європейський журнал передових технологій. - 2004. - №2(8). - С. 30-32.

29. Потапов В.О. Методика чисельного моделювання гідродинамічних і теплових полів у робочому об'ємі конвективних сушарок// Прогресивні ресурсозберігаючі технології та їх економічне обґрунтування у підприємствах харчування. Економічні проблеми торгівлі: Зб.наук. пр. - Харків, ХДУХТ, 2004. - Ч.1. - С. 536-545.

30. Потапов В.О., Погожих М.І. Кінетичний метод прогнозування якості харчової сировини в процесах сушіння і збереження// Вісник ХНТУСГ імені Петра Василенка: - Харків: ХНТУСГ, 2004. - Вип. 26. - Т.2. - С. 63 -69.

31. Погожих Н.И., Пак А.О., Потапов В.А. Способ определения свободной и связанной влаги пищевых материалов// Науковий вісник Полтавського університету споживчої кооперації України. Сер.: Технічні науки. - Полтава: ПУСКУ, 2004. - Вип.4. - № 2(13). - С. 44-48.
32. Потапов В.А. Гетероэнергетическая модель тепломассопереноса в процессах сушки// Науковий вісник Полтавського університету споживчої кооперації України. Сер.: Технічні науки. - Полтава: ПУСКУ, 2004. - Вип.4. - № 2(13). - С. 62-71.
33. Потапов В.О. Кінетична модель зсідання і механічних напружень у процесі сушіння харчової сировини// Обладнання та технології харчових виробництв: Темат. зб. наук. пр. – Донецьк: ДонДУЕТ, 2005. - Вип.13. - Т.2. - С. 190-198.
34. Потапов В.О. Структурно-енергетичний метод аналізу ізотерм сорбції-десорбції харчової сировини// Прогресивні техніка та технології харчових виробництв, ресторанного господарства та торгівлі: Зб. наук. пр. - Харків: ХДУХТ, 2005. - Вип.1. - С. 313 -322.
35. Потапов В.О. Методика визначення масобмінних характеристик харчової сировини на основі структурно-енергетичної моделі кінетики сушіння// Прогресивні техніка та технології харчових виробництв ресторанного господарства і торгівлі: Зб.наук. пр. - Харків, ХДУХТ, 2006. - Вип.1. - С. 318 -327.
36. Потапов В.О. Рациональні режими і принципи оптимального управління процесом сушіння харчової сировини// Обладнання та технології харчових виробництв: Темат. зб. наук. пр. – Донецьк: ДонДУЕТ, 2006. - Вип. 5. - Т.2. - С. 141-148.
37. Потапов В.А., Погожих Н.И. Система уравнений кинетики переноса процесса сушки коллоидных капиллярно-пористых тел// Промышленная теплотехника.- 2006. - Т.28. - №3 - С. 423-425
38. Пат. 2096962 РФ, МКИ⁶ А 23 В 7/03. Способ сушки пищевых продуктов. / Н.И. Погожих, В.А. Потапов, Н.М. Цуркан (Украина). - № 94033280/13; Заявл. 13.09.94; Опубл. 27.11.97, Бюл. №33. - 4 с.
39. Декларацийний патент Україна МПК⁷ А23 В 7/03. Способ сушіння харчових продуктів / М.І. Погожих, В.О. Потапов, Є.М. Якушенко (Україна).- №2003119857; Заявл. 04.11.2003; Опубл. 15.07.2004, Бюл. №7. – 3 с.
40. Гришин М.О., Погожих М.І., Потапов В.О. Високоякісні сушені овочі, альтернативні сублімаційним/ Розвиток масового харчування, готельного господарства і туризму в умовах ринкових відносин: Праці міжнар. наук.-практ. конф. - Київ: КДТЕУ, 1994. - С. 74.
41. Гришин М.А., Погожих Н.И., Потапов В.А. О механизме колебательного фильтрационного переноса в процессе сушки со смешанным теплоподводом// Перспективы развития массового питания и торговли в условиях перехода к рыночной экономике: Труды междунар. конф. - Харьков: ХГАТОП, 1994. - С. 191-192.

42. Погожих Н.И., Потапов В.А. Исследование давления внутри материала при СТП-сушке// Потребительская кооперация в переходный период. Проблемы и перспективы: Труды науч.-практ. конф. - Полтава: ПККИ, 1995. - С. 85.

43. Погожих Н.И., Потапов В.А., Сомов А.С. Экспериментальное изучение процессов в пограничной области при СТП-сушке// Потребительская кооперация в переходный период. Проблемы и перспективы: Труды науч.-практ. конф. - Полтава: ПККИ, 1995. - С. 86.

44. Гришин М.А., Потапов В.А., Погожих Н.И. Метод анализа кинетики сушки// Удосконалення процесів та апаратів хімічних, харчових та нафтохімічних виробництв: Праці ІХ Міжнар. конф. - Одеса: ОДАХТ, 1996. – Ч.2. - С. 93.

45. Гришин М.А., Жуков В.В., Погожих Н.И., Потапов В.А. Исследование равновесного состояния влаги в сушеных продуктах методами ЯМР// Удосконалення процесів та апаратів хімічних, харчових та нафтохімічних виробництв: Праці ІХ Міжнар. конф. - Одеса: ОДАХТ, 1996. – Ч.2. - С. 102.

46. Потапов В.О. Фізична модель зв'язку стану вологи з кінетикою деформування в процесі сушіння// Стратегічні напрямки розвитку підприємств харчових виробництв і торгівлі: Тези доповідей міжнар. наук.-практ. конф. - Харків, 2002. - С. 265-266.

47. Потапов В.А., Погожих Н.И., Цуркан Н.М. Экспериментальное определение движущих сил кинетики сушки// Современные энергосберегающие тепловые технологии (сушка и термо-влажностная обработка материалов): Труды междунар. науч.-практ. конф. - М.: МГАУ, 2002. - Т.2. - С. 118-121.

48. Потапов В.О. Визначення енергії зв'язку вологи по кінетиці температури в процесі сушіння// Управлінські та технологічні аспекти розвитку підприємств харчування торгівлі: Тези доп. міжнар. наук.-практ. конф. - Харків, 2003. – С. 318-321.

49. Сомов А.С., Потапов В.О., Мудровський Т.Г. Експериментальна методика визначення вільної та зв'язаної вологи методом диференційної термопарі// Актуальні проблеми харчування: технологія та обладнання, організація і економіка: Тези доп. міжнар. наук.-практ. конф. - Святогорськ, 2003. - С. 119.

50. Потапов В.А., Погожих Н.И. Система уравнений кинетики переноса для процесса сушки коллоидных капиллярно-пористых тел// Проблемы промышленной теплотехники: Тезисы IV Междунар. конф. - Киев, 2005. - С. 225-226.

АНОТАЦІЯ

Потапов В.О. Наукові основи аналізу та керування кінетикою сушіння харчової сировини. —
Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.18.12 – процеси та обладнання харчових, мікробіологічних та фармацевтичних виробництв. – Харківський державний університет харчування та торгівлі Міністерства освіти і науки України, Харків, 2007.

Дисертацію присвячено розробці наукових методів аналізу та керування кінетикою сушіння харчової сировини з метою зниження енерговитрат і підвищення якості готової продукції. В основу покладено наукову концепцію про визначальний вплив структури вологи в харчовій сировині на сполучені процеси перенесення маси, енергії та імпульсу, кінетика яких зумовлює існування та вибір раціональних технологій сушіння та способів їхньої апаратної реалізації. Теоретично обґрунтовано і експериментально підтверджено ефект динамічного структурування вологи, що полягає в зміні кількісного співвідношення між вільною та зв'язаною вологою.

Запропоновано класифікацію харчової сировини як об'єкта сушіння за структурно-енергетичним параметром, що являє собою відношення середніх витрат енергії на видалення зв'язаної вологи до витрат на видалення вільної вологи та враховує особливості капілярної структури сировини.

Отримано систему диференціальних рівнянь кінетики сполучених процесів перенесення маси, енергії та імпульсу, яка враховує структурно-енергетичну та реологічну модель харчової сировини.

Розроблено концепцію оптимального керування кінетикою сушіння харчової сировини, яка полягає у виборі алгоритму зміни параметрів сушильного агента, що забезпечує мінімізацію однієї з трьох цільових функцій: обмеження за втратами біологічно активних речовин, обмеження за максимальними механічними напруженнями, обмеження за енерговитратами. Наведено приклади раціональних режимів сушіння окремих видів харчової сировини для низькоінтенсивних і високоінтенсивних способів сушіння, які забезпечують зниження енерговитрат на 10...40% і зменшення втрат вітамінного складу на 10...30%.

Ключові слова: кінетика сушіння, вільна й зв'язана волога, моделювання сполучених процесів перенесення.

АННОТАЦІЯ

Потапов В.О. Научные основы анализа и управления кинетикой сушки пищевого сырья. — Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.18.12 — процессы и оборудование пищевых, микробиологических и фармацевтических производств. — Харьковский государственный университет питания и торговли Министерства образо-

вания и науки Украины, Харьков, 2007.

Диссертация посвящена разработке научных методов анализа и управления кинетикой сушки пищевого сырья с целью снижения энергозатрат и повышения качества готовой продукции. В основу положена научная концепция об определяющем влиянии структуры влаги в пищевом сырье на сопряженные процессы переноса массы, энергии и импульса, кинетика которых обуславливает существование и выбор рациональных технологий сушки и способов их аппаратной реализации.

В основу концепции положено молекулярно-кинетическое представление о влаге как системе слабо взаимодействующих частиц, которые находятся в поле сил Ван-дер-Ваальса. При этом молекулярно-кинетическая граница деления молекул на “свободные” и “связанные” определяется из равенства их потенциальной и кинетической энергии, а их количественное соотношение рассчитывается из распределения Максвелла-Больцмана. На основе этой модели получено аналитическое описание структуры влаги в коллоидных капиллярно-пористых телах, которое позволяет рассчитывать количество “свободной” и “связанной” влаги и ее энергию связи.

Теоретически обоснован и экспериментально подтвержден эффект динамического структурирования влаги, который заключается в изменении количественного соотношения между свободной и связанной влагой под влиянием механических деформаций, вследствие усадки или набухания сырья и температурных изменений в сопряженных процессах переноса. Получены аналитические зависимости, которые описывают этот эффект.

Разработана молекулярно-кинетическая модель процессов сорбции-десорбции, которая позволяет анализировать экспериментальные изотермы пищевого сырья и определять энергию связи, количество свободной и связанной влаги, дифференциальную функцию распределения капилляров по радиусам. В результате проведенного анализа предложена классификация пищевого сырья как объекта сушки по структурно-энергетическому параметру, который представляет отношение средних затрат энергии на удаление связанной влаги к затратам на удаление свободной влаги и учитывает особенности капиллярной структуры сырья. Приведены данные о величине структурно-энергетического параметра, характеристиках пористой структуры и энергии связи для разного пищевого сырья: зерна, овощей, фруктов, макаронных изделий.

На основе закона сохранения физической субстанции и феноменологических законов переноса получена система дифференциальных уравнений кинетики сопряженных процессов переноса массы, энергии и импульса, учитывающая структурно-энергетическую и реологическую модель пищевого сырья. Найдено ее аналитическое решение и получены уравнения для определения кинетики свободной, связанной влаги, температуры, давления парогазовой смеси, деформации и механических напряжений.

Полученные уравнения положены в основу анализа экспериментальных данных о кинетике сушки, суть которого состоит в определении влияния параметров сушильного агента на средние

коэффициенты переноса массы, энергии, импульса, тепло-массообменные и структурно-механические характеристики пищевого сырья. Для автоматизации анализа экспериментальных данных создан комплекс программного обеспечения для обработки изотерм сорбции-десорбции, кинетики влагосодержания, температуры, давления и деформации в процессе сушки.

На основе обобщения экспериментальных данных и полученных аналитических зависимостей разработана концепция оптимального управления кинетикой сушки пищевого сырья, заключающаяся в выборе алгоритма изменения параметров сушильного агента, обеспечивающего минимизацию одной из трех целевых функций: ограничение по потерям биологически активных веществ, ограничение по максимальным механическим напряжениям, ограничение по энергозатратам. В основе алгоритмов лежат аналитические выражения, описывающие влияние параметров сушильного агента на изменение концентрации биологически активных веществ, кинетику тепло-массообменных и структурно-механических процессов в пищевом сырье.

Для практической реализации алгоритмов разработаны двухступенчатые технологические режимы для сушки и копчения. Приведены примеры рациональных режимов сушки отдельных видов пищевого сырья для низкоинтенсивных и высокоинтенсивных способов сушки, которые обеспечивают снижение энергозатрат на 10...40% и уменьшение потерь витаминного состава на 10...30%.

Разработаны высокоточные методики расчета сушильных установок, учитывающие кинетику свободной и связанной влаги, гидродинамику в объеме конвективных сушилок, которые позволяют повысить эффективность проектно-конструкторских и технологических работ за счет снижения сроков разработок и финансовых затрат. Создан комплекс программного обеспечения для автоматизации инженерных расчетов конвективных сушилок различных типов.

Описанные методики внедрены при разработке серии высокоэффективного оборудования для сушки, копчения и гидротермической обработки пищевого сырья, производительностью от 20 до 200 кг/ч по сырью. Отличительной особенностью этого оборудования является мощная аэродинамическая система с оптимальной конфигурацией вентиляционных каналов, возможность регулирования влажности среды, электронный блок управления, модульно-сборная конструкция корпуса.

Проведены испытания и внедрение в производство проектно-технической документации, технологий и оборудования. Определены перспективные направления развития методов оптимального управления процессами сушки для широкого ассортимента пищевого сырья.

Ключевые слова: кинетика сушки, свободная и связанная влага, моделирование сопряженных процессов переноса.

Potapov V.O. Scientific bases of the analysis and control drying kinetics of the food stuff. — Manuscript.

Dissertation for the Doctor's degree by specialty 05.18.12 — Processes and Equipment of Food, Microbiological and Pharmaceutical Industries. — Kharkiv State University of Food Technology and Trade of the Ministry of Education and Science of Ukraine, Kharkiv, 2007.

The dissertation is dedicated to the development of the scientific methods of analysis and control of the drying kinetics of food raw material for the purpose of a decrease power consumption and improvement in the quality of finished production. The scientific concept is based upon the determining influence of the structure of moisture in the food raw material on the conjugate processes of mass, energy and pulse transfer, kinetics of which specifies existence and selection of rational drying technologies and methods of their apparatus realization. The effect of dynamic structurization of a moisture, which consists in change of a quantitative ratio between the free and bound moisture is theoretically proved and experimentally confirmed.

The classification of food raw material as object of drying on the structurally-power parameter is offered, which representing the attitude of average energy expenses on removal of bound moisture to expenses for removal of free moisture.

The system of the differential equations of kinetics for the conjugate mass, energy and pulse transfer processes is obtained on the basis of structural — energy and rheological model of food raw material.

The concept of optimum control drying kinetics of the food raw material, consisting in choice algorithm of change of parameters drying agent providing minimization by one of three criterion functions is developed: restriction on losses of biologically active substances, restriction on the maximal mechanical pressure, restriction on power inputs. Examples of rational drying modes for separate kinds of food raw material for low intensity and high-intensity ways of drying are resulted, which provide decrease in power inputs on 10...40 % and reduction of vitamin losses on 10...30 %.

Key words: drying kinetics, free and bound water, modelling of the conjugate transfer processes.

Підп. до друку 13.04.2007 р.. Формат 60x84 1/16. Папір офсет. Друк офсет.

Обл.-вид. арк. 1,9. Ум. друк. арк. 2,1. Ум. фарб.-відб. 2,1.

Тираж 100 прим. Замов. №____

ДОД ХДУХТ, вул. Клочкіська, 333, Харків, 61051.