

ХАРКІВСЬКА ДЕРЖАВНА АКАДЕМІЯ ТЕХНОЛОГІЇ
ТА ОРГАНІЗАЦІЇ ХАРЧУВАННЯ

ПОГОЖИХ МИКОЛА ІВАНОВИЧ

УДК 664.834

НАУКОВІ ОСНОВИ ТЕОРІЇ ТА ТЕХНІКИ СУШІННЯ
ХАРЧОВОЇ СИРОВИНИ У МАСООБМІННИХ МОДУЛЯХ

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

АВТОРЕФЕРАТ
дисертації на здобуття наукового ступеня
доктора технічних наук

Харків - 2002

Дисертацією є рукопис.

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

Науковий консультант

доктор технічних наук, професор
ГРИШИН Михайло Олександрович,
Одеська державна академія харчових
технологій, професор кафедри технології молока та
сушіння

Офіційні опоненти:

доктор технічних наук, чл.- кор. НАН України
СНЄЖКІН Юрій Федорович,
НТК "Інститут технічної теплофізики" НАН Украї-
ни, заступник директора;

доктор технічних наук, професор
БУРДО Олег Григорович,
Одеська державна академія харчових
технологій, завідувач кафедри процесів та апаратів;

доктор технічних наук, професор
ФОКІН Віталій Сергійович,
Національний технічний університет "ХПІ", про-
фесор кафедри теплотехніки

Провідна установа:

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

Захист відбудеться " 4 " червня 2002 року о 11⁰⁰ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради
Д 64.088.01 Харківської державної академії технології та організації харчування за адресою :
61051, м. Харків,
вул. Клочківська, 333, ауд.45.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Харківської державної академії технології та ор-
ганізації харчування за адресою: 61051, м. Харків,
вул. Клочківська, 333.

Автореферат розісланий " 26 " квітня 2002 р.

Вчений секретар

спеціалізованої вченої ради

В. М.

Михайлов

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Раціональне використання і скорочення втрат сільськогосподарської продукції що вироблена - одна з основних задач харчової промисловості України. Збільшення обсягів переробки сільгоспсировини на продукти харчування дозволяє не тільки знизити втрати врожаю на процесі його зберігання, але й використовувати відходи виробництва для господарств, що відгодовують тварин. Дефіцит енергетичних ресурсів диктує необхідність раціонального використання енергії, розробки енергозберігаючих процесів і апаратів для харчових технологій, зокрема для сушіння.

Сушіння – найпоширеніший спосіб консервування харчової сировини. Задачами сушильних технологій є: зниження енергетичних витрат на процес вилучення вологи; підвищення якості сушеної продукції; розробка високоефективної універсальної сушильної техніки; забезпечення екологічної безпеки сушильних підприємств. Рішення цих задач визначається розвитком наукових уявлень про механізми масо- і теплообміну. Завдяки роботам О.В. Ликова, П.Д. Лебедева, Г.К. Філоненка, М.О. Гришина, В.В. Краснікова, вчених інституту тепломасообміну ім. О.В. Ликова (Мінськ), ІТТФ НАН України, закордонних вчених О. Крішера, Т. Шервуда тощо створена теорія процесів переносу теплоти і маси, розвинуте учення про технологію й техніку сушіння. Основою цієї теорії є закони збереження, постулати і теореми нерівноважної термодинаміки. Сучасні досягнення та досвід використання нерівноважної термодинаміки у фундаментальних науках дозволяють поширити деякі її висновки безпосередньо на процеси зневоднювання.

З приводу пошуку нових способів сушіння харчової сировини розроблений у ХДАТОХ спосіб сушіння змішаним теплопідводом являє собою перспективний напрямок. Попередні дослідження довели ефективність застосування цього способу для виробництва сушеної продукції підвищеної якості. Але відсутність узагальнених експериментальних результатів й повної теорії процесу стримує розробку методик розрахунку відповідних типів сушарок, визначення раціональних режимів зневоднювання харчової сировини та широке промислове впровадження принципово нових апаратів й технологій сушіння. Викладене обумовило вибір теми дисертаційної роботи.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Представлені в роботі дослідження виконувалися відповідно до планів держбюджетних тем ХДАТОХ за замовленням Міністерства освіти і науки України: № 13–91–95Б “Застосування фізичних методів досліджень для контролю й аналізу процесів технологічної обробки харчових продуктів”; № 5–95–97Б “Фізико-хімічні проблеми стану води в харчових продуктах і їхня якість”; № 2–98–01Б “Фізико-хімічні і технологічні проблеми стану води в харчових продуктах”; №2 –93 БО “Наукове обґрунтування і розробка критеріїв безпеки крові забійних тварин для харчових продуктів на її основі”, госпдоговірних тем: № 0193V024307 “Розробка конструкції пристрою ЗТП–сушіння”; № 01–92ЦС “Експериментальний сушильний пристрій для виробництва картопляних слойок”, а також у рамках договору про спільну діяльність академії з Харківським науково-технологічним комплексом.

Мета і задачі дослідження. Метою дослідження є розробка теорії, за якою визначаються раціональні режими сушіння харчової сировини у масообмінних модулях та розраховуються апарати для їх практичної реалізації.

Виходячи з мети дослідження, сформульовано та вирішено такі задачі:

- запропонувати феноменологічну гіпотезу процесу зневоднення вологих матеріалів у масообмінних модулях, як у штучному модельному пристрої;
- вивчити кінетику процесу сушіння в залежності від технології попередньої підготовки сировини, типів і геометричної форми місткостей, режимів сушіння;
- дослідити динаміку процесу сушіння харчової сировини у функціональних місткостях;
- розробити термодинамічну модель процесу сушіння у масообмінних модулях - місткостях;
- розробити фізико-математичну модель механізмів переносу маси при сушінні у масооб-

мінних модулях;

- дослідити характер поведження вологи в процесі сушіння;
- визначити фізико-хімічні і технологічні показники асортименту сушених харчових продуктів;
- визначити раціональні режими сушіння асортименту харчової сировини;
- створити концепцію і розробити методику розрахунку сушарок з масообмінними модулями;
- розробити економічне обґрунтування та здійснити впровадження результатів досліджень у виробництво.

Об'єктом досліджень є процес сушіння харчової сировини.

Предметами досліджень є процеси тепломасообміну при сушінні харчової сировини у масообмінних модулях і технічні вимоги до сушильного обладнання, в якому здійснюються ці процеси.

Методи досліджень містять у собі стандартні та оригінальні методики дослідження кінетики сушіння, гідромеханічних характеристик сушильного агента, виміру теплових потоків для масообмінних модулів, а також методи аналітичних досліджень із використанням обчислювальної техніки.

Наукова новизна одержаних результатів.

Доведено наукову концепцію роботи: теорія - сушіння вологих матеріалів у масообмінних модулях, як процес тепло-масообміну через стан з максимумом вільної енергії; техніка сушіння - масообмінний модуль, що містить вологий матеріал, є об'єктом сушіння. При цьому:

- доведено можливість виключення чи істотного обмеження негативного впливу поверхні матеріалу в процесі масообміну шляхом створення штучних умов за рахунок модельного пристрою - масообмінного модуля та його практичного утілення - функціональної місткості (ФМ);

- встановлено, що процес сушіння в індивідуальних функціональних місткостях (ІФМ) у першу чергу визначається видом вихідної сировини та технологією її попередньої підготовки до сушіння;

- знайдено, що кінетика сушіння в універсальних функціональних місткостях (УФМ) слабко залежить від виду сировини, а визначається режимом сушіння, геометричними розмірами УФМ, ступенем здрібнювання і ступенем заповнення УФМ;

- доведено, що ФМ разом із матеріалом, що зневоднюється, варто розглядати як об'єкт сушіння, а кінетика і критичні особливості процесу залежать як від зовнішніх, так і від внутрішніх чинників. Встановлено, що кінетика сушіння у ФМ не має періоду сталої швидкості, а збільшення ефективного пористого простору трансформує процес зневоднювання у конвективний;

- визначено, що на кінетику температури матеріалу впливає швидкість і температура сушильного агента, ступень заповнення ФМ, і у меншій мірі – природа сировини. Встановлено, що інтенсивність теплообміну в процесі сушіння визначається теплопровідністю шарів сировини, що стикаються з теплообмінною поверхнею ФМ, і залежить від швидкості зневоднювання її внутрішніх шарів;

- отримано рівняння для обчислювання коефіцієнта теплопередачі в процесі сушіння. Показано, що використовуючи поправку з приводу критичної швидкості сушильного агента, коефіцієнт тепловіддачі можна розраховувати як для “сухого” теплообміну;

- встановлено, що гідродинаміка обтікання масообмінного зазору ФМ є визначальним чинником процесу сушіння;

- доведено ефективність процесу з погляду енергетичних витрат, що обумовлена випаровуванням вологи за рахунок накопиченої внутрішньої енергії матеріалу;

- розроблено повну фізичну модель процесу сушіння у масообмінних модулях, що формує принципи його реалізації: створення зовнішніх умов для переходу системи зі слабовідкритого у відкритий стан; створення внутрішніх умов для підтримки нерівноваги на відрізок часу, достатньому для повного здійснення процесу. Перший принцип стосується задач сушильної тех-

ніки, другий - технології сушіння;

– запроваджено функцію, що відображає розвиток поверхні випару та дозволяє прогнозувати і виконувати чисельну оцінку рівномірності зневоднювання і кінетику температури матеріалу по зонах;

– доведено, що поступове збільшення швидкості сушіння до максимуму викликане внеском конвекційної складової потоку пароповітряної суміші. Запропоновано модель динамічного поведіння вологи при сушінні, яка стверджує, що кількість і стан зв'язаної вологи залежать від інтенсивності масообмінних процесів.

Практичне значення одержаних результатів.

Розроблений принципово новий спосіб сушіння для асортименту харчової сировини дозволяє одержувати сушені швидковідновлювальні продукти з низькими енерговитратами на процес зневоднювання. Для можливості його широкого впровадження у виробництво:

* визначено технологічні прийоми й умови здійснення процесу сушіння в ФМ різного типу;

* розроблено універсальну технологічну схему сушіння і технологічні карти раціональних режимів для асортименту харчової сировини. Показано, що раціональні режими сушіння характеризуються витратами енергії 7,5 ... 24,0 МДж на 1 кг сушеної продукції;

* показано, що концепція методики розрахунку сушарок ґрунтується на уявленні про ФМ, як тепломасообмінний пристрій, а основною величиною, що вишукується, є швидкість повітря поблизу масообмінного зазору ФМ. Проведено класифікацію сушарок по типах ФМ, способу теплопідводу і режиму роботи. Розроблено алгоритм розрахунку сушарок з функціональними міскостями, а для зручності його практичного застосування створена програма для ЕОМ;

* розроблено техніко-економічне обґрунтування організації підприємства з виробництва високоякісних сушених харчових продуктів на базі фермерських і індивідуальних господарств потужністю 80 тонн сушеної продукції на рік. Очікуваний прибуток 45000...50000 ум.од. Термін реалізації проекту - 6...8 місяців. Строк окупності капіталовкладень - 10...13 місяців;

* визначено перспективні напрямки розвитку технології сушіння з використанням ФМ. Показано, що конструкторські рішення нових типів сушарок не вимагають видозмін допоміжних вузлів і є стандартними для сушильної техніки, відсутні вузли, які б змінювали вимоги до техніки безпеки, погіршували екологічні показники чи висували особливі вимоги до виробничих приміщень і інфраструктури підприємства;

* проведено іспити сушильних установок, впровадження у виробництво технологій, проектно-конструкторської документації та сушильного устаткування на: Чернігівському овоче-сушильному заводі; Черкаському м'ясокомбінаті; фірмі "ВСА" (м. Харків); Харківському науково-технологічному комплексу; фірмі "Фатум" (м. Харків); підприємстві "Фирма ВИ-ВА-ЛТД" (м. Донецьк), с/г підприємстві ООО "ІНУЛА" (м. Одеса).

Особистий внесок здобувача полягає у формулюванні наукової гіпотези, науковій концепції і доказі наукових положень дисертації, розробці методик, проведенні комплексних досліджень процесу й узагальненні експериментальних результатів, розробці моделей процесу зневоднювання харчової сировини у масообмінних модулях, проведенні заходів щодо впровадження результатів наукових досліджень у практику, формулюванні висновків і підготовці до публікації результатів досліджень.

Апробація результатів дисертації. Основні положення дисертаційної роботи доповідались, обговорювались і були схвалені на: Всесоюзній конференції "Проблеми впливу теплової обробки на харчову цінність продуктів харчування", (м. Харків, 1990р.); Всесоюзній конференції "Разработка комбинированных продуктов питания (Медико-биологические аспекты, технология, аппаратное оформление, оптимизация)" (м. Кемерово, 1991р.); Міжнародній конференції "Heat and Mass Transfer in Technological Process" (Jurmala, 1991р.); Всесоюзній конференції "Механіка сипучих матеріалів" (м. Одеса, 1991р.); Міжнародному форумі "Тепломасообмін" (м. Київ, 1992р.); Міжнародній конференції "Розвиток масового харчування, готельного господарства і туризму в умовах ринкових відносин" (м. Київ, 1994р.); Міжнародної конференції "Перспективи

розвитку масового харчування і торгівлі в умовах переходу до ринкової економіки” (м.Харків, 1994р.); науково-технічній конференції “Споживча кооперація в перехідний період. Проблеми і перспективи” (м. Полтава, 1995р.); Міжнародній конференції “Удосконалення процесів та апаратів хімічних, харчових та нафтохімічних виробництв” (м. Одеса, 1996р.); Міжнародній конференції “Проблеми промислової теплотехніки” (м. Київ, 1999р., 2001 р.); на наукових конференціях професорсько-викладацького складу ХДАТОХ (1989...2001 роки).

Публікації. За темою дисертаційної роботи опубліковано 48 наукових праць, у тому числі: 33 статті у наукових фахових виданнях, що затверджені ВАК України; 13 тез доповідей на наукових конференціях; 1-авторське свідоцтво та 1 патент на винаходи.

Структура та обсяг дисертації. Дисертаційна робота складається з вступу, восьми розділів, висновків, списку використаних джерел, що включає 254 най-менувань і додатків. Основний текст роботи викладений на 331 стор., включає 111 рисунків, 19 таблиць і 12 додатків.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовано актуальність теми, визначено мету та основні задачі досліджень, наведено відомості про наукову новизну та практичне значення одержаних результатів.

У першому розділі "Аналіз сучасного стану технології, техніки і теорії сушіння харчової сировини" проведено огляд проблем, що виникають при виробництві сушеної продукції. Відзначено, що перспективним напрямком розвитку техніки і технології сушіння є розробка принципово нових технологій і устаткування. Аналіз динаміки процесу сушіння дозволив сформулювати варіант наукової концепції способу штучного зневоднювання, заснований на уявленнях про вплив природного пограничного шару на процеси переносу, як чинника, що лімітує зовнішній перенос. Запропоновано замінити природну границю розділу деякою штучною поверхнею із заздалегідь заданими тепло-масообмінними властивостями. Основою для створення теорії і розробки принципово нового способу сушіння обрані сучасні досягнення нерівноважної термодинаміки, які дозволяють прогнозувати шляхи й процеси розвитку системи при взаємодії з навколишнім середовищем. Визначено чотири необхідні й достатні умови для руху системи у бік до максимуму вільної енергії. Розглянуто методи математичного опису процесів переносу. Відзначено, що уявлення про сталість кінетичних коефіцієнтів обмежує можливості в розумінні й керуванні процесами тепломасообміну, але дозволяє одержувати різні емпіричні рівняння, що описують кінетику процесів. На основі комп'ютерної обробки чисельних експериментальних даних визначено вид апроксимуючої функції, що задовільно описує кінетику зневоднювання різних матеріалів. Узагальнення висновків проведеного теоретичного аналізу дозволили сформулювати задачі досліджень.

В другому розділі "Феноменологічна гіпотеза та методики досліджень сушіння у масообмінних модулях" наведено поширене трактування гіпотези сушіння у масообмінних модулях. З положень нерівноважної термодинаміки витікає, що еволюція макроскопічної системи, яка досягла максимуму вільної енергії, у бік рівноваги відбувається через нерівноважний стаціонарний стан. Згідно з теоремою Пригожина цей стан характеризується мінімумом виробництва ентропії, тобто кількість утворень (дисипативних структур), що розсіюють енергію, буде з часом зменшуватись. Однак, термодинамічні умови для самовільного утворення дисипативних структур у системі: 1- видалення від рівноваги; 2- хиткість поблизу стаціонарного стану (відсутність потоків зі сталою інтенсивністю, прагнення у бік максимуму вільної енергії); 3- флуктуації; 4- відкритість по потоках енергії та маси, - призведуть до значної інтенсифікації процесу зневоднення. З метою технічної реалізації всіх цих умов запропоновано використовувати масообмінний модуль, що утворить із зовнішнім середовищем активну границю розділу (рис.1). Під активністю границі розділу розуміють її поліфункціональність стосовно потоків енергії j_q і маси j_m : границя виконує роль ключа, що відслідковує взаємодію внутрішньої частини системи з навколишнім середовищем при збереженні своїх фізичних і хімічних властивостей поза залежністю від інтенсивності і природи потоків енергії. Якщо якась властивість зовнішнього середовища є сталою, ту ж саму властивість повинна мати й границя розділу. Встановлено, що модуль повинен знаходитися

в слабовідкритому стані по потоку маси і мати поріг чутливості.

універсальні як по відношенню зневоднення без зміни агрегатного стану вологи, так й для сушіння. У випадку сушіння масообмінний модуль являє собою місткість, у якій розміщується сировина та яка має перфорацію для видалення маси (масообмінні зазори). Масообмінний модуль при сушінні гарячим повітрям забезпечує теплопідвід до матеріалу та бере участь у зовнішньому масообміні, тому його запропоновано іменувати функціональною місткістю (рис.2.), а процес - сушіння змішаним теплопідводом (ЗТП). Показано, що ФМ умовно можна розділити на три основні типи: однобічні; двобічні (включаючи індивідуальні); змішаного типу, що являють собою комбінацію двох попередніх. У однобічних ФМ тепло- й масообмінна поверхні (зазори) розташовані з одного боку від площини симетрії, у двобічних - взаємно перпендикулярно.

З викладеного сформульовано наукову концепцію роботи, положення якої раніше не формулювались і не доводились.

Особливості процесу дозволили запропонувати непрямий метод вивчення кінетики сушіння. Основою метода є рівняння теплового балансу у будь який момент часу τ :

$$C \cdot \rho \cdot L \cdot \chi \cdot \Delta I(\tau) = r \cdot m'(\tau) + C_m \cdot m \cdot t'(\tau), \quad (1)$$

де C, ρ, L - відповідно теплоємність (Дж/(кг·К)), густина (кг/м³), об'ємна витрата (кг/м³) сушильного агенту;

$\chi, \Delta I(\tau)$ - відповідно апаратний коефіцієнт (К/відн.од.), амплітуда сигналу (1/відн.од.) прибору, що реєструє різницю температур сушильного агенту на вході й виході з камери;

r - питома теплота пароутворення, Дж/кг;

m', m - відповідно швидкість втрати маси (кг/с) та поточна маса (кг) сировини;

t', t - відповідно швидкість зміни температури (°С/с) та поточна температура (°С) сировини;

C_m - питома теплоємність сировини, Дж/(кг·К).

Рішення цього рівняння, з урахуванням співвідношень маси та вологовмісту (W), а також залежності теплоємності від вологовмісту.

У третьому розділі "Дослідження кінетики сушіння харчової сировини у масообмінних модулях" доведено, що можливість здійснення процесу сушіння в індивідуальних функціональних місткостях (ІФМ), залежить від виду вихідної сировини. Сировину поділено на дві основні групи: що не піддається значній об'ємній усадці; що має високу міцність тканин. Для першої групи (картопля, яблуко, м'ясо) використовують стандартну попередню підготовку, а для другої (гарбуз, морква, буряк) - спеціальну. Одним з прийомів може бути попереднє заморожування овочів (рис.3). Така операція рекомендована й для сушіння сиру, швидкість й ступень відновлення якого збільшується з 50% до 80%. Необхідність спеціальної попередньої підготовки є вимогою до масообмінного критерію Кирпичьова

$$Ki_m > 1. \quad (5)$$

Нерівність (5) відображує утворення дисипативних структур під час сушіння (поверхня випару), що є внутрішнім флуктуаційним чинником процесу.

Двобічні функціональні місткості (ДФМ) є удосконаленою конструкцією ІФМ. Такі місткості можуть мати нескінченну довжину по відношенню до розміру поперечного перерізу. Встановлено, що розмір масообмінного зазору в межах $(0,5 \dots 3,0) \cdot 10^{-3}$ м не впливає на кінетику сушіння, що дозволяє використовувати навіть мілке здрібнення сировини. ДФМ мають три ступеня вільності по відношенню до вектору швидкості агенту сушіння, але орієнтація місткостей суттєво не впливає на загальну тривалість сушіння.

Зовнішніми чинниками процесу є розміри ФМ, під теплообмінною по-верхнею котрої ро-

зташовано тіло, що обумовлює стік теплоти до оточуючого середовища.

Використовуючи уявлення про еквівалентний діаметр d_e , як це запроваджено у теорії теплообміну, досліджено вплив цього чинника на тривалість сушіння. Встановлено, що існує критична величина у співвідношеннях розмірів ФМ, перевищення якої призводить до росту тривалості сушіння на порядок. Ця критичність геометричного комплексу $\Gamma_{кр}$ описується емпіричним рівнянням (9)

$$\Gamma_{кр} = 1 + \frac{1000}{(10 + d_e)^2} \quad (9)$$

Обчислену за цим рівнянням величину використовують для визначення граничних співвідношень розмірів місткості.

Однобічні функціональні місткості (ОФМ) найперспективніші з погляду їх використання у виробництві: прості у виготовленні та універсальні по відношенню до сировини (рис.5). Характер кінетики сушіння у двобічних і однобічних ФМ не залежить від виду сировини, а визначається параметрами сушильного агента, геометричними розмірами ФМ і здрібнених шматочків сировини. Доведено, що функціональну місткість варто розглядати, як об'єкт сушіння, масо- і теплопровідність якого залежать від ступеня здрібнювання і кількості сировини в ФМ. Такі ФМ є універсальними.

При сушінні в універсальних ФМ можна завантажити різну кількість сировини в залежності від ступеня здрібнення та заповнення місткості. Запроваджено уявлення про ефективний пористий простір Π , як частину об'єму ФМ, що не заповнена сировиною

$$\Pi = 1 - \frac{m_o}{\rho_o \cdot V_{\Phi}}, \quad (10)$$

де m_o, ρ_o, V_{Φ} - відповідно початкова маса (кг), густина (кг/м³) сировини, об'єм ФМ, м³;

Змінюючи розміри здрібнення L й масу сировини, що завантажується, вивчали відносну продуктивність місткості G_0 , як елементарного пристрою сушарки (рис.6). Отримано, що збільшення розмірів здрібнення призводить до блокування процесу, а збільшення Π - до трансформації процесу у конвективний. Встановлені раціональні параметри щодо завантаження місткостей сировиною. Наведену на рис.6 залежність треба використовувати як номограму для вибору раціонального здрібнення сировини та її завантаження у ФМ. Показники раціонального здрібнення й ступеня завантаження асортименту сировини наведені у табл. 3.

Таблиця 3

Раціональні параметри завантаження ФМ

Параметр	Сировина					
	Картопля	Морква	Буряк	Гарбуз	Часник	М'ясний фарш
$L \cdot 10^3$, м	1,0...2,0	1,5...2,0	2,0...2,5	2,0...3,0	2,5...3,0	–
Π , відн.од.	$\leq 0,20$	0,25	0,25	0,30	0,3	$\leq 0,20$

а підставі аналізу великої кількості кінетичних кривих встановлено, що процес сушіння можна поділити на три періоди: період нагрівання матеріалу і зростаючої швидкості сушіння; період максимальної швидкості сушіння; період убутної швидкості (рис. 7). На перші два періоди суттєво впливають швидкість руху повітря, розміри здрібнення сировини, попередня підготовка сировини до сушіння, ефективний пористий простір, співвідношення розмірів ФМ, а вже потім температура сушіння та природа сировини. Перший період має лавиноподібний характер, основним зовнішнім чинником якого є швидкість руху повітря поблизу масообмінного зазору. Най-

суттєвішим чинником другого періоду є ефективний пористий простір, а третього - температура сушіння. Але тільки перші два періоди є критичними і "чутливими" як до зовнішніх, так і до внутрішніх чинників, та визначають можливість здійснення та інтенсивність процесу сушіння вцілому.

Отримані результати щодо впливу чинників на кінетику сушіння у ФМ сировини рослинного і тваринного походження дозволили визначити діапазони пошуку раціональних режимів процесу за наступними показниками:

- геометричні розміри здрібнення сировини;
- спосіб і режим попередньої теплової обробки сировини;
- кількість сировини, що завантажується у ФМ;
- температура й швидкість сушильного агенту (повітря);
- тип, геометричні розміри і спосіб розміщення ФМ в об'ємі сушильної камери.

У четвертому розділі "Дослідження динаміки сушіння харчової сировини у масообмінних модулях" відзначено, що характер середньооб'ємної температури $\bar{t}_{сер}$ і розподіл температур по шарах сировини відрізняються від конвективного сушіння наявністю двох проміжних екстремумів (рис.8) - критичних точок K_1, K_2 , перша з котрих є максимумом, а друга - мінімумом температури. Така кінетика температури є характерною рисою ЗТП- сушіння поза залежністю від типу ФМ, виду сировини, її розмірів та шару, де вимірюється температура. Однак конкретні умови сушіння деформують температурну криву відносно критичних точок і вони змінюють своє положення по координатах. На положення критичних точок при сталій температурі сушіння впливає швидкість сушильного агенту: вони зближуються і рухаються у бік осі вологовмісту (часу). Відносне положення цих точок описується емпіричними рівняннями:

$$\bar{t}_k = a_t + b_t \cdot (v_d - v_{kp}); \quad (11)$$

$$\bar{\tau}_k = a_\tau + b_\tau \cdot (v_d - v_{kp}), \quad (12)$$

де a_t, b_t, a_τ, b_τ - коефіцієнти (табл.4).

Таблиця 4

Коефіцієнти рівнянь (11, 12)

Сировина	Критичні точки							
	K_1				K_2			
	$a_\tau \cdot 10^2$	$b_\tau \cdot 10^3$, с/м	$a_t \cdot 10^2$	$b_t \cdot 10^3$, с/м	$a_\tau \cdot 10^2$	$b_\tau \cdot 10^3$, с/м	$a_t \cdot 10^2$	$b_t \cdot 10^3$, с/м
Картопля	7,5	2,1	53	-9,1	40	-17	42	-18
Буряк	7,8	2,1	50	-9,5	42	-19	41	-20
Морква	7,9	2,3	50	-9,5	45	-19	40	-20
Гарбуз	8,3	2,5	48	-10,0	48	-19	37	-22
М'ясний фарш	6,5	2,1	53	-6,5	35	-12	50	-15

Визначено, що мінімум температури центрального шару зміщується в залежності від температури сушіння у бік більш високого поточного вологовмісту сировини. При цьому температурний напір між центральним шаром та поверхнею сировини досягає 40°C.

Підвищення ефективного пористого простору також сприяє зближенню критичних точок, їх абсолютні величини збільшуються й температурна крива трансформується до кривої 2 (рис. 8). Це обумовлено значним впливом потоку сушильного агенту, який потрапляє усередину ФМ. Висока величина Π негативно впливає на якість готової продукції та зменшує тепловий потік крізь теплообмінну поверхню ФМ. Показано, що раціональне завантаження сприяє значному

градієнту температури між окремими шарами (рис.9).

Хвилеподібний характер розвитку поля градієнтів температури усередині сировини відбиває рух зони випару: максимум градієнта $\Delta t / \Delta \delta$ відповідає максимуму швидкості зневоднення у даній зоні, де й відбувається інтенсивне розсіювання основної частини потоку теплоти. Кожна наступна зона зневоднюється за тим же законом, що й попередня. Такий процес є принципово нерівноважним й нестационарним, що й фіксується кінетикою сушіння в цілому (відсутній період сталої швидкості).

Розроблені методики досліджень дозволили експериментально вимірювати потоки теплоти \dot{q}_{qs} крізь стінку ФМ й визначити величину та характер коефіцієнта теплопередачі k під час сушіння

$$k = \left(\frac{1}{\alpha} + \frac{\delta_s}{\lambda_s} + \frac{\delta_m}{\lambda_m} \right)^{-1}. \quad (13)$$

Наприкінці сушіння, коли об'єм ФМ стає майже "прозорим", а кількість випареної вологи зменшується, потік пароповітряної суміші втрачає свою інтенсивність (перегин сигналу 2) і стає стаціонарним. Доведено, що гідродинаміка обтікання масообмінного зазору ФМ є визначальним чинником процесу сушіння у масообмінних модулях.

Встановлено, що розподіл статичних тисків поблизу елементів ФМ не залежить від температури сушильного агента і від того, чи відбувається процес зневоднювання чи ні, а визначається тільки геометричною формою ФМ і швидкістю потоку. Вивчено залежність повного і статичного тисків потоку в каналі сушарки від вологості сировини, що завантажена у ФМ. Отримано емпіричне рівняння, що описує розподіл тиску $P(x)$ уздовж координати x (поверхні ФМ), яка співпадає з напрямком руху потоку сушильного агента:

$$P(x) = c \cdot x^\beta \cdot e^{\gamma \cdot x + a}, \quad (17)$$

де c, β, γ, a – коефіцієнти (c , Па/м ^{β} ; γ , 1/м; x , м; a та β – безрозмірні).

Експериментальним вивченням критерію Ребіндера при ЗТП– сушінні, доведено зсув витрат теплоти в загальному рівнянні балансу теплоти убік витрат на випар, що свідчить про ефективність процесу. Факт того, що при ЗТП– сушінні цей критерій має від'ємні величини, указує на випаровування вологи за рахунок внутрішньої енергії сировини, накопиченої у попередні періоди. Тоді у процесі сушіння система "волога сировина + ФМ" минає хитливий стан з максимумом вільної енергії. Очевидно, це є самою істотною відмінністю досліджуваного способу сушіння від інших, де процес завжди протікає через стан з мінімумом вільної енергії.

У п'ятому розділі "Фізична модель сушіння вологої харчової сировини у масообмінних модулях" на основі експериментальних досліджень наведено опис механізмів переносу теплоти й маси. Запропоновано термодинамічну модель сушіння вологих матеріалів, засновану на тому, що функціональна місткість виступає як об'єкт сушіння, а сировина, що зневоднюється, визначає внутрішній тепловологоперенос цього об'єкта. За цих умов об'єкт сушіння уявляє собою квазі-зольовану систему. Система володіє двома квазірівноважними станами, один з яких є хитливим з максимумом вільної енергії (початковий період зневоднювання), а другий – стійкий з мінімумом вільної енергії (закінчення зневоднювання). Показано, що обидва стани не є критичними стосовно температури t (за $0^\circ\text{C} < t < 100^\circ\text{C}$) і вологості сушильного агента ϕ (при $\phi < 100\%$), а перехід від хитливого до стійкого стану відбувається за рахунок флуктуацій потоку сушильного агента поблизу масообмінного зазору. Еволюція цього переходу може бути пояснена за допомогою положень нерівноважної термодинаміки. Приріст ентропії $\beta = dS / d\tau$ у закритій системі з часом може тільки зменшуватись: $d\beta / d\tau < 0$. Для відкритих систем зміна приросту ентропії поділяється на дві частини – внутрішню, яка завжди підпорядковується нерівності $d\beta_i / d\tau < 0$, та

зовнішню $d\beta_e / d\tau$, знак якої залежить від зовнішніх потоків теплоти й маси. Якщо об'єкт сушіння знаходиться у квазіізольованому стані по потоку маси, то самовільно вийти з цього стану він не може (сушіння не відбувається). Потік теплоти збільшує внутрішню енергію об'єкту і його стан стає хитливим. Будь-які флуктуації (зовнішні або внутрішні) призведуть до генерації механізмів руху системи до нового стійкого стану - почнеться зневоднення. Тривалість зневоднення та характеристики кінцевого стану сировини будуть визначатися інтенсивністю обміну теплотою і масою з оточуючим середовищем, а також внутрішніми флуктуаціями (розвитком поверхні випару) та переносом теплоти й маси, еволюція яких завжди підпорядковується нерівності $d\beta_i / d\tau < 0$. За близьких фізичних властивостей сировини тривалість зневоднення не буде залежати від її природи, що й спостерігалось експериментально.

Якщо обмін масою об'єкту сушіння із зовнішнім середовищем відбувається тільки дифузійно, то потік теплоти крізь стінку ФМ швидко компенсує її витрати на випар. Це призводить до зростання температури сировини, потік теплоти зменшується, а об'єкт сушіння набуває проміжний квазірівноважний хитливий стан - процес зневоднення "заблокується".

Приріст ентропії є адитивним за складовими рушійних сил переносу. При сушінні у масообмінних модулях можна відокремити внутрішні складові: β_{mdif} - масова дифузійна; β_q - теплообмінна; β_{mconv} - масова конвекційна:

$$\beta = \beta_{mdif} + \beta_q + \beta_{mconv}. \quad (18)$$

Третя складова обумовлена утворенням дисипативних структур (розвитком поверхні випару), тому залежить і від β_{mdif} . Параметри зовнішнього середовища при сушінні підтримуються сталими, тому перші дві складові (18) набувають стаціонарного режиму. Як це витікає з теореми Пригожина, система повинна знизити свій порядок на одиницю, тобто потік β_{mconv} зникне й відбудеться "зрив" процесу зневоднення. Це спостерігається при сушінні у ФМ шматочків з розмірами більш за $(5...6) \cdot 10^{-3}$ м, які не втрачають маси по досягненні гігроскопічного вологовмісту.

Аналогічна ситуація спостерігається при завантаженні сировини у ФМ з високим ефективним пористим простором. За цих умов додатково з'являються ще дві складових: β_{dq} - тепловіддача від потоку сушильного агента, що потрапляє у ФМ; β_{dE} - розсіювання енергії потоку сушильного агента за рахунок тертя:

$$\beta = \beta_{mdif} + \beta_q + \beta_{mconv} + \beta_{dq} + \beta_{dE}. \quad (19)$$

Тоді перша, четверта і п'ята складові (19) набудуть стаціонарного режиму, система зменшить свій порядок на дві одиниці, теплообмін зі стінкою ФМ зникне, упорядкованість внутрішніх потоків маси β_{mconv} знизиться або теж зникне. Внаслідок цього, процес сушіння у масообмінних модулях трансформується до конвективного сушіння, що також спостерігалось експериментально.

Теоретичним аналізом встановлено, що процес обміну маси сировини з оточуючим середовищем шляхом дифузії не є визначальним, або його інтенсивністю можна знехтувати. Обмін масою здійснюється упорядкованим конвекційним потоком пароповітряного середовища, спрямованим із ФМ. При відсутності джерел маси потік повітря в об'ємі ФМ має вихровий характер, а при випаровуванні вологи - упорядкований.

Отримано рівняння, що відображає феноменологічну вимогу до швидкості руху сушильного агента поблизу поверхні ФМ:

$$V_{\infty} = \frac{\rho k}{\rho k_0} \cdot \frac{4 \cdot N \cdot d_x \cdot d \cdot (1 - \Pi)}{d_{mw}^2 \cdot \varepsilon} \cdot V_{dif}, \quad (20)$$

де ρ - об'ємна густина, кг/м³, (індекси: k - пара; o - повітря);

V_{dif} - умовна дифузійна швидкість потоку маси усередині ФМ, м/с;

ε - коефіцієнт турбулентності потоку повітря;

d - лінійний розмір (індекси: x - ширина масообмінного зазору; mw - здрібноної сировини; без індексу - ширина елемента ФМ), м;

N - кількість елементів ФМ.

Розрахунок теоретичного процесу ЗТП- сушіння з використанням $I-d$ діаграми повітря стверджує, що потік сушильного агента в середину ФМ не може забезпечити процес необхідною теплою. Доведено, що більша частина теплоти надходить до сировини через теплообмінну поверхню ФМ. При цьому ефективність процесу визначається тим, що здібність сушильного агента до поглинання вологи обумовлюється його нагріванням не тільки в калорифері сушарки, але й усередині ФМ. Висока вологовбирна здатність пароповітряної суміші усередині ФМ обмежує баласт теплоти до 10...15% від тієї, що несе сушильний агент для забезпечення процесу сушіння. Тому поглинання теплоти сировиною повністю визначається інтенсивністю випаровування вологи.

У будь-якій теорії сушіння не обминається питання про форми зв'язку вологи з матеріалом. Це питання нами вивчалось з використанням методу ядерного магнітного резонансу (ЯМР). Аналіз чисельних даних ЯМР- досліджень дозволив запропонувати модель динамічного поведіння вологи в полідисперсних системах органічного походження. Основне положення цієї моделі полягає у твердженні, що кількість і стан зв'язаної вологи залежать від інтенсивності тепло-масообмінних процесів. Стан вологи в матеріалі характеризується термодинамічною рівновагою із сухою речовиною. Таких станів не менше трьох і вони стійкі в деякому діапазоні вологовмістів. Як показали дослідження, існує залежність цих діапазонів від температури і способу сушіння. На підставі цієї моделі наведено пояснення швидкого досягнення низького кінцевого рівноважного вологовмісту матеріалів при ЗТП- сушінні.

Запропонована фізична модель сушіння харчової сировини у масообмінних модулях погоджується з експериментом і дозволяє використовувати її для розрахунку й оптимального керування даним процесом. Відповідно до основних положень моделі процес сушіння заснований на:

- створенні зовнішніх умов для переходу системи зі слабовідкритого стану у відкритий;
- створенні внутрішніх умов для підтримки нерівноваги на протязі часу, достатнього для зниження вологовмісту матеріалу до необхідної величини.

При цьому перше стосується теорії та задач сушильної техніки, а друге - теорії та задач технології сушіння.

У шостому розділі "Фізико-хімічні та технологічні показники сушених продуктів" визначені режими проведення процесу сушіння, які забезпечують максимальне зберігання основних показників якості вихідної сировини. Дослідженнями встановлено, що на відновлюваність сушених продуктів у змочувальній рідині впливають тип ФМ, температура сушіння, природа і розміри сировини, ефективний пористий простір (рис. 14). При цьому, якщо вплив типу ФМ позначається тільки на характері кінетики змочування, то інші перераховані чинники, впливають на загальну тривалість і максимальну величину ступеня відновлюваності β_{vmax} . Так ступень відновлювання для будь якої сировини підвищується, якщо завантаження ФМ проводити з меншим ефективним пористим простором. Отримані комплексні дані щодо відновлюваності асортименту продукції рекомендовано використовувати при визначенні технології попередньої підготовки сировини і режимів сушіння.

Отримано емпіричне рівняння, що дозволяє визначити рівноважний вологовміст сушених продуктів з відносною похибкою, що не перевищує 15 %. Задовільна кореляція розрахованих ве-

личин рівноважного вологовмісту з експериментальними дозволила рекомендувати це рівняння для визначення раціональних режимів збереження продукції.

Встановлено, що процес ЗТП- сушіння характеризується впливом, що щадить на склад біологічно активних речовин сировини, а за дією на β - каротин вплив спостерігається на рівні сублімаційного сушіння. Зниження втрат вітамінів при ЗТП- сушінні (табл. 8), обумовлено низьким інтегральним температурним впливом θ на сировину, малою тривалістю процесу, а також тим, що сировина практично ізольована від інтенсивного впливу сушильного агенту і світла.

Таблиця 8

Відносні втрати біологічно активних речовин, %

±0,1

Сировина	Температура сушіння, °С			
	60	70	80	90
Картопля:				
Вітамін С	7,2	6,0	6,2	8,3
θ , °С	5,6*	5,5*	5,0*	6,8*
	45,0	44,0	45,0	49,0
	44,0*	44,0*	42,0*	50,0*
Буряк:				
Вітамін С	17,0	15,0	15,2	16,5
β -каротин	1,6	1,8	1,5	2,5
θ , °С	47,0	45,0	48,0	51,0
Морква:				
Вітамін С	23,0	16,0	9,2	17,5
β -каротин	1,6	0,8	2,0	2,3
θ , °С	47,0	46,0	47,0	49,0
Гарбуз:				
Вітамін С	20,0	12,0	14,2	16,0
β -каротин	1,1	0,7	2,5	3,0
θ , °С	43,0	43,0	44,0	48,0

*Сушіння в ІФМ

Дослідження мікробіологічних показників сушеної продукції показали, що в процесі зберігання в герметичному упакованні кількість мікроорганізмів зменшується, тому що немає активного середовища (вологи) для розвитку мікроорганізмів. Встановлені гранично припустимі температури сушіння, що забезпечують збереженість колірної гама продукції. Показано, що підвищення температури сушіння можливо тільки у випадку застосування перемінних режимів. Дослідженнями ремісійних властивостей встановлено, що з метою тривалого зберігання продукції її варто упаковувати у світлонепроникні полімерні матеріали під вакуумом.

У сьомому розділі "Раціональні режими та апаратне оформлення ЗТП- сушарок " наведено опис загальної технологічної схеми сушіння харчової сировини. Відзначено, що режими сушіння, реалізовані в установках ЗТП, характеризуються витратами енергії 3,1...3,3 МДж на 1кг вологи, що випаровується, а в перерахуванні на 1 кг сушеної продукції цей показник коливається в межах 7,5...24,0 МДж.

Виходячи з положення наукової концепції роботи, розроблено методику вибору раціональних режимів ЗТП- сушіння. В основі цієї методики лежить аналіз впливу процесних чинників на якість готової продукції. При цьому спочатку визначається діапазон раціональних режимів за кожним чинником, а потім - остаточний вибір раціонального режиму. Визначені режими дозволили скласти технологічні карти для ЗТП- сушіння асортименту харчової сировини. Показано, що концепція методики розрахунку ЗТП- сушарок повинна базуватися на уявленні про ФМ, як своє-

рідний тепло- масообмінний пристрій. Цей пристрій є окремою одиницею – “сушарка в сушарці”. Тоді основною величиною, що вишукається та визначає розрахунок сушарки в цілому, є швидкість потоку повітря поблизу масообмінного зазору ФМ. Розроблено алгоритм розрахунку ЗТП- сушарки і наведено опис методики його застосування. Для зручності практичного застосування методика розрахунку ЗТП- сушарок оформлена у вигляді програми для ПЕОМ у середовищі Mathcad.

Відзначено, що обов'язковою конструктивною приналежністю ЗТП- сушарок є функціональна місткість для сировини. Тому кожне з інженерно-конструкторських рішень повинне забезпечити проведення ЗТП- процесу тільки при дотриманні вимог, що безпосередньо відносяться до обраного типу функціональної місткості. Розроблено класифікацію ЗТП- сушарок за типами ФМ, за способом теплопідводу й за характером роботи. Наведена класифікація дозволяє оцінити перспективу подальших досліджень даного способу сушіння. Відзначено, що особливий інтерес може представляти процес сушіння у масо- обмінних модулях при радіаційному теплопідводі (ІЧ- і НВЧ- випромінювання). Встановлено, що основною конструкторською задачею при розробці ЗТП- сушарок безперервної дії є ефективне технічне рішення із трансформування ФМ у такі стрічки чи транспортери, що безупинно рухаються в рівнобіжних площинах. Для цих цілей варто орієнтуватися на конструкції двосторонніх і одnobічних ФМ. Відзначено, що продуктивність безупинних ЗТП- сушарок, віднесена на одиницю площі стрічки чи транспортера, у 2...3 рази вища, ніж у стандартних стрічкових сушарок, а їх універсальність відповідає виробництву асортименту продукції, що виробляється сушильними підприємствами.

У восьмому розділі "Виробничі випробування технології та техніки сушіння у масообмінних модулях" наведене техніко-економічне обґрунтування створення підприємства з виробництва високоякісних сушених продуктів на базі фермерських і індивідуальних господарств. Структура такого підприємства містить у собі: фермерські (індивідуальні) господарства, що виробляють сушені напівфабрикати на універсальних ЗТП- сушарках з власної сировини; головне підприємство, що випускає готову продукцію. З урахуванням потужності електромереж у сільській місцевості, загальну потужність устаткування обрано таку, що не перевищує 30 кВт. Оскільки розбіжності у тривалості сушіння для вивченої сировини незначні, то відзначено можливість проводити процес зневоднювання ні по окремих групах сировини, а одночасно, складаючи з них необхідний набір при відповідних масових співвідношеннях. Тобто, за один цикл одержувати необхідний харчовий концентрат без операції дозування сушених компонентів.

Розроблену технологію можливо використовувати при виробництві:

- порошоків для пюре, натуральних напоїв і натуральних харчових барвників;
- харчових концентратів перших, других страв і напівфабрикатів для десертів;
- сушених напівфабрикатів високого ступеня готовності для організації харчування в особливих кліматичних і виробничих умовах;
- напівфабрикатів швидкого готування для “бістро” і домашнього харчування;
- добавок, сушених пряностей, продуктів харчування лікувально-профілактичної дії.

Наведено відомості про іспити сушильних установок, впроваджених у виробництво технологій і проектно-конструкторської документації. Показано, що конструкторські рішення ЗТП- сушарок не вимагають видозмін допоміжних вузлів і є стандартними для сушильної техніки: вентилятор, привод конвеєра, тепловий пункт, система керування і контролю. Відсутні вузли, які б змінювали вимоги до техніки безпеки, погіршували екологічні показники устаткування чи висували особливі вимоги до виробничих приміщень і інфраструктури підприємства. Усе це підтверджує ефективність і перспективність застосування ЗТП - технології для виробництва сушених харчових продуктів.

ВИСНОВКИ

1. Сформульовано гіпотезу до теорії сушіння, як до процесу тепломасообміну у штучних пристроях - масообмінних модулях. Доведено, що штучні умови для утворення дисипативних структур можуть виключати чи істотно обмежувати негативну роль поверхні матеріалу в процесі

масообміну. Встановлено, що для перевірки гіпотези необхідно використовувати масообмінний модуль, що утворює із зовнішнім середовищем активну границю розділу. Ідентифіковано два основних класи процесу зневоднювання: без зміни агрегатного стану води і сушіння. Визначено, що для сушіння необхідно застосовувати місткість, у якій розташовується сировина, що зневоднюється, - функціональна місткість (ФМ). За цих умов об'єкт сушіння (ФМ з вологим матеріалом) минає стан з максимумом вільної енергії. Принципи створення таких штучних умов для процесу тепломасообміну при сушінні є основою формулювання наукової концепції роботи.

2. Досліджено кінетику та встановлено особливості сушіння окремих видів харчової сировини у ФМ. Встановлено, що усадка сировини під час сушіння в ІФМ призводить до погіршення теплообміну та блокуванню зневоднення. З метою зменшення пластичних властивостей окремих видів сировини запропоновано використовувати їх попереднє заморожування.

Знайдено, що тривалість сушіння в УФМ визначається температурою та швидкістю сушильного агенту. При швидкості сушильного агенту 4,0 ...2,5 м/с тривалість сушіння більша майже на порядок за тривалість сушінням при швидкостях 10...15 м/с. Такий вплив швидкості сушильного агенту на процес сушіння у ФМ є універсальним та не залежить від природи вихідної сировини. Встановлено, що режим сушіння та геометричні розмірами ФМ є зовнішніми, а ступінь дрібнювання та ступінь заповнення ФМ – внутрішніми чинниками, що обумовлюють кінетику і критичні особливості процесу сушіння харчової сировини у ФМ.

Встановлено, що кінетика сушіння в ФМ має три періоди: період нагрівання матеріалу і зростання швидкості сушіння; період максимальної швидкості сушіння; період убутної швидкості сушіння. При цьому перші два періоди є "чутливими" стосовно режиму сушіння і властивостей сировини.

3. Визначено, що кінетика температури сировини має дві характерні критичні точки, одна з яких є максимумом величини температури, а друга - мінімумом. На положення цих точок у координатах температура – час (вологеміст) впливають як зовнішні, так і внутрішні чинники процесу сушіння. Отримано рівняння, які описують положення цих точок у залежності від швидкості сушильного агенту для різних видів харчової сировини.

Встановлено, що при сушінні у ФМ основний потік теплоти до зони випаровування вологи надходить через теплообмінну стінку ФМ. Рушійна сила переносу теплоти (градієнт температури) визначається її розсіюванням у зоні сировини де спостерігається максимальна інтенсивність випаровування вологи. Встановлено, що при сушінні у ФМ визначальними чинниками процесу теплопередачі є ефективний пористий простір та швидкість сушильного агенту. Доведено, що за умов сушіння у ФМ на зовнішній теплообмін не впливає процес масообміну, тому коефіцієнт тепловіддачі можна розраховувати за критеріальними рівняннями для теплообміну з твердою стінкою. Встановлено, що масообмінні зазори збурюють тепловий пограничний шар, тому для розрахунку числа Рейнольдса запропоновано використовувати поправку до швидкості сушильного агенту. Встановлено, що тільки за умов певної швидкості обтікання сушильним агентом масообмінного зазору може бути здійснено процес зневоднення сировини у ФМ.

Знайдено, що на протязі другого періоду сушіння випаровування вологи відбувається за рахунок накопиченої внутрішньої енергії сировини, а сам процес проходить через максимум вільної енергії. Доведено, що висока вологовбирна здатність сушильного агенту обумовлюється зростанням його ентальпії за рахунок теплоти, що надходить через стінку ФМ. Це обумовлює наближення витрат енергії на випаровування вологи при сушінні у масообмінних модулях до питомої теплоти пароутворення.

4. Запропонована термодинамічна модель процесу сушіння заснована на тому, що ФМ має два стани, один з яких хитливий з максимумом вільної енергії, а другий стійкий з мінімумом вільної енергії. Показано, що обидва стани не критичні стосовно температури (до 100°C) і вологості (до 100%) сушильного агенту. Аналізом моделі встановлено, що у процесі сушіння не може існувати періоду постійної швидкості, а основними чинниками процесу є флуктуації зовнішнього середовища у масообмінному зазорі й усередині ФМ. Зовнішні флуктуації обумовлюються вихровою течією сушильного агенту поблизу масообмінного зазору, а флуктуації усередині ФМ –

розвитком поверхні випару. Доведено, що розвиток поверхні випару визначає рівномірність зневоднювання і кінетику температури сировини по зонах. Встановлено, що конвекційна складова у загальному потоці пароповітряної суміші залежить від ефективного пористого простору та опору масообмінного зазору. За умов випаровування потік має упорядкований характер, а без випару - вихровий.

ЯМР- дослідженнями поведження вологи при сушінні встановлено, що вода минає три стійкі рівноважні стани, а перехід між цими станами визначає динаміку взаємодії води з сухою речовиною сировини.

За допомогою розробленої моделі сформульовано принципи сушіння у масообмінних модулях, пояснені всі особливості процесу, що доводить фізичну коректність моделі.

5. Встановлено, що на відновлюваність продукції впливає природа сировини, температура сушіння й ефективний пористий простір. Отримано рівняння для визначення кінетики і тривалості відновлюваності та обчислення рівноважних вологовмістів асортименту продукції.

Вплив процесу, що щадить на зміст біологічно активних речовин, обумовлений низькою інтегральною температурною дією на сировину, малою тривалістю процесу і відсутністю безпосереднього контакту з потоком сушильного агенту. Визначені гранично припустимі величини температури сушіння, що забезпечують збереженість колірної гами продукції. Величини цих температур коливаються в межах 70°C... 85°C та залежать від виду вихідної сировини. Визначено вимоги до пакувальних матеріалів для збереження сушеної продукції.

6. Розроблено універсальну технологічну схему ЗТП- сушіння харчової сировини та вимоги до операцій попередньої підготовки. Складено технологічні карти раціональних режимів сушіння у масообмінних модулях.

Розроблено методику розрахунку сушарок з функціональними місткостями. Доведено, що обов'язковою умовою інженерно-конструкторських рішень є необхідність дотримання вимог до функцій масообмінного модуля. Вибір ефективного способу теплопідводу (у тому числі й радіаційного) та трансформація ФМ у стрічки, що рухаються, є основою для розробки промислових сушарок безупинної дії. За результатами досліджень визначено напрямки розвитку розробленої технології та техніки сушіння харчової сировини.

7. Розроблено техніко-економічне обґрунтування підприємства з виробництва високоякісних сушених харчових продуктів. У структуру підприємства входять фермерські і індивідуальні господарства, де виробляються сушені напівфабрикати, та головне підприємство, яке виробляє готову продукцію у вигляді наборів харчових концентратів, харчових фарбників тощо. Проведені іспити та впровадження у виробництво технологій, проектно-конструкторської документації і сушильного устаткування. Наявні відкриття й акти про впровадження результатів досліджень підтверджують ефективність і перспективність застосування технології і техніки сушіння у масообмінних модулях для виробництва сушених харчових продуктів.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

0. Симовьян С.В., Жуков В.В., Погожих Н.И., Благоразумова О.В. Влияние влажности мясных пищевых продуктов на технологические особенности их обработки в поле СВЧ// Общественное питание. – К.: Техника, 1989.– Вып.25.– С. 67-71.
1. Применение метода ЯМР для исследования водного компонента пирожков печеных/ Жуков В.В., Погожих Н.И., Матяш Е.Т., Шильман Л.З., Постнова О.Н.// Общественное питание. – К.: Техника, 1990.– Вып.26.– С. 105-108.
2. Сухой быстровосстанавливаемый картофель – полуфабрикат высокой степени готовности/ Гришин М.А., Жуков В.В., Погожих Н.И., Кухарчук О.В.// Современные аспекты индустриализации общественного питания: Сб.научн.тр. – Харьков: ХИОП, 1990.– С.92-94.
3. Исследование некоторых качественных показателей сухого высокопористого картофеля/ Гришин М.А., Жуков В.В., Погожих Н.И., Томашевская Р.Я. // Изв.ВУЗов. Пищевая технология.– 1990.–№1.– С.43-45.
4. Погожих Н.И., Червинский Г.Н. Исследование процесса сушки со смешанным теплоподводом//Технология и качество пищевых продуктов: Сб.научн.тр. – Харьков: ХИОП, 1992.– С.10-14.
5. Гришин М.А., Погожих Н.И., Потапов В.А. Тепловая сушка творога//Прогрессивные технологии и формирование рыночных отношений в общественном питании: Сб.научн.тр. – Харьков:ХИОП – 1992.– С.57-60.
6. Исследование качественных показателей сушеных мясных полуфабрикатов высокой степени готовности/ Гришин М.А., Погожих Н.И., Потапов В.А., Шубина Л.Ю. //Прогрессивные технологии и формирование рыночных отношений в общественном питании: Сб.научн.тр. – Харьков: ХИОП, 1992.– С.99-102.
7. Погожих Н.И., Потапов В.А. Экспериментальное моделирование сушки капиллярно-пористых тел со смешанным теплоподводом//Перспективы развития общественного питания: Сб.научн.тр.– Харьков:ХИОП, 1993.– С.40-42.
8. Гришин М.А., Погожих Н.И., Потапов В.А. Особенности кинетики СТП-сушки пищевых растительных материалов// Проблемы общественного питания на пути к рынку: Сб.научн.тр. –Харьков: ХИОП, 1993.- С.167-171.
9. 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.
10. 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.
11. Погожих М.І., Потапов В.О., Сомов О.С. Реалізація процесу ЗТП–сушіння на малогабаритній установці для виробництва високопористого, швидковідновлювального гарбуза//Розвиток масового харчування, готельного господарства і туризму в умовах ринкових відносин: Зб.наук.пр.– Київ: КДТЕУ, 1996.– С.166-170.
12. Разработка рациональных режимов сушки крови убойных животных в зависимости от способа высушивания/ Евлаш В.В., Лерина И.В., Погожих Н.И., Розанова Е.Д. // Актуальні науково-методичні проблеми в підготовці спеціалістів вищої кваліфікації для торгівлі і харчування : Зб.наук.пр. – Харків. : ХДАТОХ, 1997.– Ч. 1. - С. 127-132.
13. Влияние степени заполнения функциональных емкостей на производительность процесса СТП– сушки Черевко А.И., Погожих Н.И., Потапов В.А., Иващенко С. С./ // Актуальні науково-методичні проблеми в підготовці спеціалістів вищої кваліфікації для торгівлі і харчування: Зб.наук.пр.– Харків: ХДАТОХ, 1997.– Ч.1.– С. 157-161.
14. Погожих Н.И., Цуркан Н.М., Потапов В.А. Исследование процесса сушки материалов смешанным теплоподводом вблизи критических режимов// Актуальні науково-методичні про-

блеми в підготовці спеціалістів вищої кваліфікації для торгівлі і харчування / Зб.наук.пр.– Харків: ХДАТОХ, 1997.– Ч.1.– С. 343-346.

15. Погожих Н.И. Основы технологии и техники сушки материалов смешанным теплоподводом // Актуальні науково-методичні проблеми в підготовці спеціалістів вищої кваліфікації для торгівлі і харчування: Зб.наук.пр.– Харків: ХДАТОХ, 1997.– Ч.1. – С. 358-361.

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

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

18. Погожих Н.И., Цуркан Н.М., Потапов В.А. Изучение процесса СТП– сушки модельного тела при переменных режимах// Прогресивні ресурсо- зберігаючі технології та їх економічна обґрунтованість у підприємствах харчування. Економічні проблеми торгівлі: Зб.наук.пр. – Харків: ХДАТОХ, 1998.– Ч.1.- С.108-111.

19. Погожих Н.И. Косвенный метод изучения кинетики конвективной сушки материалов // Прогресивні ресурсозберігаючі технології та їх економічна обґрунтованість у підприємствах харчування. Економічні проблеми торгівлі: Зб.наук. пр.– Харків: ХДАТОХ.– 1998.– Ч. 1- С. 111-114.

20. 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.

21. Погожих Н.И., Сомов А.С., Потапов В.А. Распределение статического давления на поверхности функциональной емкости// Прогресивні ресурсо- зберігаючі технології та їх економічна обґрунтованість у підприємствах харчування. Економічні проблеми торгівлі: Зб.наук.пр. – Харків: ХДАТОХ, 1998.– Ч. 1.– С.140-143.

22. Вміст та структура вологи у кулінарних виробках із ферментованого м'яса / Жуков В.В., Коваленко В.О., Леріна І.В, Погожих М.І. // Удосконалення технології та організації масового харчування готельного господарства і туризму: Зб.наук.пр.– Київ: КДТЕУ, 1998.– С.108-111.

23. Цуркан Н.М., Погожих Н.И., Потапов В.А. Влияние степени заполнения функциональных емкостей на кинетику СТП–сушки// Нові технології та удосконалення процесів харчових виробництв: Зб.наук.пр. – Харків: ХДАТОХ, 1999.– С. 171-174.

24. Погожих Н.И. Особенности теплообменных процессов при сушке смешанным теплоподводом// Нові технології та удосконалення процесів харчових виробництв: Зб.наук.праць- Харків: ХДАТОХ, 1999.– С. 204-208.

25. Цуркан Н.М., Погожих Н.И., Потапов В.А. Экспериментальный метод определения эффективных теплообменных характеристик капиллярно-пористых тел// Технологии в машиностроении: Весник ХГПУ.– Харьков: ХГПУ, 2000.– Вып.89.–С. 57-60.

26. Постнов Г.М., Погожих Н.И., Варыпаева Л.М. Разработка технологии производства пищевых концентратов и их применение// Прогресивні технології та удосконалення процесів харчових виробництв: Зб.наук.пр.– Харків: ХДАТОХ, 2000.– Ч. 1.– С. 100-104.

27. 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. 16-20.

28. Погожих Н.И. Механизмы теплообмена при СТП–сушке //Прогресивні технології та удосконалення процесів харчових виробництв: Зб.наук.пр.– Харків: ХДАТОХ.- 2000. – Ч. 2.– С. 49-53.

29. 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.

30. Гришин М.О., Погожих М.І., Потапов В.О. Модель процесу сушіння змішаним теплоподводом // Наукові праці: Зб.наук.пр.– Одеса: ОДАХТ, 2001.– Вип.22.- С.17-20 .

31. Гришин М.А., Погожих Н.И., Потапов В.А. Модель динамического структурирования влаги в процессе сушки //Промышленная теплотехника.- 2001.- Т.23.- № 4-5.- С. 100-105.

32. Погожих Н.И. Образование диссипативных структур и температура материала в процессе сушки смешанным теплоподводом // Прогресивні ресурсозберігаючі технології та їх економічне обґрунтування у підприємствах харчування. Економічні проблеми торгівлі: Зб.наук.пр.– Харків: ХДАТОХ, 2001.– Ч. 1.– С. 322-327.

33. Способ сушки картофеля : А.с. 1517902 СССР, МКИ А 23 В 7/03, А 23 L 1/216 / М.А. Гришин, Н.И. Погожих, В.В. Жуков (СССР).- № 43001883/13; Заявл. 22.06.88; Опубл. 22.6.89, Бюл. №40.– 3с.

34. 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.

35. Гришин М.А., Жуков В.В., Погожих Н.И. Влияние температуры на продолжительность сушки картофеля// Труды Всес. науч.-техн. конф. ”Проблемы влияния тепловой обработки на пищевую ценность продуктов питания” – Харьков: ХИОП.– 1990.– С. 231-232.

36. Гришин М.А., Погожих Н.И., Шубина Л.Ю. Сушеное вареное мясо и его применение в общественном питании// Труды Всес. науч.-техн. конф. ”Проблемы влияния тепловой обработки на пищевую ценность продуктов питания”.– Харьков: ХИОП– 1990.– С. 374-375.

37. Погожих Н.И. Технология и особенности процесса сушки со смешанным теплоподводом// Труды Всес. науч.-техн. конф. ”Разработка комбинированных продуктов питания. (Медико-биологические аспекты, технология, аппаратурное оформление, оптимизация)”.– Кемерово:КемТИПП.– 1991.– С.110-112.

38. Research of the drying process of materials by mixed heat transfer / Grishin M.A., Zhukov V.V., Pogozhik N.I., Potapov V.A. // Abstracts of Reports International conference “Heat and Mass Transfer in Technological Process”.– Jurmala.- 1991.– P.13–15.

39. Гришин М.А., Жуков В.В., Погожих Н.И. Технология получения картофельного порошка// Труды Всес. науч.-техн. конф.”Механика сыпучих материалов”.– Одесса: ОТИПП– 1991.– С.210.

40. Гришин М.А., Погожих Н.И., Жуков В.В. Формирование структуры материала в процессе сушки// Труды 2-ого Междун. форума ”Тепломассообмен”.– Киев: ИТТФ НАН Украины.– 1992.– С.63-65.

41. Погожих Н.И. Динамический характер поведения влаги в полидисперсных системах при сушке// Труды 2-огоМеждун. форума ”Тепломассообмен”.– Киев:ИТТФ НАН Украины.– 1992.– С.217-219.

42. Погожих Н.И., Потапов В.А., Сомов А.С. Особенности производства сушеных быстровосстанавливаемых продуктов на сушильной установке со смешанным теплоподводом// Праці Міжн. наук.-пр. конф. ”Розвиток масового харчування, готельного господарства і туризму в умовах ринкових відносин”.– Київ:КДТЕУ.– 1994.– С.95.

43. Гришин М.А., Погожих Н.И., Потапов В.А. О механизме колебательного фильтрационного переноса в процессе сушки со смешанным теплоподводом// Труды Междун. конф ”Перспективы развития массового питания и торговли в условиях перехода к рыночной экономике”.– Харьков:ХГАТОП– 1994.– С.63-64.

44. Погожих Н.И., Потапов В.А. Исследование давления внутри материала при СТП–сушке// Труды науч.-практ. конф. ”Потребительская кооперация в переходный период. Проблемы и перспективы”.– Полтава:ПКИ.– 1995.– С.86.

45. Влияние функциональных емкостей на кинетику СТП–сушки/ Черевко А.И., Погожих Н.И., Потапов В.А., Иващенко С.С. // Праці ІХ Міжн. конф. ”Удосконалення процесів та апаратів

хімічних, харчових та нафтохімічних виробництв”.– Частина 2.– Одеса: ОДАХТ.– 1996.– С.65.

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

47. Погожих Н.И., Цуркан Н.М., Потапов В.А. Інтенсифікація процесу ЗТП–сушіння термостатуванням// Праці наук.-практ. конф. до 30-річчя ХДАТОХ ”Стан та проблеми розвитку торгівлі й харчування в Україні”.– Харків:ХДАТОХ.– 1997.– С.47-48.

АНОТАЦІЯ

Погожих М.І. Наукові основи теорії та техніки сушіння харчової сировини у масообмінних модулях. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.18.12 – процеси та обладнання харчових, мікробіологічних та фармацевтичних виробництв. – Харківська державна академія технології та організації харчування Міністерства освіти і науки України, Харків, 2002.

Дисертацію присвячено розробці теорії сушіння у масообмінних модулях, теоретичному та експериментальному обґрунтуванню раціональних режимів виробництва асортименту сушених харчових продуктів. На підставі положень нерівноважної термодинаміки знайдено умови, за яких процеси тепло- і масообміну при сушінні можуть бути значно інтенсифіковані. Реалізувати ці умови запропоновано у масообмінному модулі, який є моделлю реальних пристроїв. У разі використання гарячого повітря, як теплоносія, цей пристрій названо функціональною місткістю (ФМ), а спосіб - сушіння змішаним теплопідводом (ЗТП). Доведено, що ФМ із сировиною треба розглядати як об’єкт сушіння, а кінетика і критичні особливості процесу залежать як від зовнішніх, так і від внутрішніх чинників здійснення процесу. Встановлено, що гідродинаміка обтікання масообмінного зазору ФМ є визначальним чинником процесу. Термодинамічна модель процесу стверджує, що ФМ має два стани, один з яких хитливий з максимумом вільної енергії, а другий - стійкий з мінімумом вільної енергії. Наведена модель формулює принцип сушіння у ФМ: створення зовнішніх умов для переходу системи зі слабовідкритого у відкритий стан; створення внутрішніх умов для підтримки нерівноваги на відрізку часу, достатньому для повного здійснення процесу. Перше стосується задач сушильної техніки, друге - технології сушіння. Дослідженнями і впровадженнями у виробництво доведено високу ефективність ЗТП- сушіння.

Ключові слова: масообмінний модуль, функціональна місткість, сушіння змішаним теплопідводом.

АННОТАЦИЯ

Погожих Н.И. Научные основы теории и техники сушки пищевого сырья в массообменных модулях. – Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.18.12 – процессы и оборудование пищевых, микробиологических и фармацевтических производств. – Харьковская государственная академия технологии и организации питания Министерства образования и науки Украины, Харьков, 2002.

Диссертация посвящена разработке теории процесса сушки в массообменных модулях, создания научной концепции расчетов сушилок с массообменными модулями, теоретическому и экспериментальному обоснованию рациональных режимов производства ассортимента сушеных пищевых продуктов. С этой целью выдвинута гипотеза о возможности и эффективности осуществления обезвоживания сырья через состояние с максимумом свободной энергии. На основании положений неравновесной термодинамики определены условия, при которых процесс тепло- и массообмена при сушке может быть значительно интенсифицирован. Реализовать все эти условия предложено в так называемых массообменных модулях, типы которых являются моделями реальных устройств. В случае использования горячего воздуха, как теплоносителя, эти

устройства названы функциональными емкостями (ФЕ), а способ - сушка смешанным теплоподводом (СТП). Приведена классификация типов массообменных модулей и видов функциональных емкостей. Изучением кинетики сушки пищевого сырья найдено, что основное влияние на сушку в индивидуальных ФЕ оказывает природа исходного сырья, а на сушку в двусторонних и односторонних ФЕ - скорость и температура сушильного агента, геометрические размеры ФЕ, измельчение и степень заполнения ФЕ. Доказано, что ФЕ с материалом, который обезвоживается, следует рассматривать как объект сушки, а кинетика и критические особенности процесса зависят как от внешних, так и от внутренних факторов процесса. При этом если теплофизические свойства различных видов сырья, обезвоживаемого в ФЕ, близки, то продолжительность сушки не зависит от вида сырья. Этот факт обусловлен тем, что сам обезвоживаемый материал определяет лишь внутренние теплообменные характеристики объекта сушки. Получены уравнения для определения величины коэффициента теплопередачи в процессе сушки. Введены безразмерные комплексы, которые отображают влияние энтальпии поступающего во внутрь ФЕ сушильного агента и развивающегося пористого пространства за счет объемной усадки сырья. Доказано, что коэффициент теплоотдачи горячего воздуха можно рассчитывать как для "сухого" теплообмена. Установлено, что гидродинамика обтекания массообменного зазора ФЕ является определяющим фактором процесса сушки в массообменных модулях. Получено уравнение, отображающее феноменологическое требование к скорости потока воздуха вблизи массообменных зазоров ФЕ. Предложенная термодинамическая модель процесса сушки в массообменных модулях основана на том, что система "ФЕ + обезвоживаемый материал" имеет два состояния, одно из которых неустойчивое с максимумом свободной энергии, а второе устойчивое с минимумом свободной энергии. Первое состояние характерно для начального периода сушки и является чувствительным по отношению к условиям проведения процесса. Анализом модели установлено, что в процессе сушки не может существовать периода постоянной скорости или его продолжительность мала, а основными условиями протекания процесса являются флуктуации внешней среды вблизи массообменного зазора и в сырье внутри ФЕ. Введение функции развития поверхности испарения (диссипативных структур) дало возможность прогнозировать и выполнять численную оценку равномерности обезвоживания и кинетики температуры сырья по зонам. Полная физическая модель процесса формулирует принципы сушки в ФЕ: создание внешних условий для перехода системы из слабооткрытого в открытое состояние; создание внутренних условий для поддержания неравновесия на отрезке времени, достаточном для полного осуществления процесса. Первый принцип относится к задачам сушильной техники, второй - к технологии сушки. С помощью модели объяснены такие особенности процесса, как блокировка, срыв и трансформация в конвективную сушку. Исследованиями показателей качества сушеной продукции установлено, что щадящее влияние процесса на содержание биологически активных веществ обусловлено низким интегральным температурным воздействием на сырье, малой продолжительностью и отсутствием непосредственного контакта с потоком сушильного агента. Определены предельно допустимые температуры сушки, которые обеспечивают сохранность цветовой гаммы продукции. Показано, что рациональные режимы сушки различных материалов характеризуются затратами энергии от 7,5 МДж до 24,0 МДж на 1 кг сушеного продукта. Разработано технико-экономическое обоснование создания предприятия для производства высококачественных сушеных пищевых продуктов. Ожидаемая прибыль 45000...50000 усл.ед. Срок реализации проекта - 6...8 месяцев. Срок окупаемости капиталовложений - 10...13 месяцев. Проведены испытания и внедрение в производство технологий, проектно-конструкторской документации и сушильного оборудования. Определены перспективные направления развития СТП-технологий для производства широкого ассортимента пищевой продукции.

Ключевые слова: массообменный модуль, функциональная емкость, сушка смешанным теплоподводом.

SUMMARY

Pogozhikh N.I. Scientific bases of the theory and drying techniques of food raw materials in masstransfer modules. -Manuscript.

Thesis for a doctor's degree by specialty 05.18.12 - processes and equipment of food, microbiologic and pharmaceutical productions. Kharkiv State Academy of Food Technology and Management Ukrainian Education and Science Administration, Kharkiv, 2002.

The thesis is devoted to elaboration of the theory of drying process in masstransfer modules, theoretical and experimental basing of rational processing of dried food assortment. On the bases of regulations irreversible thermodynamics found the conditions, with which the process of heat and masstransfer can be considerably intensified. It is proposed to effect these conditions in the so called masstransfer modules, which are the models of real devices. In the case of using of hot air as dryers agent this device is called functional capacity (FC) and the method - drying by mixed heattransfer (MHT). It has been proved, that FC with the raw material, should be investigated as a drying object, and kinetics and critical peculiarities of the process depend both on external and internal factors of the process realization. It has been determined, that hydrodynamics of the flow masstransfer gap of FC is the attributive drying factor. Thermodynamics model of the drying process based on the fact, that FC has two conditions: one of which unstable with maximum of free energy the other one is stable with minimum of free energy has been suggested. The full physical model formulates the principle of the drying in FC: the creation of external conditions for transition of system from weak-open to open condition; creation of internal conditions for maintenance of unequilibrium on interim, which is sufficient for realization of the process to end. The first refers upon tasks of the drying engineering, the other one - to the drying technology. By researches and inculcation's into production effectiveness MHT- drying has been proved.

Key words: masstransfer module, functional capacity, drying with mixed heattransfer.

Підп. до друку 23.04. 2002 р. Формат 60×84 1/16. Папір офсет.

Обл.-вид.2.0. Ум.друк.арк.1,9. Ум.фарб.відб.1,9.

Тираж 100 прим. Зам. № 129

ДОД ХДАТОХ, 61051, Харків-51, вул. Клочківська,333