

**ХАРКІВСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ХАРЧУВАННЯ ТА ТОРГІВЛІ**

ПОПЕРЕЧНИЙ АНАТОЛІЙ МИКИТОВИЧ

УДК 664.084

**НАУКОВЕ ОБГРУНТУВАННЯ ВПЛИВУ МЕХАНІЧНИХ
КОЛИВАНЬ НА ІНТЕНСИФІКАЦІЮ ПРОЦЕСІВ ПЕРЕРОБКИ
ХАРЧОВОЇ СИРОВИНИ**

Спеціальність 05.18.12 – процеси й обладнання харчових,
мікробіологічних і фармацевтичних
виробництв

Автореферат

дисертації на здобуття наукового ступеня
доктора технічних наук

Харків – 2004

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Донецькому державному університеті економіки і торгівлі ім. М. Туган-Барановського Міністерства освіти і науки України.

Науковий консультант: доктор технічних наук, професор, заслужений діяч науки і техніки України **Черевко Олександр Іванович**, Харківський державний університет харчування та торгівлі, ректор, завідувач кафедри процесів, апаратів та автоматизації харчових виробництв.

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор

Буляндра Олексій Федорович,

Національний університет харчових технологій,
професор кафедри теплотехніки;

доктор технічних наук, професор

Калінін Лев Георгійович,

Одеська національна академія харчових технологій,
професор кафедри процесів та апаратів;

доктор технічних наук, доцент

Погожих Микола Іванович,

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

Провідна установа: Український державний хіміко-технологічний університет Міністерства освіти і науки України, м. Дніпропетровськ, кафедра обладнання і технології харчових виробництв.

Захист відбудеться "24" червня 2004 р. об 11⁰⁰ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д.64.088.01 Харківського державного університету харчування та торгівлі за адресою: вул. Клочківська, 333, 61051, м. Харків.

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

Автореферат розісланий "21" травня 2004 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради

Михайлов В.М.

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Переробка сільськогосподарської сировини і виробництво продуктів харчування відносяться до числа одних з самих енергоємних технологічних процесів з підвищеними вимогами до кінцевого продукту. В даний час у переробних галузях АПК губиться до 40 % сировини, спостерігається тенденція постійного росту енергетичної складової в собівартості продуктів харчування, що досягає до 20 %. З огляду на це, гостро стають проблеми створення і впровадження сучасних технологій, що забезпечують скорочення енергоспоживання в сполученні з заощадженням сировини й інших ресурсів, удосконалення обладнання по переробці харчової сировини.

Одним із перспективних напрямків в удосконаленні обладнання по переробці харчової сировини, як в Україні так і за її межами, є створення апаратів з активними гідродинамічними режимами, в яких досягається значна інтенсифікація процесів, перш за все – тепло- та масообміну. Активні гідродинамічні режими можуть бути досягнуті за рахунок застосування низькочастотних механічних коливань – вібрацій. Разом із цим недостатні знання в області теорії і техніки з застосуванням вібрацій гальмують їх впровадження у виробництво прогресивного обладнання. Тому розвиток наукових досліджень по впливу механічних коливань на інтенсифікацію процесів харчової технології з розробкою високопродуктивного вібраційного обладнання, яке дозволяє значно знизити витрати енергетичних і матеріальних ресурсів, є актуальною науково-прикладною проблемою.

Актуальною задачею, що стоїть перед наукою і практикою харчування, є вирішення проблеми дефіциту тваринних білків, забезпечення збалансованого харчування, захисту населення від негативного впливу забруднень навколишнього середовища після Чорнобильської катастрофи. Вирішення цієї проблеми можливо за рахунок використання в харчуванні нетрадиційної харчової сировини і напівфабрикатів рослинного та тваринного походження. До такої сировини можна віднести бульйони після варення субпродуктів на підприємствах м'ясної промисловості, більша частина яких направляється в каналізаційну систему, або в кращому разі – на корм худобі. Покращення їх якості з метою подальшого використання в харчових цілях потребує вирішення питань миття субпродуктів перед їх варенням та концентрування одержаних при варенні бульйонів. Не менш важливою харчовою сировиною зі значним вмістом білка є соя. Незважаючи на широке використання сої в харчуванні інших країн (особливо США), в Україні переробці цієї рослини не приділяється достатньої уваги. Нетрадиційною харчовою сировиною в її використанні є також глід, топінамбур, пшениця та інші рослини.

Наукове обґрунтування впливу механічних коливань на інтенсифікацію ряду процесів харчової технології, розробка високопродуктивного вібраційного устаткування, а також використання високого потенціалу нетрадиційної харчової сировини на харчові цілі - проблеми, що є визначальними в даній роботі.

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

Робота виконувалась у відповідності з комплексними науковими програмами досліджень по держбюджетним НДР Г-83-27 “Модернізація схем і режимів роботи технологічних машин з метою підвищення їх ефективності” (№ ГР 0060304, 1985 р.), Г-86-16 “Дослідження технічних і експлуатаційних характеристик і оцінка

ефективності обладнання для технологічної обробки овочів” (№ ГР 01.86.0077157, 1987 р.), Г-8-26 “Розробка нового і удосконалення існуючого обладнання для технологічної обробки овочів з метою підвищення його ефективності” (№ ГР 01.88.0025618, 1990 р.), Г-91-19 “Підвищення технічного рівня торгівельно-технологічного обладнання” (№ ГРА 01001339Р, 1995 р.), Г97-1 “Підвищення технічного рівня та конкурентоспроможності технологічного обладнання підприємств масового харчування і торгівлі та наукове обґрунтування напрямків виробництва цього обладнання” (№ ГР 0197U008146, 1999 р.), Г-97-5 “Розробка і дослідження перспективних зразків машин і апаратів харчових виробництв” (№ ГР 0100U005073, 2001 р.), Д–2003-1 “Розробка та наукове обґрунтування створення нових видів технологічного обладнання для обробки сипкої харчової сировини”, затвердженим Вченою радою Донецького державного університету економіки і торгівлі ім. М. Туган-Барановського протягом 1986-2003 років. Крім того, робота тематично пов’язана з загальнодержавною програмою щодо поліпшення продовольчого забезпечення населення України.

Мета і задачі дослідження. Метою дослідження є наукове обґрунтування впливу механічних коливань на інтенсифікацію гідромеханічних та тепло-, масообмінних процесів переробки харчової сировини, який дозволяє знизити питомі витрати енергетичних, матеріальних ресурсів і покращити якість продуктів.

Відповідно до цієї мети були поставлені й вирішені такі основні задачі:

- проаналізувати стан проблеми інтенсифікації гідромеханічних і тепло-, масообмінних процесів і обґрунтувати застосування механічних коливань з метою зниження витрат енергетичних і матеріальних ресурсів;
- теоретично обґрунтувати вплив механічних коливань на процес миття харчової сировини та визначити параметри роботи мийної машини з віброючим робочим органом;
- провести експериментальне дослідження адгезійного зв’язку забруднень з субпродуктами м’ясопереробних виробництв, вібраційного транспортування та миття субпродуктів;
- теоретично та експериментально дослідити вплив пульсуючих потоків (вібрацій) на процес ультрафільтраційного концентрування рідинних продуктів – м’ясо-кісткових бульйонів, соєвого молока і вторинної молочної сировини;
- теоретично та експериментально дослідити вплив механічних коливань на гідродинаміку та кінетику тепло-, масообміну при конвективному сушінні рослинних матеріалів в аеровіброкиплячому шарі (АВКШ);
- теоретично та експериментально дослідити тепло-, масообмін при сушінні та термічній обробці продуктів у віброкиплячому шарі (ВКШ) ІЧ-випромінюванням;
- розробити конструкції прогресивних вібраційних апаратів для сушіння і термічної обробки рослинної сировини, миття субпродуктів, ультрафільтраційного концентрування рідинних продуктів та дослідити експериментальні зразки;
- організувати комплекс заходів щодо впровадження результатів роботи в практику підприємств по переробці харчової сировини.

Об’єкт дослідження – гідромеханічні, тепло-, масообмінні процеси переробки харчової рослинної та тваринної сировини із застосуванням механічних коливань.

Предмет дослідження – харчова сировина рослинного та тваринного походження.

Методи дослідження – планування проведення експериментів, статистичного аналізу, аналітичні та експериментальні способи визначення впливу вібрацій на інтенсифікацію процесів, методи оптимізації в моделюванні технологічних процесів з використанням комп'ютерних технологій.

Наукова новизна одержаних результатів полягає у вирішенні науково-прикладної проблеми зниження енергетичних і матеріальних витрат при здійсненні технологічних процесів миття м'ясних продуктів, ультрафільтраційного концентрування біологічних рідин, а також сушіння і термічної обробки харчової сировини. В основу теоретичних і експериментальних досліджень покладено наукову концепцію, яка полягає в інтенсифікації процесів переробки харчової сировини за допомогою застосування низькочастотних механічних коливань (вібрацій), що забезпечує зниження енергетичних і матеріальних витрат.

На підставі проведених теоретичних та експериментальних досліджень вперше:

- теоретично обґрунтовано вплив механічних коливань на інтенсифікацію процесу миття харчової сировини;
- теоретично обґрунтовано вібраційне транспортування субпродуктів, визначено вплив параметрів вібрацій (частоти, амплітуди та прискорення вібрацій) на процес транспортування і миття субпродуктів;
- теоретично обґрунтовано вплив низькочастотних механічних коливань (вібрацій) на процес ультрафільтраційного концентрування біологічних рідин;
- теоретично обґрунтовано процес комбінованої термічної обробки та сушіння харчових продуктів з використанням ІЧ-нагрівання та віброкиплячого шару (ВКШ);
- теоретично обґрунтовано вплив низькочастотних механічних коливань газорозподільної решітки на процес конвективного сушіння дисперсних харчових матеріалів в псевдозрідженому шарі.

Новизна запропонованих технічних рішень підтверджена 3 авторськими свідоцтвами СРСР, також отримано 2 деклараційних патенти України на винахід.

Практичне значення одержаних результатів. На основі результатів проведених теоретичних і експериментальних досліджень:

- визначено раціональні режими ультрафільтраційного концентрування біологічних рідин (м'ясо-кісткових бульйонів, соєвого молока і сколотин);
- визначено раціональні параметри вібраційного транспортування і миття м'ясних продуктів (зокрема, яловичих субпродуктів);
- визначено раціональні параметри конвективного сушіння рослинних матеріалів в аерокиплячому шарі (АКШ) і АВКШ; визначений вплив параметрів вібрації на властивості ВКШ матеріалу;
- розроблені та практично впроваджені комбіновані процеси сушіння та термічної обробки харчової сировини з використанням ІЧ-нагрівання та ВКШ;
- запропоновані технологічні схеми безвідходного виробництва соєвих продуктів та м'ясо-кісткових бульйонів;
- розроблена технологічна інструкція по виготовленню карамелі “фруктово-ягідна з глідом”;

– розроблена і передана для використання конструкторська документація на нові апарати безперервної дії для переробки харчової сировини з використанням вібрацій – апарат жарильний вібраційний АЖВ-1, сушарку з АВКШ, вібраційну машину для миття субпродуктів, апарат для вібропросіювання і радіаційного сушіння крохмалю та три апарати для ультрафільтраційного концентрування біологічних рідин.

Наукові результати, одержані при виконанні дисертаційної роботи, можуть бути рекомендовані для використання в науково-дослідних і проектно-конструкторських установах харчового машинобудування, а також у вищих навчальних закладах III і IV рівнів акредитації, що займаються підготовкою спеціалістів у галузі розробки та експлуатації обладнання харчових виробництв.

Реалізація результатів роботи. Розроблені технологічні схеми та апарати для переробки харчової сировини з використанням вібрацій впроваджено на таких підприємствах України:

– АТВТ “Донецький завод “Продмаш” – апарат жарильний вібраційний АЖВ-1 (акт впровадження від 20.12.1999 р.), ультрафільтраційний модуль з пульсуючою подачею вихідної рідини (акт впровадження від 15.04.2003 р.), пристрій для ультрафільтрації біологічних рідин (акт впровадження від 15.04.2003 р.);

– ТОВ “Донецький м’ясопереробний комбінат” – вібраційний устрій для миття субпродуктів (акт впровадження від 18.04.2002 р.), технологія і обладнання безвідходного виробництва бульйонів (акт впровадження від 25.04.2003 р.);

– АТ “Кондитерська фабрика АВК” (м. Донецьк) – апарат для вібропросіювання та радіаційного сушіння крохмалю (довідка від 21.10.2003 р.), рецептура і технологічна інструкція по виготовленню карамелі “фруктово-ягідна з глідом” (акт впровадження від 02.08.2002 р.);

– НПП „УкрПромСою” (м. Донецьк) – технологія і обладнання безвідходного виробництва соєвих продуктів (акт впровадження від 27.05.2003 р.);

– ТОВ “Фірма ВІ-ВА-ЛТД” (м. Донецьк) – сушильно-охолоджувальний апарат вібраційний СОАВ (акт впровадження від 18.10.2001 р., акт випробування від 21.11.2002 р.);

– ЗАТ „Геркулес” (м. Донецьк) – вібраційний устрій для миття субпродуктів (акт впровадження від 14.01.2003р.), випуск дослідно-промислової партії морозива вершкового з соєвими горішками (акт впровадження від 14.06.2001 р.)

– ВАТ "Донецький булочно-кондитерський комбінат" – випуск дослідно-промислової партії торта "Шахтарський" із соєвими горішками (акт впровадження від 18.02.2000 р.)

Окремі результати дисертаційної роботи використані в підручнику “Процеси і апарати харчових виробництв” та навчальному посібнику “Курсове проектування торгово-технологічного обладнання” (загальним обсягом 35,8 д.а.), рекомендованими Міністерством освіти і науки України для студентів вищих навчальних закладів освіти III і IV рівнів акредитації, які готують спеціалістів за напрямком "Харчова технологія та інженерія" (довідка про впровадження в навчальний процес № 13.02/60 від 31.12.2003 р. ДонДУЕТ).

Особистий внесок здобувача полягає в аналізі стану проблеми, формулюванні і доказі наукових положень дисертації, постановці задач і 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 і проведенні заходів із упровадження науково-технічних розробок у виробництво.

Апробація результатів дисертації. Основні положення дисертаційної роботи доповідались, обговорювались з 1986 по 2003 рр. і отримали позитивні оцінки на:

- Республіканській науково-технічній конференції “Розробка прогресивних способів сушіння різних матеріалів та виробів на основі досягнень теорії тепло- та масообміну” (Черкаси, 1987);
- 2-ій Всесоюзній науковій конференції “Проблеми індустріалізації громадського харчування країни” (Харків, 1989);
- Шостій Всесоюзній науково-технічній конференції “Електрофізичні методи обробки харчових продуктів та сільськогосподарської сировини” (Москва, 1989);
- Всесоюзній науковій конференції “Проблеми впливу теплової обробки на харчову цінність продуктів харчування” (Харків, 1990);
- Всесоюзній конференції “Механіка сипких матеріалів” (Одеса, 1991);
- Міжнародній конференції “Перспективи розвитку масового харчування та торгівлі в умовах переходу до ринкової економіки” (Харків, 1994);
- 9 міжнародній конференції “Удосконалення процесів та апаратів хімічних, харчових та нафтохімічних виробництв” (Одеса, 1996);
- науково-практичній конференції “Стан і проблеми розвитку торгівлі й харчування в Україні” (Харків, 1997);
- III Міжнародній науково-практичній конференції “Продовольчий ринок та проблеми здорового харчування” (Орел, 2000);
- II та III міжнародних науково-практичних конференціях “Актуальні проблеми харчування: технологія та обладнання, організація і економіка” (Слав’яногірськ, 2001 і 2003 рр.);
- Міжнародній науковій конференції “Теоретичні і практичні аспекти застосування методів інженерної фізико-хімічної механіки з метою удосконалення та інтенсифікації технологічних процесів харчових виробництв” (Москва, 2002);
- III Міжнародній науково-практичній конференції “Сучасні проблеми технології та механізації процесів переробних і харчових виробництв” (Харків, 2003);
- Міжнародній науково-технічній конференції “Гірнична енергомеханіка та автоматика” (Донецьк, 2003);
- Міжнародній науково-практичній конференції “Управлінські та технологічні аспекти розвитку підприємств харчування і торгівлі” (Харків, 2003);
- науково-практичних конференціях професорсько-викладацького складу ДонДУЕТ ім. М. Туган-Барановського (раніше – Донецького державного комерційного інституту та Донецького інституту радянської торгівлі) протягом 1986-2003 рр.

Публікації. За результатами досліджень опублікована 51 наукова праця, у тому числі: 1 підручник, 1 навчальний посібник, 29 статей, 3 авторських свідоцтва СРСР та 2 деклараційні патенти України на винахід, 15 тез доповідей на конференціях. Без співавторів опубліковано 14 робіт.

Структура та обсяг роботи. Дисертаційна робота складається з вступу, 7 розділів, висновків, списку використаних джерел і додатків. Дисертація викладена на 372 сторінках машинописного тексту, містить 34 таблиці і 95 рисунків, 24 додатки. Список використаних джерел містить 507 найменувань, з них 46 іноземних.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обгрунтовано актуальність вибраного напрямку дисертаційної роботи, сформульовано мету і задачі дослідження, викладено наукову новизну і практичне значення одержаних результатів, наведено відомості про їх практичне впровадження.

У першому розділі “Сучасний стан проблеми застосування механічних коливань при переробці харчових продуктів” показано, що вібраційні процеси завоювали одне із важливіших місць в техніці і є одними із найбільш універсальних за застосуванням. За допомогою механічних коливань (вібрацій) розрушують і ущільнюють дисперсні матеріали, знижують ефективну в'язкість продуктів (наприклад, в кондитерському виробництві), ріжуть метал, інтенсифікують різноманітні фізичні і хімічні процеси – екстрагування, теплообмін, сушіння та інші. Головною характерною особливістю вібрацій як одного із видів механічної дії є можливість передачі продуктам, що обробляються, енергії великої питомої потужності. Разом з цим можливість регулювання параметрів вібрацій (частот та амплітуд) в широких межах дозволяє розповсюдити її дію як на значні об'єми продукції, так і, навпаки, в випадку необхідності обмежитись шаром в декілька мікрон, який безпосередньо прилягає до віброуючої поверхні. Суттєвий внесок в розвиток вібротехніки внесли вчені І.І. Блехман, В.В. Гортинський, І.Ф. Гончаревич, Г.Ю. Джанелідзе, В.А. Повідайло, М.Б. Урьєв, В.А. Членов та інші. Вперше роботи по застосуванню вібрацій в технологічних процесах були узагальнені в монографіях В.А. Членова і М.В. Михайлова, які вийшли з друку в 1967 і 1972 рр. Питаннями застосування вібрацій в механічних та гідромеханічних процесах харчової технології займались М.А. Буренков, В.В. Гортинський, К.І. Пазирук, М.А. Талейсник, Н.Б. Урьєв, в процесах тепло- і масообміну (особливо сушіння) – А.С. Гінзбург, М.О. Гришин, О.П. Калиновська, А.С. Зелепуга, А.П. Рисін, Л.А. Орлов, А.І. Чернявський, А.А. Долінський, Г.Е. Лимонов та інші.

Наведено відомості щодо стану проблеми застосування механічних коливань в технологічних процесах харчової технології та відзначені пріоритетні науково-технічні рішення, що сприяють підвищенню ефективності процесів та обладнання по обробці харчової сировини. Узагальнення цих даних дало можливість сформулювати задачі досліджень, що спрямовані на досягнення мети дисертаційної роботи.

У другому розділі “Наукове обгрунтування впливу механічних коливань на процеси переробки харчової сировини” на основі виявлення фізичної сутності процесів створені математичні моделі, які відображають вплив механічних коливань на ряд гідродинамічних та тепло-, масообмінних процесів харчової технології. Зокрема, вивчено вплив механічних коливань на процеси миття, ультрафільтраційного концентрування, сушіння та термічної обробки харчової сировини.

Теоретичні дослідження процесу миття харчової сировини (на прикладі субпродуктів) полягали у визначенні імпульсів миттєвих сил тиску на плівку бруду, швидкості вібраційного транспортування і продуктивності мийної машини з віброуючим робочим органом, а також розрахунку потужності інерційного приводу цієї машини.

На рис. 1 і 2 наведені розрахункові схеми теоретичних досліджень.

Рис. 1. Розрахункова схема вібро-
транспортування тіла при
струминному митті

Рис. 2. Розрахункова схема вібролотка
з інерційним вібратором

З метою інтенсифікації процесу миття, якість якого визначається кількістю імпульсів миттєвих сил тиску на плівку бруду, аналітичне дослідження вібраційного транспортування продукту передбачає інтенсивне підкидання останнього, кратне періоду вимушених коливань. Рух тіла при цьому розділено на дві ділянки: сумісний з поверхнею лотка, який вібрує, та вільний рух, який називається “польотом” (рис. 1).

Для першої ділянки рівняння руху тіла відносно поверхні вібруючого за законом $S = A \cdot \sin \omega t$ лотка записується як:

$$m\ddot{x} = mA\omega^2 \sin \omega t \cos \beta - mg \sin \alpha + fN; \quad (1)$$

$$m\ddot{y} = mA\omega^2 \sin \omega t \sin \beta - mg \cos \alpha + N. \quad (2)$$

В цих рівняннях m – маса тіла; A – амплітуда коливань; ω – кругова частота коливань; N – нормальна реакція поверхні лотка; f – коефіцієнт тертя; α – кут нахилу лотка до горизонту; β – кут напрямку коливань.

Максимальне прискорення лотка \ddot{S} визначається із (1) і (2) як

$$\ddot{S} = g \frac{f \cos \alpha - \sin \alpha}{\cos \beta - f \sin \beta}. \quad (3)$$

Нами визначено, що коефіцієнт тертя субпродуктів по перфорованій мокрій поверхні лежить в межах $f = 0,25 \dots 1,18$. Тому

$$\text{при } f = 0,25 - \alpha < 15^\circ, \text{ а } \beta < 75^\circ,$$

$$\text{при } f = 1,18 - \alpha < 49^\circ, \text{ а } \beta < 41^\circ.$$

Виходячи з цього, можна прийняти:

$$\beta = 25 \dots 30^\circ, \alpha = 0 \dots 49^\circ.$$

Якщо тіло відривається від поверхні лотка в момент $t_0 = 3/4 T$ (точка O_1), то величина абсолютного переміщення тіла вздовж лотка за один період коливань U буде складатись із величин переносу тіла лотком і вільного польоту:

$$U = A(1 + \sin \omega t_0) \cos \beta + X_n. \quad (4)$$

Після відповідних перетворень і інтегрування одержана формула для визначення середньої швидкості вібротранспортування

$$v_{сер} = 0,78A\omega \frac{\cos(\alpha + \beta)}{\cos\alpha}. \quad (5)$$

Теоретично обґрунтовано визначення амплітуди коливань і потужності інерційного приводу віброуючого робочого органу машини для миття субпродуктів з урахуванням взаємного впливу мас ланки, що рухає (віброприводу), і провідної ланки (робочого органу – лотка з продуктом), а також гідравлічного опору, пропорційного квадрату швидкості.

Відповідно до розрахункової схеми – рис. 2 – з використанням кінетичного потенціалу вирази для кінетичної (6) та потенціальної (7) енергій системи запишуться як:

$$T_1 + T_2 = \frac{M + 2m}{2} \dot{S}^2 + (mr^2 \sin^2 \varphi + I)\dot{\varphi}^2 - 2mr\dot{S}\dot{\varphi} \sin \varphi; \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \Pi = & MgS \sin(\alpha + \beta) + mg[S_{mл} \sin(\alpha + \beta) + A \cos(\alpha + \beta)] + \\ & + mg[S_{mn} \sin(\alpha + \beta) - A \cos(\alpha + \beta)] + 0,5K_S (S - f_{СТ})^2, \end{aligned} \quad (7)$$

де T_1 – кінетична енергія вібрлотка; T_2 – кінетична енергія дебалансів; Π – потенціальна енергія системи; M – маса лотка з продуктом; m – маса дебаланса вібратора; S – переміщення; r – радіус центра тяготіння дебалансів; I – динамічний момент; K_S – жорсткість пружних зв'язків; $f_{СТ}$ – статична деформація пружної підвіски.

Одержана формула для визначення амплітуди коливань вібраційної машини

$$A = \frac{2r\omega^2 m}{(M + 2m) \sqrt{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + \frac{16\omega^2 \left(\frac{F_T}{A\omega} + \frac{2}{3} \mu A \omega \right)^2}{\pi^2 (M + 2m)^2}}}, \quad (8)$$

де $\omega_0 = \sqrt{K_S / (M + 2m)}$; ω – кутова швидкість дебалансів; μ – коефіцієнт “турбулентного” тертя; F_T – постійна сила тертя.

Потужність приводу самобалансного вібратора визначається формулою

$$N = A \frac{mr\omega^3}{102\eta} \sin \theta, \quad (9)$$

де η – КПД механічних передач; θ – кут зсуву коливань по фазі, викликаний наявністю опору при русі лотка.

Експериментальні дослідження вібраційної мийної машини показали адекватність теоретичним викладкам.

Характерною особливістю мембранного розділення рідинних харчових продуктів, особливо в процесах ультрафільтрації, є утворення концентраційного, або поляризаційного, та гелевого шарів, наявність яких утруднює перенесення розчинника через мембрану і тим самим перешкоджає процесу ультрафільтрації.

Як відомо, питома продуктивність або швидкість процесу ультрафільтрації G визначається рівнянням

$$G = \frac{dV}{S_M d\tau} = \frac{p_0}{\eta R}, \quad (10)$$

де V – кількість пермеата, одержаного за час τ ; S_M – площа мембрани; p_0 – рушійна сила процесу (тиск); η – динамічний коефіцієнт в'язкості рідини; R – опір процесу.

Опір процесу ультрафільтраційного концентрування може бути представлений як

$$R = R_M + R_K + R_e + R_0 + R_a, \quad (11)$$

де R_M – опір мембрани; R_K – опір концентраційної поляризації; R_e – опір гелевого шару; R_0 – опір блокованих пор (осаду); R_a – опір адсорбційних явищ.

Для зменшення величини опору та збільшення рушійної сили запропоновано використати віброуючу перфоровану пластину, розміщену в близькості від ультрафільтраційної мембрани – рис. 3. Теоретичне обґрунтування цього заходу пов'язане з тим, що при вібрації пластини по чергово то з однієї, то з іншої її сторони утворюються переривисті потоки продукту. Такий коливальний процес в гідравліці називають гідравлічним ударом.

Рис. 3. Схема руху потоків рідини між мембраною та віброуючою пластиною

Для визначення величини підвищення тиску (ударного тиску) Δp скористаємось законом про зміну кількості руху. Відповідно рис. 3а, одержимо:

$$\Delta p S \Delta t = \rho S \Delta h v_0, \quad (12)$$

де Δt - приріст часу; ρ – густина рідини; S – площа перфорованої пластини.

$$\text{Звідси} \quad \Delta p = \rho v_0 \Delta h / \Delta t = \rho v_0 a,$$

де a – швидкість розповсюдження хвилі гідравлічного удару.

Визначаючи швидкість потоку рідини v_0 , яка спричиняється віброуючою пластиною, за формулою

$$v_0 = 4Af \varphi / \varepsilon,$$

де A – амплітуда коливань; f – частота коливань; φ – відношення площі пластини до площі поперечного перерізу апарата; ε – живий переріз апарата, а швидкість розповсюдження хвилі гідравлічного удару a – за формулою Н.Є.Жуковського, одержимо

$$\Delta p = \frac{4Af\varphi}{\varepsilon} \sqrt{\frac{\rho K}{1 + (DK / \delta E)}}, \quad (13)$$

де K – модуль пружності рідини; E – модуль пружності матеріалу стінок апарата; D – діаметр апарата; δ – товщина стінок апарата.

Питома продуктивність мембрани G_b при цьому складає (без врахування R_0 і R_a)

$$G_b = \frac{\Delta p + p_0}{\eta [R_m + (1 - S')(R_k + R_c)]}, \quad (14)$$

де S' – відносна поверхня мембрани, яка зазнає впливу підвищеного градієнту тиску.

Ступінь інтенсифікації процесу – відношення G_b/G – показує збільшення продуктивності ультрафільтраційної мембрани при використанні перфорованої вібруючої пластини по відношенню до тупикового режиму (без перемішування). За нашими підрахунками та по експериментальним дослідженням воно дорівнює 1,5...2,0.

При русі пластини від поверхні мембрани (рис. 3б) між ними виникають області із зниженим тиском, градієнт якого визначається формулою

$$\Delta p' = \rho \frac{v_0^2}{2} \approx 10^3 \text{ Па}. \quad (15)$$

Під дією цього градієнта тиску рідина на межі перфорацій пластини набирає характер вихрового руху, який перешкоджає утворенню стійкої стратифікації поблизу поверхні мембрани.

Застосування механічних коливань (вібрацій) дозволяє створити активні гідродинамічні режими і тим самим досягнути значної інтенсифікації процесу сушіння. В науковому обґрунтуванні впливу механічних коливань на тепло-, масообмін в процесах сушіння харчової сировини в АВКШ виділені зовнішні та внутрішні фактори. Інтенсивність зовнішнього тепло-, масообміну в загальному вигляді визначається рівняннями:

$$q = Wr / S \tau = \alpha (t_n - t_s); \quad (16)$$

$$m = W / S \tau = \beta (p_n - p_s), \quad (17)$$

де q – густина теплового потоку; W – кількість рідини, що випарюється з поверхні продукту, r – теплота пароутворення; S – поверхня випарювання; τ – тривалість випарювання; α – коефіцієнт тепловіддачі від повітря до продукту; t_n – температура поверхні вологого продукту; t_s – температура повітря; m – питомий потік вологи від поверхні продукту; β – коефіцієнт масопередачі від продукту до повітря; p_n – тиск насиченої пари при температурі поверхні продукту; p_s – парціальний тиск пари в повітрі.

Інтенсифікація внутрішнього тепло-, масообміну при сушінні капілярно-пористих тіл в АВКШ зумовлена взаємодією трьох гідродинамічних ефектів: кавітації, виникненні кумулятивної струминки і зміні надлишкового тиску рідини в каналах, що вібрують.

Теоретичні передпосилки ІЧ-нагрівання продуктів в псевдозрідженому шарі виходять із рівняння, що описує динаміку зменшення вмісту вологи U продукту з часом τ при ІЧ-нагріванні:

$$U = U_0 \exp(-m\tau), \quad (18)$$

де U – об’ємний вміст вологи в продукті, кг/м³; U_0 – початкове значення цієї величини, кг/м³; m – величина, яка визначається співвідношенням $m = \beta/h$; β – коефіцієнт масовіддачі (вологовіддачі), м/с; h – товщина шару продукту, м.

Масова вологість продукту пов’язана з об’ємною співвідношенням

$$W = \frac{U}{U + \rho_C(1-p)}, \quad (19)$$

де ρ_C – густина сухих речовин продукту, кг/м³; p – об’ємна пористість продукту.

На рис. 4 представлена теоретична залежність $W(\tau)$ в порівнянні з експериментальними даними (точки), одержаними нами при термічній обробці соєвих бобів.

Розрахунки показують, що при збільшенні густини теплового потоку q в 1,6 рази коефіцієнт масовіддачі β збільшується в 2 рази і при $q = 2600$ Вт/м² складає $\beta = 3 \cdot 10^{-5}$ м/с.

Тепловий баланс процесу може бути виражений рівнянням

$$qSd\tau = r(-dm_B) + C_C m_C dt + C_B m_B dt + \alpha S(t - t_{II})d\tau, \quad (20)$$

де r – питома теплота пароутворення, Дж/кг; dm_B – зменшення маси води в продукті, кг; C_C, C_B – відповідно питома теплоємність сухої речовини та води, Дж/(кг·К); m_C, m_B – відповідно маса сухої речовини та води в продукті, кг; α – коефіцієнт тепловіддачі від шару продукту в навколишнє середовище, Вт/(м²·К); t_{II} – температура навколишнього середовища, °С; t – температура шару продукту, °С.

Рівняння (20) з урахуванням (18) і (19) може бути представлено як

$$\frac{d(t - t_{II})}{dt} + \frac{\alpha(t - t_0)}{h \cdot f(\tau)} = \frac{\frac{q}{h} - rU_0 m}{f(\tau)}, \quad (21)$$

$$\text{де } f(\tau) = C_C(1-p)\rho_C + C_B U_0(1-m\tau). \quad (22)$$

Після деяких спрощень одержуємо

$$t = t_{II} + \frac{q}{\alpha} \left[1 - \exp\left(-\frac{\alpha}{B} \tau\right) \right], \quad (23)$$

де $B = C_C h(1-p)\rho_C$.

На рис. 5 представлені криві зміни температури соєвих бобів, побудовані за (23) в порівнянні з експериментальними значеннями. Як видно, теорія досить точно відображує процес до моменту “вибуху” зерен, відзначеного заштрихованою смугою.

Рис. 4. Теоретичні криві зміни вологості соєвих бобів (точки – експериментальні)

Рис.5. Теоретичні криві зміни температури соєвих бобів (точки – експериментальні)

У третьому розділі “Дослідження процесу миття харчової сировини в машині з вібруючим робочим органом” проведено аналіз процесу миття харчової сировини, що показав відсутність на цей час показника, який би міг характеризувати адгезійний зв’язок забруднень з поверхнею продукту. Проведені дослідження показали, що таким показником може бути крайовий кут змочування.

Визначені усереднені значення коефіцієнта тертя ковзання різноманітних м’ясних субпродуктів по різних поверхнях, які лягли в основу теоретичних досліджень. Експериментальні дослідження процесів миття субпродуктів проведені на експериментальній установці – рис. 6, в основу якої покладено авторське свідоцтво [34].

Вперше проведені досліди по вібротранспортуванню субпродуктів. Одержані залежності швидкості вібротранспортування v субпродуктів від параметрів вібрації робочого органу. На рис. 7 і рис. 8 наведені такі залежності для печінки. Із графіків видно, що прискорення вібрацій $A\omega^2$ не визначає однозначно швидкість v вібропереміщення. При одній і тій же величині прискорення $A\omega^2$ швидкість v може змінюватись в досить широких межах. Області найбільш раціональних режимів вібротранспортування при мінімальних напруженнях,

Рис. 6. Принципова схема машини для миття субпродуктів: 1 – платформа; 2 – лоток поворотний; 3 – робоча поверхня лотків (перфорована); 4 – трубопровід м'який (шланг); 5 – бачок; 6 – ресора; 7 – кутники кріплення; 8 – основа; 9 – вібратор ексцентриковий; 10 – шатун; 11 – пружна ланка; 12 – водопровід; 13 – душуючий колектор; 14 – трубопровід обертової води; 15 – душуючий колектор обертової води; 16 – насос; 17 – бункер завантажувальний; 18 – шибер; 19 – лоток вивантаження; 20 – фільтруюча перегородка; 21 – шарнірна опора; 22 – насадка струйна.

Рис. 7. Залежність $v=f(A, A\omega^2)$

Рис. 8. Залежність $v=f(\omega, A\omega^2)$

які виникають при роботі вібромашини, заштриховані. Залежність швидкості транспортування v від кута α підйому вантажонесучого органа (поворотного лотка) виражена рівнянням

$$v = 0,14 - 3,3 \cdot 10^{-3} \alpha. \quad (24)$$

Визначено вплив параметрів вібрації (амплітуди, частоти коливань, кута нахилу лотків) на якість миття субпродуктів. Як приклад, на рис. 9 наведено моделювання залежності якості миття субпродуктів (печінки) від амплітуди і частоти коливань робочого органу.

Рис. 9. Лінії рівних значень якості миття печінки (в балах) в залежності від параметрів вібрації

Наведено також залежності продуктивності та споживаної потужності від параметрів вібрації. Визначені раціональні параметри струминного миття субпродуктів, які забезпечують максимальну продуктивність і високу якість миття: частота коливань $\omega = 140$ рад/с; амплітуда коливань $A = 2,5$ мм; кути нахилу лотків $\alpha_1 = 30^\circ$, $\alpha_2 = 25^\circ$, $\alpha_3 = 10^\circ$, $\alpha_4 = 5^\circ$, питома витрата води – 1 кг/кг.

У четвертому розділі “Дослідження процесу ультрафільтраційного концентрування рідинних харчових продуктів з використанням механічних коливань” наведені результати експериментальних досліджень, які підтвердили теоретичні передпосилки розділу 2.

Основні експериментальні дослідження проведені на ультрафільтраційній установці періодичної дії, схема якої представлена на рис. 10, з використанням напівпроникних мембран УПМ-П-500 і ГР61ПП. Дослідження процесу ультрафільтраційного концентрування м'ясо-кісткових бульйонів, соєвого молока та знежирених молочних продуктів проведені в 3-х варіантах: без перемішування, з перемішуванням лопатевою та вібраційною мішалками. Як приклад, наведено залежності питомої продуктивності (швидкості процесу) мембрани від тиску і концентрації сухих речовин – рис.11 – та від температури і тривалості процесу – рис. 12. Вперше проведені експериментальні дослідження ультрафільтраційного концентрування бульйонів. Показано, що концентрація бульйону може бути

Рис. 10. Схема експериментального ультрафільтраційного модуля:

- 1 – ультрафільтраційний модуль; 2 – водяна оболонка; 3 – мембрана;
 4 – підложка; 5 – збірник фільтрата; 6 – компресор; 7 – термостат;
 8 – потенціометр КСП-4 з термопарою; 9 – привід вібратора;
 10 – вібратор ексцентриковий; 11 – манометр; 12 - кран трьохходовий;
 13 – кран-пробовідбірник; 14 – мембрана гнучка; 15 – диск перфорований.

Рис.11. Залежність продуктивності

- мембрани від тиску і концентрації сухих речовин при концентруванні бульйону при $t = 65^{\circ}\text{C}$:
 - без перемішування;
 - з віброперемішуванням

Рис.12. Залежність продуктивності мембрани від температури і тривалості процесу при концентруванні соєвого молока при $p = 0,8 \text{ МПа}$:
 1, 2, 3 – без перемішування;
 4 – з віброперемішуванням (в.п.)

визначена за його реологічним показником – динамічним (чи кінематичним) коефіцієнтом в'язкості, між якими встановлена залежність:

$$\eta = t^{-1,16} (1,9C_{cp}^2 - 7,27C_{cp} + 79,23) \quad (25)$$

при $40^{\circ}\text{C} \leq t \leq 90^{\circ}\text{C}$ та $1\% \leq C_{cp} \leq 24\%$,

де t – температура бульйона, $^{\circ}\text{C}$; C_{cp} – концентрація сухих речовин, %.

Встановлені раціональні режими ультрафільтраційного концентрування досліджених харчових речовин – табл.1.

Таблиця 1

Раціональні параметри здійснення ультрафільтраційного концентрування

Параметри	Продукт	Бульйон	Соеве молоко	Сколотини	Обезжирене молоко
Тип мембрани		УПМ-П	ГР 61ПП	ГР61ПП	УПМ-П
Тиск, МПа		0,3...0,4	0,6...0,8	0,3...0,4	0,3...0,4
Температура, $^{\circ}\text{C}$		60...70	50...60	40...60	50...60
Концентрація сухих речовин, %		10...12	8...9	7	15...16
Тривалість, $\text{с} \cdot 10^{-3}$		3...4	10...12	12...14	15...18
Швидкість пульсуючих потоків, м/с		1,2...1,4	1,2...1,4	1,2...1,4	1,5
Амплітуда коливань, мм		3	3	3	3
Частота коливань, рад/с		150	150	150	150

У п'ятому розділі “Дослідження процесів конвективного сушіння рослинних матеріалів в аеровіброкиплячому шарі” з метою підтвердження теоретичного обґрунтування і розробки промислового апарату для сушіння корнеклубнеплодів в АВКШ наведені результати досліджень, основними задачами яких є проведення експериментальних досліджень по гідродинаміці псевдозрідження рослинних матеріалів, встановлення закономірностей, які характеризують кінетику процесу їх сушіння, теоретичний аналіз процесу сушіння в аерокиплячому (АКШ) та аеровіброкиплячому шарі (АВКШ).

В розділі обґрунтовано вибір об'єктів сушіння (плодів гліду, корнів хрону, клубнів топінамбура), наведена принципова схема експериментальної лабораторної сушильної установки – рис. 13 – та містяться дані експериментальних досліджень.

На рис. 14, як приклад, наведені криві псевдозрідження АКШ кубиків хрону з розміром грані 6 мм і вологовмістом 10 і 160% при різних питомих навантаженнях на газорозподільну решітку (10 і 30 кг/м²). Встановлено, що при значенні вологовмісту продукту більше 150 % особливо проявляються явища агрегування частинок між собою і прилипання їх до решітки і стінок камери; при цьому переведення їх в псевдозріджений стан без додаткових заходів (вібрацій, ударів) стає неможливим. Швидкість повітря, при якому починається псевдозрідження, перш за все залежить від вологовмісту матеріалу. Наприклад, для сухих кубиків топінамбуру ($w = 10\%$) вона складає 0,85...0,90 м/с, для вологих ($w = 350\%$) – 1,2...1,3 м/с, відповідно для кубиків хрону при $w = 10\%$ - 0,90...0,95 м/с та при $w = 160\%$ - 1,05...1,10 м/с. В той же час швидкість початку псевдозрідження майже не залежить від величини питомого навантаження на газорозподільну решітку.

За даними гідродинамічних досліджень АКШ встановлено, що для досліджених і їм подібних матеріалів у відому критеріальну залежність

Рис. 13. Схема експериментальної сушильної установки: 1– камера сушильна; 2 – електрокалорифер; 3 – вентилятор; 4 – вібратор; 5 – патрубок циліндричний; 6 – тяга; 7 – затискач; 8 – напрямна з пружинними амортизаторами; 9 – повітропровід; 10 – рукав м'який; 11 – решітка газорозподільна; 12 – заслінка регулююча; 13 – діафрагма; 14 – ЛАТР; 15 – стійка; 16 – лінійка; 17 – анемометр; 18 – посудина Дьюара; 19 – мікроманометр; 20 – мікроманометр диференціальний; 21 – потенціометр КСП - 4; 22 – терморпара; 23 – потенціометр ЭПП-0,9

Рис. 14. Криві псевдозрідження шару кубиків хрону з розміром грані 6 мм і вологовмістом 10 % (криві 2,4) і 160% (криві 1,3) при питомому навантаженні 30 кг/м² (криві 1,2) і 10 кг/м² (криві 3,4)

О.М.Тодеса для сферичних частин слід внести поправковий множник 0,6, тобто залежність буде мати вигляд

$$Re_{KP} = \frac{0,6 Ar}{1400 + 5,22\sqrt{Ar}}, \quad (26)$$

де Re_{KP} – число Рейнольдса, розраховане для критичної швидкості псевдорозрідження; Ar – критерій Архімеда.

Різницю в числах Рейнольдса, визначених за залежністю О.М.Тодеса і експериментально знайдених нами, можна пояснити тим, що залежність О.М.Тодеса не враховує вологість частинок, їх схильність до адгезії і когезії, а також питоме навантаження на газорозподільну решітку.

Серія експериментальних досліджень з метою оцінки впливу параметрів вібрації на гідродинамічні властивості ВКШ матеріалу – рис. 15 – дозволила зробити наступні висновки:

- оптимальна величина прискорення вібрацій, при якій відбувається інтенсивне перемішування ВКШ, лежить в межах 20...25 м/с²;
- при створенні апаратів з ВКШ необхідно віддавати перевагу малим за висотою шарам матеріалу (30...40 мм) і низьким частотам вібрації (10...25 Гц).

Рис. 15. Залежність порізності ε ВКШ плодів глоду вологовмістом 80 % від прискорення вібрацій ($A\omega^2$) і висоти нерухомого шару (h)

Для порівняння гідродинаміки АВКШ і АКШ наведено криві псевдорозрідження шару кубиків топінамбура з розміром грані 6 мм і вологовмістом 350 % при прискоренні вібрацій 24 м/с² в залежності від питомого навантаження на газорозподільну решітку і амплітуди її коливань – рис. 16.

Математична обробка кривих псевдорозрідження показала, що вони можуть бути описані рівнянням регресії:

$$\Delta p = a + \frac{b}{1 + (v/c)^d}, \quad (27)$$

де a , b , c , d – параметри рівняння.

Встановлено, що критична швидкість повітря, яка відповідає моменту початку псевдорозрідження на вібруючій решітці, менша, ніж на нерухомій на 0,3...0,5 м/с. Вібрації решітки з амплітудою 2 мм при швидкості повітря, меншій критичної, ущільнюють шар матеріалу, а з амплітудою 10 мм – розпушують його.

Рис. 16. Криві псевдозрідження шару кубиків топінамбура з розміром грані 6 мм і вологовмістом 350% при $A\omega^2 = 24\text{м/с}^2$ в залежності від питомого навантаження і амплітуди коливань газорозподільної решітки

Псевдозрідженню сприяє зменшення частоти коливань решітки. Гідродинамічні дослідження показали, що значно покращують однорідність псевдозрідженого шару і зменшують його гідравлічний опір вібрації решітки з великими амплітудами (5...10 мм) і малими частотами (7...15 Гц). Оптимальне (робоче) значення швидкості псевдозрідження, яке забезпечує інтенсивне постійне перемішування киплячого шару, при вібраціях решітки може бути в 1,5...2 рази меншим критичного значення при АКШ. Це, в свою чергу, зменшує витрату сушильного агента та енергетичні витрати на процес.

В експериментальних дослідженнях по кінетиці сушіння вивчено вплив на процес таких параметрів: температури і швидкості теплоносія, питомого навантаження на газорозподільну решітку, форми і розмірів частинок матеріалу, а також параметрів вібрації. Вивчення процесу сушіння кубиків хрину і топінамбура та плодів глоду проводили шляхом розгляду кривих видалення вологи, швидкості сушіння і зміни температури матеріалу в процесі обробки. На рис. 17 наведені криві кінетики (1, 2, 3) плодів глоду в АКШ при питомому навантаженні 40кг/м^2 і температурі сушильного агента 80°C . Там же наведені криві 1', 2' і 3' по експериментальним дослідженням сушіння плодів глоду в ВКШ ІЧ-випромінюванням при густині теплового потоку $1,3\text{кВт/м}^2$. На рис. 18 наведені криві кінетики сушіння плодів глоду в АВКШ.

Як виходить з наведених графіків, основне видалення вологи відбувається в періоді постійної швидкості сушіння. Критична точка, яка характеризує перехід від періоду постійної швидкості до періоду спадаючої швидкості, визначається вологістю продукта і режимами сушіння. Інтенсифікація процесу сушіння при вібрації сипкого матеріалу спостерігається не тільки за рахунок розпушення шару продукта і збільшення його активної поверхні з сушильним агентом, але і за рахунок зростання коефіцієнтів тепло- і масообміну при вібрації окремих частинок. Таким чином, ефект вібраційного впливу на процес сушіння проявляється в: збільшенні інтенсивності сушіння в періоді постійної швидкості (в 1,5...1,6 рази); подовженні періода постійної швидкості сушіння по відношенню

Рис. 17. Криві сушіння (1, 1'), температури в центрі плода (2, 2') і швидкості сушіння (3, 3') гліду в АКШ та ВКШ ГЧ-випромінюванням

Рис. 18. Криві сушіння (1, 2, 3) і швидкості сушіння (1', 2', 3') плодів гліду в АВКШ в залежності від частоти коливань решітки.

до загальної тривалості процесу; зменшенні швидкості сушильного агента (в 1,5...1,6 рази) при постійних інших параметрах; збільшенні продуктивності апаратів з АВКШ в порівнянні з АКШ на 20...50 %. Рациональні режими вібрації при сушінні в АВКШ: $A = 3...5$ мм, $f = 15$ Гц.

Аналітичне узагальнення результатів досліджень процесів конвективного сушіння рослинних матеріалів в псевдозрідженому шарі включає розрахунок тривалості нагрівання та температури продуктів.

Виходячи з рівнянь теплового балансу процесу сушіння – рівності теплоти, що віддається теплоносієм, теплоти, що передається від теплоносія продукту, і теплоти, що сприймається продуктом – тривалість процесу нагрівання продукту визначається співвідношенням:

$$\tau = \frac{mc}{\alpha S} \left(1 + \frac{\alpha S}{G_{II} C_{II}} \right) \ln \frac{t_0 - \theta_0}{t_0 - \theta} \quad (28)$$

де m - маса продукту; c – питома теплоємність продукту, α – коефіцієнт тепловіддачі від теплоносія до продукту; S – площа поверхні контакту між теплоносієм і продуктом; G_{II} – витрата теплоносія; C_{II} – питома масова теплоємність теплоносія; t_0 – початкова температура теплоносія; θ_0 – початкова температура продукту; θ – кінцева температура продукту.

Це співвідношення зв'язує більшість основних параметрів процесу сушіння і може бути використане для визначення досяжного значення нагріву продукту або з метою контролю вибору комплексу параметрів для досягнення потрібних результатів обробки.

Виходячи з того, що швидкість нагріву тіла пропорційна різниці температур між теплоносієм і продуктом, можна записати

$$dt / d\tau = - a (t_0 - t), \quad (29)$$

де a – коефіцієнт пропорційності, названий коефіцієнтом швидкості нагріву. Знак мінус вказує на зменшення різниці температур в часі. Коефіцієнт швидкості

нагріву залежить від режиму сушіння, властивостей матеріалу і визначається з експериментальних кривих температур як

$$a = -\frac{1}{\tau} \ln \left(1 - \frac{\beta}{100} \right), \quad (30)$$

де β – зменшення різниці температур до моменту часу τ , %.

На рис. 19 представлені значення коефіцієнтів a , розраховані по формулі (30) для кубиків топінамбура з розміром грані 8 мм і плодів глоду діаметром 10 мм.

Рис. 19. Залежність коефіцієнта a від відносної різниці температур

Експериментальні точки задовільно укладаються вздовж ломаних прямих, які описуються співвідношеннями: для кубиків топінамбура:

$$a = 18,29 \cdot 10^{-3} + 33,37 \ln \frac{t_0 - t}{t_0 - t_H} \quad \text{при} \quad 0,6 < \frac{t_0 - t}{t_0 - t_H} < 1,0, \quad (31)$$

$$a = 2,89 \cdot 10^{-3} + 2,06 \ln \frac{t_0 - t}{t_0 - t_H} \quad \text{при} \quad 0,2 < \frac{t_0 - t}{t_0 - t_H} < 0,6; \quad (32)$$

для плодів глоду:

$$a = 66,12 \cdot 10^{-4} + 54,31 \ln \frac{t_0 - t}{t_0 - t_H} \quad \text{при} \quad 0,28 < \frac{t_0 - t}{t_0 - t_H} < 1,0, \quad (33)$$

$$a = 3,21 \cdot 10^{-4} + 1,15 \ln \frac{t_0 - t}{t_0 - t_H} \quad \text{при} \quad 0,03 < \frac{t_0 - t}{t_0 - t_H} < 0,28. \quad (34)$$

Зв'язок між вологістю і температурою тіла при сушінні може бути представлений як

$$\ln \frac{t_0 - t}{t_0 - t_H} = b \ln \frac{\bar{W}}{W_0}, \quad (35)$$

де $b = \frac{a}{k}$ - температурний коефіцієнт сушіння, k – коефіцієнт сушіння; \bar{W} , \bar{W}_0 - вологовміст матеріалу відповідно поточний і початковий.

На рис. 20 наведена залежність $b = f(\bar{W}/\bar{W}_0)$ для конвективного сушіння, з якої виходить, що температурний коефіцієнт b для розглянутих матеріалів є величиною перемінною.

Рис. 20. Залежність температурного коефіцієнта сушіння b від відносного вологовмісту.

Визначено, що для сушіння кубиків топінамбура залежність може бути представлена у вигляді емпіричних формул

$$b = 5 + 6,61 \ln \frac{\bar{W}}{\bar{W}_0} \quad \text{при} \quad 0,67 < \frac{\bar{W}}{\bar{W}_0} < 1,0, \quad (36)$$

$$b = 3 + 1,42 \ln \frac{\bar{W}}{\bar{W}_0} \quad \text{при} \quad 0,1 < \frac{\bar{W}}{\bar{W}_0} < 0,67. \quad (37)$$

для плодів глоду:

$$b = 6,62 + 5,11 \ln \frac{\bar{W}}{\bar{W}_0} \quad \text{при} \quad 0,42 < \frac{\bar{W}}{\bar{W}_0} < 1,0, \quad (38)$$

$$b = 2,58 + 0,54 \ln \frac{\bar{W}}{\bar{W}_0} \quad \text{при} \quad 0,1 < \frac{\bar{W}}{\bar{W}_0} < 0,42. \quad (39)$$

Запропонований спосіб обробки і узагальнення експериментальних даних дозволяє на основі математичного опису експериментальних кривих сушіння і нагріву тіла з достатньо високою точністю провести їх спільний аналіз, описати дійсний процес тепло- масообміну тіл з навколишнім середовищем.

У шостому розділі “Дослідження процесів сушіння і термічної обробки продуктів у віброкиплячому шарі ІЧ-нагріванням” наведені результати експериментальних досліджень по кінетиці сушіння та термічної обробки продуктів ІЧ-нагріванням в ВКШ, які були проведені на двох установках: з прямолінійним робочим органом, що здійснює прямолінійні гармонічні коливання, та на круглій горизонтальній чаші, що здійснює кругові гармонічні коливання. Генератором ІЧ-випромінювання були ТЕНи, обладнані відбивачем.

Наведено результати експериментальних досліджень термічної обробки соєвих бобів з одержанням так званих “соєвих горішків”. Вивчення процесу здійснювалось за кривими зміни вологовмісту, швидкості видалення вологи та температурними кривими при різних густинах теплового потоку ІЧ-випромінювання. Побудовані узагальнюючі криві видалення вологи – залежності $W=f(N\tau)$ та $W=f(q\tau)$, де N – швидкість видалення вологи, %/хв.

Досліджено процес сушіння макаронних виробів різного діаметру при різній густині теплового потоку, аналітичний опис якого без урахування теплових витрат може бути представлений в наступному вигляді

$$\frac{q\varepsilon}{h\rho} = (m_c C_c + 0,01WC_B) \frac{dt}{d\tau} + r \frac{dW}{d\tau}, \quad (40)$$

де $\frac{dt}{d\tau}$ - швидкість нагріву виробу, °C/хв.; $\frac{dW}{d\tau}$ - швидкість видалення вологи, %/хв.

Дослідження процесу сушіння крохмалю, які проведені за проханням Донецької кондитерської фабрики “АВК”, представлені у вигляді кривих сушіння, швидкості сушіння та температурних кривих. Результатом експериментальних досліджень стала розробка дослідного зразка вібраційного апарата для просіювання крохмалю від конфетних крихт та його сушіння.

Дослідження процесу обжарювання зерен пшениці проведені з метою використання їх в якості наповнювача конфетних мас та глазурей, компонента кавових напоїв, напівфабрикатів, які не потребують варки, та пасерованої муки.

В розділі наведені також дані експериментальних досліджень по жарінню грінок з двобічним підводом до них ІЧ-нагріву. Крім кривих кінетики процесу, побудовані поля вологості та температурні поля грінок при термічній обробці.

Наведені результати сушіння окари, яка є побічним продуктом при виробництві соєвого молока.

Слід відзначити, що параметри вібрації робочого органу експериментальних установок – амплітуда, частота, напрямок коливань – помітного впливу на кінетику процесів сушіння і термічної обробки досліджених продуктів не здійснюють. Переміщення та інтенсивне перемішування продуктів в віброкиплячому шарі створюють умови постійного оновлення шару продукту, який знаходиться в зоні дії ІЧ-випромінювання. Це забезпечує імпульсний нагрів продуктів та дозволяє при високих теплових напруженнях запобігати їх перегріву, а також підтверджує висновок, що тривалість процесів сушіння та термічної обробки розглянутих нами продуктів лімітується їх перебуванням в полі ІЧ-випромінювання і потужністю теплового потоку.

У сьомому розділі “Практична реалізація результатів досліджень” представлено конструкції та описано будову семи розроблених прогресивних апаратів з використанням вібрацій, зокрема апарата жарильного вібраційного з ІЧ-нагрівом, апарата для вібропросіювання і радіаційного сушіння крохмалю, сушарки з АВКШ матеріалу, ультрафільтраційних апаратів (рис. 21-24). За результатами теоретичних та експериментальних досліджень розроблені

Рис. 21. Апарат жарильний вібраційний з ІЧ-нагрівом АЖВ-1:

1 – лоток верхній; 2 – лоток нижній; 3 – блок ІЧ-випромінювачів; 4 – ТЕН; 5 – косинка; 6 – лоток пересипний; 7 – кришка; 8 – пульт керування; 9 – вібратор ексцентриковий; 10 – клинопасна передача; 11 – натяжний пристрій; 12 – електродвигун; 13 – лоток вивантаження; 14 – облицювання; 15 – вісь; 16 – важіль двоплечий; 17 – шибер; 18 – бункер завантажувальний; 19 – рама; 20 – віброізолятор.

Рис. 22. Апарат для вібропросіювання і радіаційного сушіння крохмалю:

1 – жолоб; 2 – бункер завантаження; 3,4 – ситові рамки; 5 – блок випромінювачів; 6 – важіль; 7 – рама; 8 – вібратор; 9 – шатун; 10 – ремінь клиновий; 11 – електродвигун; 12 – гнучка вставка; 13 – шибер.

Рис. 23. Вібраційний сушильно-охолоджувальний апарат СОАВ:

1 – патрубок подачі гарячого повітря; 2 – заслінка-шибер; 3 – патрубок завантажувальний; 4 – оглядове вікно; 5 – витяжний зонт; 6 – шибер; 7 – гнучкий рукав; 8 – торцеве вікно; 9 – газорозподільна решітка; 10 – секторний регулятор висоти шару; 11 – корпус; 12 – заслінка холодного повітря; 13 – патрубок подачі холодного повітря; 14 – патрубок розвантажувальний; 15 – рама; 16 – регульована опора; 17 – ресора; 18 – шатун; 19 – електродвигун; 20 – вібратор ексцентриковий.

Рис. 24. Вібраційний ультрафільтраційний апарат із плоскими мембранами:

1 – обичайка; 2 – ребро; 3 – кільце; 4 – вібратор; 5 – шатун; 6 – пружина; 7 – гніздо-стакан; 8 – пластина опорна; 9 – фланець; 10 – штанга; 11 – дебаланс; 12 – муфта гнучка; 13 – патрубок вхідний; 14 – патрубок виходу концентрату; 15 – патрубок виходу пермеата; 16 – мембрана.

технологічна інструкція по виробництву нових кондитерських виробів з використанням плодів глоду, а також проекти нормативної документації на безвідходне виробництво соєвих продуктів та концентрованих і сухих м'ясо-кісткових бульйонів. Розроблені апарати та окремі технології впроваджені на ряді харчових та переробних підприємств та заводах продовольчого машинобудування.

Економічний ефект практичного впровадження дисертаційної роботи визначається такими чинниками, як зменшення енерговитрат і витрат харчової сировини на виробництво одиниці продукції, скорочення тривалості обробки харчової сировини, зниження матеріалоемності обладнання для переробки харчової сировини за рахунок підвищення ефективності відповідних процесів. Річний економічний ефект від впровадження технологічної схеми безвідходного виробництва соєвих продуктів (НПП "УкрПромСоє", м. Донецьк) складає 45 тис. грн, кісткових бульйонів (ТОВ "Донецький м'ясопереробний комбінат") – 37 тис. грн. Річний економічний ефект від впровадження апарата для просіювання та радіаційного сушіння крохмалю на АТ "Кондитерська фабрика АВК" (м. Донецьк) складає 120 тис. грн., від впровадження устрою для миття субпродуктів на ЗАТ "Геркулес" (м. Донецьк) – 28 тис. грн.

Конкретний масштаб економічного ефекту залежатиме від цінової політики харчових підприємств та загальної економічної ситуації в країні. Соціальний ефект практичного впровадження визначається більш повним задоволенням попиту населення України на повноцінні та недорогі продукти харчування.

ВИСНОВКИ

1. На основі результатів проведеного огляду науково-технічної і патентної літератури по проблемі інтенсифікації технологічних процесів обробки харчової сировини зроблений висновок, що перспективним напрямком рішення цієї проблеми є застосування механічних коливань (вібрацій), що дозволяють значно інтенсифікувати різноманітні механічні, гідромеханічні, тепло- і масообмінні процеси, скоротити енергоспоживання, і підвищити якість кінцевої продукції внаслідок забезпечення рівномірності обробки у всьому обсязі продукту. Крім того, застосування вібраційних пристроїв не веде до істотного ускладнення апаратів для переробки сировини. Однак, незважаючи на значну кількість експериментальних досліджень по інтенсифікації процесів харчової технології за допомогою механічних коливань, розробку і впровадження в практику різноманітної вібраційної апаратури, наукове обґрунтування впливу механічних коливань на процеси переробки харчової сировини дуже обмежене. Запропоновано наукову концепцію про вплив механічних коливань (вібрацій) на інтенсифікацію гідромеханічних, тепло-масообмінних процесів і транспортування харчової сировини. Для реалізації концепції визначені наступні найменш вивчені напрямки - миття, ультрафільтрації, сушіння і термообробки харчової сировини.

2. Теоретично обґрунтовано вплив механічних коливань на інтенсифікацію процесу миття харчової сировини, який полягає в дії змінних тисків на межі "рідина-плівка забруднень", збільшенні контактів і поверхні дотику плівки забруднень з рідиною і вібруючим робочим органом та збільшенні дифузії рідини в плівку забруднень. Теоретично і експериментально досліджено вплив параметрів

вібрації на швидкість транспортування продуктів у мийній машині, продуктивність, потужність приводу, а також якість миття та питомі витрати потужності і води. Запропоновано устрій для миття субпродуктів, який забезпечує підвищення якості миття, зниження питомих витрат енергії та води (наприклад, питома витрата води складає 1 кг/кг, що в 2,0...2,5 рази нижче показників для існуючих машин).

3. Теоретично обґрунтований вплив низькочастотних механічних коливань на процес ультрафільтраційного концентрування біологічних рідин, який полягає в зменшенні величини опору та збільшенні рушійної сили процесу. Теоретично і експериментально (на прикладі ультрафільтраційного концентрування м'ясокісткових бульйонів, соєвого молока та склотин) доведено, що при цьому продуктивність мембранної установки або проникність мембрани може бути збільшена в 1,5...2,0 рази. Встановлені раціональні вібраційні параметри ультрафільтрації: амплітуда – 3,0 мм, частота – 150 рад/с, швидкість пульсуючих потоків – 1,2...1,5 м/с.

4. Теоретичне обґрунтування впливу механічних коливань на тепло-, масообмін в процесах конвективного сушіння базується на створенні активних гідродинамічних режимів та взаємодії гідродинамічних ефектів: кавітації, виникненні кумулятивної струминки і зміні надлишкового тиску рідини в каналах, що вібрують. Експериментально доведені переваги процесів конвективного сушіння корнеклубнів і плодів, на прикладі топінамбура, глоду, хрону в АВКШ в порівнянні з АКШ (зниження швидкості теплоносія в 1,5...2 рази, наприклад). Встановлені параметри раціональних режимів сушіння в АКВШ, зокрема, температури сушильного агента – 90 °С, його швидкості – 1,0...1,2 м/с, параметрів вібрації: амплітуди коливань газорозподільної решітки – 3...5 мм, частоти – 15 Гц. Розроблено відповідне устаткування для реалізації цього процесу. Створено теоретичні основи розрахунку процесу сушіння в псевдозрідженому шарі, отримані формули, зручні для інженерних розрахунків і оцінок у технологічній практиці.

5. Теоретично обґрунтована інтенсифікація термічної обробки та сушіння харчової сировини ІЧ-випромінюванням у ВКШ за рахунок забезпечення інтенсивного перемішування і постійного оновлення частинок, які знаходяться в полі ІЧ-випромінювання, що дозволяє передавати їм імпульсами більшої кількості енергії в одиницю часу. Експериментально встановлені параметри раціональних режимів сушіння і термічної обробки макаронних виробів, крохмалю, зерен пшениці, окарі і соєвих бобів ІЧ-випромінюванням у ВКШ. На прикладі цих продуктів підтверджено, що комбінований спосіб сушіння дає можливість істотно скоротити тривалість процесу, збільшити його продуктивність, підвищити якість кінцевого продукту за рахунок кращого збереження в ньому цінних поживних речовин та знизити витрати енергетичних і матеріальних ресурсів. Розроблено 2 конструкції апаратів для реалізації цього прогресивного способу сушіння.

6. Розроблено конструкторську документацію на такі види нового обладнання: апарат жарильний вібраційний АЖВ-1, сушарка з АВКШ, апарат для вібропросіювання і радіаційного сушіння крохмалю, вібраційна машина для миття субпродуктів, 3-х апаратів для ультрафільтраційного концентрування біологічних рідин. Складені також практичні рекомендації з використання нових розроблених

апаратів на конкретних переробних і харчових підприємствах з метою забезпечення тривалої, надійної і безпечної роботи нового обладнання.

7. Здійснено комплекс заходів щодо впровадження нових процесів переробки сировини і відповідного устаткування на харчових і переробних підприємствах України, зокрема, на ТОВ "Донецький м'ясопереробний комбінат", АТ "Кондитерська фабрика "АВК" (м. Донецьк), НПП "УКРПРОМСОЯ", ТОВ "Фірма ВІ-ВА-ЛТД" (м. Донецьк), ЗАТ "Геркулес", ВАТ "Донецький булочно-кондитерський комбінат". Новизна запропонованих технічних рішень підтверджена одержанням 3 авторських посвідчень СРСР, також отримано 2 деклараційні патенти України на винаходи.

8. Економічний ефект від впровадження результатів роботи визначається економією електроенергії в зв'язку з підвищенням продуктивності апаратів і інтенсифікації процесів переробки сировини, а також за рахунок економії дорогої і дефіцитної сировини завдяки використанню нетрадиційної вітчизняної сировини. Соціальний ефект впровадження роботи визначається підвищенням якості кінцевої продукції, а також значним розширенням асортименту. Річний економічний ефект від впровадження технологічної схеми безвідходного виробництва соєвих продуктів (НПП "УкрПромСоє", м. Донецьк) складає 45 тис. грн, кісткових бульйонів (ТОВ "Донецький м'ясопереробний комбінат") – 37 тис. грн. Річний економічний ефект від впровадження апарата для просіювання та радіаційного сушіння крохмалю на АТ "Кондитерська фабрика АВК" (м. Донецьк) складає 120 тис. грн., від впровадження устрою для миття субпродуктів на ЗАТ "Геркулес" (м. Донецьк) – 28 тис. грн.

Список опублікованих праць за темою дисертації

Підручники та навчальні посібники

1. Черевко О. І., Поперечний А. М. Процеси і апарати харчових виробництв: Підручник. – Харків: ХДАТОХ, 2002. – 420с.
2. Курсове проектування устаткування підприємств харчування: Навч. посібник / О.І. Черевко, Г.В. Дейниченко, Н.О. Афукова, А.М. Поперечний та ін./ За ред. О.І. Черевка, Г.В. Дейниченка. – Харків: ХДАТОХ, 1998. – 155с.

Статті

3. Поперечный А.Н., Заремба П.А. Концентрирование бульонов с применением мембранной технологии // Индустриальные методы производства кулинарной продукции на крупных промышленных предприятиях: Сб. науч. тр. – Харьков: ХИОП, 1987. – С. 215 – 217.
4. Характеристики бульонов, получаемых на мясокомбинатах, и перспективы их использования / Г.М. Постнов, А.Н. Поперечный, А.Ф. Коршунова, П.А. Заремба // Индустриальные методы производства кулинарной продукции на крупных промышленных предприятиях: Сб. науч. тр. – Харьков: ХИОП, 1987. – С.165 – 167.
5. Заремба П.А., Поперечный А.Н. Исследование процесса ультрафильтрации с использованием виброперемешивающего устройства // Торговля и общественное питание в новых условиях хозяйствования: Сб. науч. тр. - Вып.1. – Донецк: ДИСТ, 1990.- С. 142 – 144.

6. Использование бульонов мясоперерабатывающей промышленности в общественном питании / М.И.Беляев, А.Н.Поперечный, А.Ф.Коршунова, П.А.Заремба // Известия вузов: Пищевая технология. – 1990. – № 2–3. – С.21 – 23.
7. Поперечный А.М. Дослідження терморадіаційної обробки деяких сипких продуктів //Торгівля і ринок України: Темат. зб. наук. пр. з проблем торгівлі і громадського харчування. – Донецьк: ДКІ, 1992. – С. 181 – 182.
8. Поперечный А.М., Гуськов Л.М. Дослідження динаміки температури зернистих харчових продуктів при обсмажуванні ІЧ – випромінюванням // Торгівля і ринок України: Темат. зб. наук. пр. з проблем торгівлі і громадського харчування. – Донецьк: ДКІ, 1993. – С. 179 – 180.
9. Поперечный А.М., Гуськов Л.М., Заремба П.О. Застосування методу теплової діаграми для розрахунку нагріву зернистих матеріалів при ІЧ – енергопідводі // Торгівля і ринок України: Темат. зб. наук. пр. з проблем торгівлі і громадського харчування. – Донецьк: ДДКІ, 1994. – С. 158 – 159.
10. Поперечный А.М. Термічна обробка нетрадиційної харчової сировини// Торгівля і ринок України: Темат. зб. наук. пр. з проблем торгівлі і громадського харчування. – Донецьк: ДДКІ, 1995. – С. 168 – 170.
11. Поперечный А.М., Гаврилов В. Я., Заремба П.О. Інтенсифікація процесу ультрафільтрації віброуючими пристроями // Торгівля і ринок України: Темат. зб. наук. праць з проблем торгівлі і громадського харчування. – Донецьк: ДДКІ, 1996. – С. 236 – 237.
12. Гаврилов В. Я., Гуськов Л.М., Поперечный А.М. Вплив температури теплоносія на кінетику сушіння насіння соняшника // Торгівля і ринок України: Темат. зб. наук. пр. з проблем торгівлі і громадського харчування. – Донецьк: ДДКІ, 1996. – С.245.
13. Поперечный А.М., Гаврилов В. Я. Термообробка рослинних матеріалів у псевдозрідженому шарі // Торгівля і ринок України: Темат. зб. наук. пр. з проблем торгівлі і громадського харчування. – Донецьк: ТОВ “Лебідь”, 1997. – С. 194 – 195.
14. Поперечный А.М., Заремба П.О. Зміна в’язкості м’ясо – кісткових бульйонів при ультрафільтраційному концентруванні // Торгівля і ринок України: Темат. зб. наук. пр. з проблем торгівлі і громадського харчування. – Донецьк: ТОВ “Лебідь”, 1998. – С. 280 – 281.
15. Поперечный А.Н., Юрченко О.А. Кинетика тепломассообмена при термической обработке нетрадиционного пищевого сырья // Прогресивні ресурсозберігаючі технології та їх економічна обґрунтованість у підприємствах харчування. Економічні проблеми торгівлі: Зб. наук. пр. – Ч. II.-Харків: ХДАТОХ, 1998. – С. 23 – 26.
16. Поперечный А.М., Кожевников В.В., Серафимов Д.С. Сушіння макаронних виробів в віброкиплячому шарі ІЧ – випромінюванням // Обладнання та технології харчових виробництв: Темат. зб. наук. пр. – Донецьк: ТОВ “Кітіс”, 1999. – С. 81 – 87.
17. Заремба П.О., Поперечный А.М. Визначення раціональних режимів вібромиття субпродуктів // Обладнання та технології харчових виробництв: Темат. зб. наук. пр. - Вип. 3. – Донецьк, 1999. – С. 154 – 161.

18. Поперечний А.М., Майдіков В.І. Дослідження гідродинамічних та температурних режимів сушіння плодів глоду в псевдозрідженому шарі // Вісник Дон ДУЕТ. Серія "Технічні науки". - № 6. - Донецьк: ДонДУЕТ, 2000. - С. 121 - 125.
19. Поперечний А.Н., Локтев Ю.И. Кинетика термообработки соевых бобов в виброкипящем слое ИК - нагревом // Прогресивні технології та удосконалення процесів харчових виробництв: Зб. наук. пр. - Ч. 2. - Харків: ХДАТОХ, 2000. - С. 113 - 117.
20. Поперечный А.М. Дослідження вібротранспортування тістових заготовок та розробка вібраційної тістоокруглюючої машини // Обладнання та технології харчових виробництв: Темат. зб. наук. пр. - Вип. 4. - Донецьк: ДонДУЕТ, 2000. - С.92-96.
21. Поперечний А.М., Гаврилов В.Я., Дрібан В.М. Дослідження нагрівання плодів глоду при сушінні в псевдозрідженому шарі // Обладнання та технології харчових виробництв: Темат. зб. наук. пр. - Вип. 5. - Донецьк: ДонДУЕТ, 2001. - С. 137 - 142.
22. Гаврилов В.Я., Поперечний А.М., Гаврилов С.В. Розрахунок температури тіла в процесі конвективного сушіння матеріалу // Вісник ДонДУЕТ. Серія "Технічні науки". - № 1 (9). - Донецьк: ДонДУЕТ, 2001. - С. 146 - 152.
23. Коршунова Г.Ф., Поперечний А.М. Вивчення технологічних властивостей топінамбура // Вісник Дон ДУЕТ: Серія "Технічні науки". - № 1 (9). - Донецьк: ДонДУЕТ, 2001. - С. 105 - 113.
24. Поперечный А.Н., Заремба П.А. Интенсификация ультрафильтрационного концентрирования мясокостных бульонов // Теоретические и практические аспекты применения методов инженерной физико - химической механики с целью совершенствования и интенсификации технологических процессов пищевых производств: Сб. научн. тр. - М.: МГУПБ, 2002. - С. 319 - 322.
25. Поперечный А.Н., Карнаух В.В., Василенюк А.Н. Ультрафильтрационное концентрирование соевого молока // Теоретические и практические аспекты применения методов инженерной физико-химической механики с целью совершенствования и интенсификации технологических процессов пищевых производств: Сб. научн. тр. - М.: МГУПБ, 2002. - С. 323 - 326.
26. Поперечний А.М. Конвективне сушіння топінамбура і плодів глоду у виброкипячому шарі // Обладнання та технології харчових виробництв: Темат. зб. наук. пр. - Вип. 8. - Донецьк: ДонДУЕТ, 2003. - С.164-172.
27. Поперечний А.М. Визначення параметрів роботи вібраційної машини для миття субпродуктів // Вісник ДонДУЕТ. Серія "Технічні науки". - №1(17). - Донецьк: ДонДУЕТ, 2003. - С.144-150.
28. Поперечний А.М. Дослідження ультрафільтраційного концентрування соєвого молока // Обладнання та технології харчових виробництв: Темат. зб. наук. пр. - Вип. 9. - Донецьк: ДонДУЕТ, 2003. - С.118-123.
29. Дейниченко Г.В., Поперечний А.М., Мазняк З.О. Спосіб концентрування білка із вторинної молочної сировини (сколотин) // Обладнання та технології харчових виробництв: Темат. зб. наук. пр. - Вип. 9. - Донецьк: ДонДУЕТ, 2003. - С.92-96.

30. Поперечный А.Н. К оценке адгезионной связи загрязнений с продуктами // Вісник Харківського державного технічного університету сільського господарства “Сучасні напрямки технології та механізації процесів переробних і харчових виробництв”. - Вип.22. - Харків, 2003. –С.99-105.

31. Поперечный А.М. Аналітичні дослідження ІЧ-нагрівання соєвих бобів у віброкіплячому шарі // Обладнання та технології харчових виробництв: Темат. зб. наук. пр. - Вип. 10. –Донецьк: ДонДУЕТ, 2004. -С.294-300.

Авторські свідоцтва, патенти

32. Устройство для тепловой обработки сипучих пищевых продуктов: А.с. № 1248589 СССР, МКИ А 47 J 37/04 / М.И. Беляев, А.И. Черевко, А.Н.Поперечный (СССР). – № 3872909/28-13; Заявлено 28.03.85; Опубл. 07.08.86, Бюл. №29. –3с.

33. Способ получения бульона из соленых языков убойных животных: А.с. № 1472046 СССР, МКИ А 23 L 1/00 / М.И. Беляев, П.А. Заремба, Г.М. Постнов, А.Н. Поперечный, А.И. Луценко, В.И. Мищенко, В.Я. Гайлите (СССР). – № 4239901/28-13; Заявлено 04.05.87; Опубл. 15.04.89, Бюл. №14. –3с.

34. Устройство для мойки субпродуктов: А.с. №1521425 СССР, МКИ А 22 В 5/08 / М.И.Беляев, А.Н.Поперечный, П.А.Заремба (СССР). -№4195699/28-13; Заявлено 17.02.87; Опубл. 15.11.89, Бюл. №42. –3с.

35. Декларацийний патент 54980А Україна, МКВ В 01 D 61/00. Пристрій для ультрафільтрації біологічних рідин / О.І. Черевко, Г.В. Дейниченко, З.О. Мазняк, А.М. Поперечний, Т.І. Юдіна (Україна). - № 2002064643; Заявл. 06.06.2002; Опубл. 17.03.2003, Бюл. № 3. –3с.

36. Декларацийний патент 55902А Україна, МКВ В 01 D 61/00. Ультрафільтраційний модуль з пульсуючою подачею вихідної рідини / Г.В. Дейниченко, З.О. Мазняк, А.М.Поперечний, А.С. Михайлова (Україна). - № 2002075997; Заявл. 19.07.2002; Опубл. 15.04.2003, Бюл. № 4. –3с.

Тези доповідей

37. Комбинированный аппарат для вибропросеивания и радиационной сушки крахмала / А.Н. Поперечный, В.В. Мизрахин, В.А. Ищик, В.М. Тишаев // Тезисы докл. 6-ой Всесоюз. науч.-техн. конф. “Электрофизические методы обработки пищевых продуктов и сельскохозяйственного сырья”. – М.: МТИММП. - 1989. – С. 388 – 389.

38. Поперечный А.Н., Заремба П.А. Аппарат для мойки пищевых продуктов // Тезисы докл. 2-ой Всесоюз. науч. конф. “Проблемы индустриализации общественного питания страны”. – Харьков: ХИОП. - 1989. – С. 395 – 396.

39. Поперечный А.Н. Применение радиационного энергопровода и вибрации при жарке кулинарных изделий // Тезисы докл. 2-ой Всесоюз. науч. конф. “Проблемы индустриализации общественного питания страны”. – Харьков: ХИОП. - 1989. – С. 413.

40. Поперечный А.Н., Соколов С.А. Кинетика сушки гренок при терморadiационном нагреве // Тезисы докл. Всесоюз. науч. конф. “Проблемы влияния тепловой обработки на пищевую ценность продуктов питания”. – Харьков: ХИОП. - 1990. – С. 210 – 211.

41. Поперечный А.Н., Заремба П.А. Влияние температуры мясо-костных бульонов на проницаемость мембраны УПМ–П при ультрафильтрационной обработке

// Тезисы докл. Всесоюз. науч. конф. “Проблемы влияния тепловой обработки на пищевую ценность продуктов питания”. – Харьков: ХИОП. - 1990. – С. 242.

42. Поперечный А.Н. Устранение адгезионных и когезионных сил при комбинированном процессе пассерования муки // Тезисы докл. Всесоюз. науч. конф. “Механика сыпучих материалов”. – Одесса: ОТИПП. - 1991. – С. 220.

43. Поперечный А.Н., Гаврилов В.Я. Сушка хлебопекарных дрожжей в вихревом слое // Тезисы докл. Междунар. конф. “Перспективы развития массового питания и торговли в условиях перехода к рыночной экономике”. – Харьков: ХДАТОХ. - 1994. – С. 268 – 269.

44. Поперечный А.Н., Заремба П.А. Ультрафильтрационное концентрирование мясокостных бульонов с использованием вибрационной мешалки // Тези доп. 9 Міжнар. конф. “Удосконалення процесів та апаратів хімічних, харчових та нафтохімічних виробництв”. – Одеса: ОТИПП. - 1996. – С. 26.

45. Поперечный А.М., Заремба П.О. До визначення оптимальних режимів ультрафільтрації м'ясо-кісткових бульйонів // Тези доп. наук – практик. конф. “Стан і проблеми розвитку торгівлі й харчування в Україні”. – Харків: ХДАТОХ. - 1997. – С. 43 – 44.

46. Поперечный А.Н., Процессы переработки плодов боярышника // Материалы 3-й Междунар. науч.–практик. конф. “Продовольственный рынок и проблемы здорового питания”. – Орел: ОПТУ. - 2000. – С. 128 – 129.

47. Гаврилов В.Я., Поперечный А.М., Гаврилов С.В. Розрахунок температури тіла в процесі конвективного сушіння матеріалу // Тези доп. II Міжнар. наук.–техн. конф. “Актуальні проблеми харчування: технологія та обладнання, організація і економіка”. – Донецьк: ДонДУЕТ. - 2001. – С. 99.

48. Поперечный А.М., Дейниченко Г.В., Мазняк З.А. Удосконалена ультрафільтраційна установка для мембранної обробки біологічних рідин // Тези доп. II Міжнар. наук.–техн. конф. “Актуальні проблеми харчування: технологія та обладнання, організація і економіка”. – Донецьк: ДонДУЕТ. - 2001. – С. 88 – 89.

49. Поперечный А.Н. Исследование распределения локальных температур воздуха в псевдооживленном слое материала // Тези доп. II Міжнар. наук.–техн. конф. “Актуальні проблеми харчування: технологія та обладнання, організація і економіка”. – Донецьк: ДонДУЕТ. - 2003. – С. 115-117.

50. Поперечный А.Н. Исследование закономерностей сушки окары ИК – нагревом // Тези доп. Міжнар. наук.–техн. конф. “Управлінські та технологічні аспекти розвитку підприємств харчування і торгівлі”. – Харків: ХДУХТ. - 2003. – С. 246-247.

51. Поперечный А.Н. Определение амплитуды колебаний и мощности инерционного привода виброконвейера // Труды междунар. науч.-техн. конф. “Горная энергомеханика и автоматика”. – Донецк: ДонНТУ. - 2003. – Т. 1. – С. 220-227.

АНОТАЦІЯ

Поперечний А.М. Наукове обґрунтування впливу механічних коливань на інтенсифікацію процесів переробки харчової сировини. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.18.12 – процеси й обладнання харчових, мікробіологічних і фармацевтичних виробництв. – Харківський державний університет харчування та торгівлі Міністерства освіти і науки України, Харків, 2004.

Дисертацію присвячено розробці та впровадженню в переробні галузі АПК України наукових основ та апаратурного оформлення високоінтенсивних процесів з застосуванням механічних коливань, які забезпечують зниження питомих витрат енергії, капітальних та експлуатаційних затрат, а також підвищення якості продуктів.

Теоретично обґрунтований і експериментально підтверджений вплив низькочастотних механічних коливань (вібрацій) на інтенсифікацію таких процесів: миття харчової сировини (на прикладі субпродуктів), ультрафільтраційного концентрування біологічних рідин (на прикладі м'ясокісткових бульйонів, соєвого молока, склотин), конвективного сушіння рослинних матеріалів в аеровіброкіплячому шарі (на прикладі топінамбура, хріна, гліду) та сушіння і термічної обробки різноманітної харчової сировини ІЧ-нагріванням в віброкіплячому шарі (на прикладі соєвих бобів, крохмалю, зерен пшениці, окари та інш.). Встановлені раціональні параметри досліджених процесів.

Запропоновано ряд прогресивних технологічних схем і вдосконаленого обладнання для безвідходної переробки харчової сировини з застосуванням механічних коливань. Результати досліджень упроваджені на харчових виробництвах та підприємствах харчового машинобудування.

Ключові слова: харчова сировина, процеси переробки, вібрація, сушіння, миття, ультрафільтрація, амплітуда, частота.

АННОТАЦИЯ

Поперечный А.Н. Научное обоснование влияния механических колебаний на интенсификацию процессов переработки 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 образования и науки Украины, Харьков, 2004.

Диссертация посвящена разработке и внедрению в перерабатывающие отрасли АПК Украины научных основ и апаратурного оформления высокоинтенсивных процессов с применением механических колебаний, которые обеспечивают снижение удельных затрат энергии, капитальных и эксплуатационных расходов, а также повышение качества продуктов. Предложена научная концепция о влиянии механических колебаний (вибраций) на интенсификацию гидромеханических, тепло-, массообменных процессов и

транспортирование пищевого сырья. Для реализации концепции определены следующие наименее изученные направления – мойка, ультрафильтрация, сушка и термическая обработка пищевого сырья.

Теоретически обосновано влияние механических колебаний на интенсификацию процесса мойки пищевого сырья (на примере субпродуктов), которое состоит в определении импульсов мгновенных сил давления на пленку грязи. С целью интенсификации процесса мойки аналитическое исследование вибрационного транспортирования продукта предусматривает интенсивное подбрасывание последнего, кратное периоду вынужденных колебаний. Движение тела при этом разделено на два участка: совместное с поверхностью вибрирующего перфорированного лотка и свободное движение, называемое “полетом”.

Получены формулы для определения средней скорости вибротранспортирования субпродуктов, амплитуды колебаний и мощности инерционного привода рабочего органа с учетом взаимного влияния масс ведущего (привода) и ведомого (вибрлотка) звеньев, а также гидравлического сопротивления, пропорционального квадрату скорости. Впервые экспериментально исследован процесс вибротранспортирования субпродуктов при их мойке в разработанном вибрационном устройстве для мойки субпродуктов; выполнено моделирование процесса, связывающее качество мойки, производительность устройства, потребляемую мощность с параметрами вибрации – амплитудой и частотой колебаний рабочего органа.

Для уменьшения величины сопротивления и увеличения движущей силы при ультрафильтрационном концентрировании биологических жидкостей предложено и теоретически обосновано использование перфорированной вибрирующей пластины, размещенной в близости от плоской ультрафильтрационной мембраны. Теоретическая модель предполагает повышение проницаемости мембраны за счет возникновения дополнительного давления, вызываемого образованием пакета волн в виде солитонов, и эффекта срыва гелевого слоя с поверхности мембраны под действием поперечного градиента давления, образуемого вихревыми струеподобными структурами. Экспериментально подтверждено увеличение проницаемости мембраны в 1,5...2,0 раза за счет использования вибрационных воздействий (на примере ультрафильтрационного концентрирования мясокостных бульонов, соевого молока и пахты), установлены рациональные режимы осуществления процесса концентрирования отмеченных продуктов.

Теоретическое обоснование влияния механических колебаний на интенсификацию тепло-, массообмена в процессах сушки пищевого сырья в аэровиброкипящем слое (АВКС) базируется на рассмотрении активных гидродинамических режимов, а также на взаимодействии эффектов кавитации и изменения избыточного давления жидкости в каналах, которые вибрируют.

Исследовано гидродинамику аэрокипящего (АКС) и аэровиброкипящего слоя (АВКС) растительных материалов (на примере корней хрена, клубней топинамбура и плодов боярышника) при различных параметрах вибраций, а также тепло- и массообмен при их сушке. Эффект влияния механических колебаний на процесс сушки проявляется в увеличении интенсивности сушки в периоде постоянной скорости и уменьшении скорости теплоносителя в 1,5...1,6 раза, а

также увеличении производительности аппаратов с АВКС в сравнении с АКС на 20...50%.

Приведены теоретические предпосылки ИК-нагрева продуктов в виброкипящем слое (ВКС), которые достаточно точно отражают тепло- и массообмен при сушке и термической обработке разнообразного пищевого сырья, что подтверждается экспериментальными исследованиями. На основании уравнения теплового баланса процесса получено выражение, связывающее температуру продукта с плотностью теплового потока и временем термической обработки. Перемещение и интенсивное перемешивание продуктов в ВКС создают условия постоянного обновления слоя продукта, находящегося в зоне действия ИК-излучения. Это обеспечивает импульсный нагрев продуктов и позволяет при высоких тепловых напряжениях избежать их перегрева. Установлены рациональные режимы сушки и термической обработки макаронных изделий, крахмала, зерен пшеницы, окары и соевых бобов ИК-излучением в ВКС.

Предложен ряд прогрессивных технологических схем по безотходной переработке пищевого сырья, разработана конструкторская документация на ряд перспективных вибрационных аппаратов – аппарат жарочный вибрационный, вибрационный сушильно-охладительный аппарат, аппарат для просеивания и радиационной сушки крахмала, устройство для мойки субпродуктов и три конструкции ультрафильтрационного модуля.

Результаты исследований внедрены на пищевых производствах и предприятиях пищевого машиностроения.

Ключевые слова: пищевое сырье, процессы переработки, вибрация, сушка, мойка, ультрафильтрация, амплитуда, частота.

THE SUMMARY

Poperechny A. M. Scientific substantiation of the influence of mechanic vibrations on the intensification of raw foodstuff processing. - Manuscript.

Thesis on competition of a scientific degree of the doctor of engineering science behind a 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, 2004.

The dissertation is dedicated to the development and inculeation of the scientific bases and hardware design of highly intensive processes with the application of vibration methods, which provide improvement of the quality of products, decrease of specific energy consumption, capital and working costs in APS refining area of Ukraine.

Influence of low-frequency mechanic vibrations at the intensification of such processes: washing of raw foodstuff (e.g. subproducts), ultra filtrational concentration of biological liquids (e.g. meat-and-bone broth, soya milk, etc) convective drying of vegetable materials in aerovibroboiled seam (e.g. horse-radish, topinamber), and drying and thermal processing of different raw foodstuf IR-heating in aerovibroboiled seam (e.g. soya beans, starch, wheat grains etc) are theoretically and experimentally confirmed. Rational parameters of the processes under research are determined.

A number of progressive technological schemes and improved equipment for wasteless processing of raw foodstuff with the application of vibration methods are

offered. Result of researches are inculcated on catering and food engineering enterprises.

Keywords: raw foodstuff, processing, vibration, drying, placer mining, ultra-filtration, amplitude, frequency.

Підп. до друку 20.05.2004. Формат 60x84 1/16. Папір офс. Друк. офс.
Обл.- вид. арк. 2,0. Умов. друк. арк. 2,1. Умов. фарб.- відб. 2,1
Тираж 100 прим. Зам. № _____

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