

#втореср
0-58

4

Одеська державна академія холоду

Онiщенко Володимир Петрович

УДК 637.5.03:637.51:664.944:621.565

**НАУКОВІ ОСНОВИ ПРОЦЕСІВ ТА АПАРАТІВ
ХОЛОДИЛЬНОЇ ТЕХНОЛОГІЇ ХАРЧОВИХ
ПРОДУКТІВ**

Спеціальність 05.18.14 – Холодильна технологія харчових продуктів

АВТОРЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового ступеня

доктора технічних наук

ОДЕСА – 2001

Дисертацією є рукопис.

Роботу виконано в Одеській державній академії холоду Міністерства освіти і науки України.

Науковий консультант роботи – заслужений діяч науки України, доктор технічних наук, професор Чумак І.Г., ректор Одеської державної академії холоду.

Офіційні опоненти: д.т.н., професор Федорів Володимир Гаврилович,
Український державний університет харчових технологій,
професор кафедри;

д.т.н., професор Загоруйко Василь Онисимович,
Одеський державний морський університет, професор кафедри;

д.т.н., професор Павлюк Раїса Юр'ївна,
Харківська державна академія технологій та організації
харчування, завідувач кафедри.

Провідна установа – Одеська державна академія харчових технологій
Міністерства освіти і науки України

Захист відбудеться << 12 >> березня 2001 р. о 11 годині на засіданні спеціальної вченої ради Д41.087.01 в Одеській державній академії холоду (ОДАХ) за адресою: Одеса, вул. Дворянська 1/3, Україна, 65026.

Кожна ознайомиться у бібліотеці ОДАХ.

31.01.2001 р.

вченої

В.І. Мілованов

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

xv 1131
ІНСТИТУТ ХОЛОДУ
ОНАХТ
БІБЛІОТЕКА

Вирішення продовольчих проблем людства стало сьогодні проблемою глобального екологічного характеру. На тлі падіння врожаїв сільськогосподарських культур альтернативою стають задачі зменшення втрат зібраного врожаю, бо, за різними оцінками, втрати харчової сировини сягають 30% від загального обсягу її виробництва, а для плодоовочевої сировини – до 40%. Холодильні технології мають відіграти життєво важливу роль у зменшенні цих втрат, паралельно із зменшенням витрат електроенергії на одиницю виробленої продукції.

Актуальними є ці ж проблеми для м'ясо- та рибороберобних галузей агропромислового комплексу України. На промислових холодильниках реалізуються холодильні технології, розроблені у 50-60 рр., витрати електроенергії в два-три рази перевищують необхідні значення, супроводжуються високими значеннями втрат від усушки, мікробіологічного псування тощо. Основною причиною цих недоліків є виконання процесів холодильної обробки в камерах циклічного завантаження, де неможливо досягти узгодження між тепловим навантаженням від охолоджуваного продукту та холодовидатністю встановленого теплообмінного обладнання. Таке узгодження і відповідно вирішення задач енергозбереження та зменшення втрат маси продуктів від усушки досягається при організації поточної холодильної обробки, коли холодильна обробка та транспортування продукції вздовж камер (тунелів) виконуються одночасно. Вирішенню теплофізичних, тепломасообмінних задач, а звідси і задач проектування процесів та тунелів, апаратів потокової холодильної обробки м'яса, риби та продуктів з них присвячено дану роботу. Серед великої кількості вчених, що плідно працювали в рамках окреслених проблем, зокрема тих, на наукові результати яких ми спирались при виконанні задач цієї роботи, необхідно назвати такі імена: Алямовський І.Г., Бражников О.М., Головін М.О., Гоголін А.А., Жадан В.З., Загоруйко В.О., Ільїнський Д.М., Кесельман П.М., Латишев В.П., Рютюв Д.Г., Чумак І.Г., Чижов Г.Б., Шеффер О.П., Фікіїн А.Г., Федорів В.Г., Bailey C., Cleland A.C., James S., Levy F., Lorentzen G., Merkel F., Riedel L., Tamm W.

Розв'язання задач цієї роботи проводилось шляхом теоретичних та експериментальних досліджень у лабораторних і промислових умовах:

- в рамках загального плану науково-дослідних та дослідно-конструкторських робіт Мінм'ясомолпрому (Держагропрому) УРСР, конкретно – галузевою науково-дослідною лабораторією охолоджуючих систем промислових холодильників при Одеській державній академії холоду (ОДАХ) в період 1975-1992 рр., наприклад: за темою “Вишукати, дослідити і розробити методи та системи охолодження, що забезпечують створення оптимальних умов холодильної обробки та системи охолодження м'ясних і молочних продуктів”, що виконана в 1985 р., № держреєстрації 01824066180; за темою “Дослідити та розробити нові промислові охолоджуючі системи підприємств харчової промисловості з метою зниження втрат сировини, енерговитрат та екологічного забруднення довкілля”, що виконана в 1992 р., договір № 9207 між ОДАХ та УкрНДм'ясомолпромом, № держреєстрації 010910040642;
- в рамках проекту 03.13.00/060 – “Крига” за темою “Створення ресурсо- і енергозберігаючих технологій холодильної обробки харчових продуктів тваринного та рослинного походження”, що

виконувався у 1993-1996 рр. згідно з наказом Державного комітету з науки та технологій України від 03.08.1993 р.;

– в рамках науково-технічної програми Української академії аграрних наук (УААН) на 1996 - 2000 рр. “Промислові біотехнології для АПК”, підпрограма “Системи охолодження і комплексного теплохолодозабезпечення переробки і зберігання сільськогосподарської продукції”, що виконувалась Інженерно-технологічним інститутом “Біотехніка” (м. Одеса) УААН у період 1996 - 2000 рр., № держреєстрації 0197U009968;

– в рамках госпдогвірних робіт між ОДАХ та м'ясокомбінатами в містах Первомайськ, Стрий, Ужгород, Мукачево, Полтава, Вознесенськ, Миколаїв, Херсон, Нова Каховка, Дніпропетровськ, Чернівці, Тернопіль, Прилуки, Мелітополь, Черкаси, Кам'янець-Подільський та інших, у період 1975-2000 рр., в яких вирішувались питання модернізації охолоджуючих систем холодильників та техніко-технологічної експертизи, спрямованої на зменшення витрат енергії та втрат маси м'яса від усушки.

При виконанні цих робіт автором, на базі розроблених ним математичних моделей, розв'язувались задачі математичного моделювання процесів охолодження та заморожування м'яса в умовах конкретного промислового холодильника, розробки технічних та технологічних рішень чи пропозицій з модернізації охолоджуючих систем, проведення в лабораторних чи в промислових умовах контрольних дослідів за режимами холодильної обробки та втратами від усушки, розроблювались алгоритми, розрахункові процедури та проводились розрахунки з аналізу показників виробництва м'яса за тривалі відрізки часу, узагальнення результатів та розробка тепломасообмінної частини при проектуванні тунелів (камер) потокової холодильної обробки м'яса, риби тощо.

Метою роботи є створення наукових основ холодильної технології харчових продуктів, необхідних для проектування процесів та апаратів потокової холодильної обробки харчової сировини та продуктів в умовах промислових холодильників, з розв'язанням задач енерго- та ресурсозбереження. Конкретними **об'єктами досліджень** тут стали процеси та системи охолодження, заморожування, розморожування м'яса, риби, а також тепловологісні процеси формування втрат їх маси від усушки. На цьому тлі об'єктами досліджень виступають і сама м'ясна та рибна сировина, холодоносії – вологе повітря, теплофізичні властивості (рівняння стану) яких є невід'ємною компонентою задач проектування і процесів, і апаратів холодильної технології.

Досягнення поставленої мети обумовило формулювання та розв'язання таких окремих задач:

– аналіз існуючих в літературі методів, технологій холодильної обробки м'ясної, рибної сировини та продуктів в напрямку виявлення нових шляхів, що ведуть до зменшення питомої витрати електроенергії та втрат маси сировини від усушки;

– розробка методів розрахунку всього переліку характеристик процесів холодильної обробки об'єктів з харчової сировини в режимі реального часу процесів, тобто температурних полів, теплових потоків, полів частки вимороженої води, середньооб'ємних, середньоентальпійних значень температур тощо, а не тільки загальної тривалості процесів, як це має місце в існуючих сьогодні методиках. При цьому необхідний перелік має бути повним і для розв'язання задач розрахунку величин втрат маси сировини від усушки;

– розробка крайової нестационарної задачі теплопровідності для тіл неправильної геометричної форми (напівтуші яловичини, свинини; тушки курей з внутрішньою порожниною; різні рибні форми; харчова сировина, упакована в плівки, різної геометричної форми; піраміди, кулі, яйцевидні форми тощо, виготовлені з тилози), що моделює температурні поля в них, теплові потоки в режимі реального часу;

– розробка рішень крайової нестационарної задачі теплопровідності відповідно до умов процесів охолодження, заморожування, розморожування об'єктів неправильної геометричної форми при довільних змінах параметрів охолоджуючого середовища в часі;

– проведення експериментальних досліджень геометрії тушок курей різної маси, побудова кореляційних співвідношень для подальшого розрахунку теплообмінних характеристик;

– розробка методів та розрахункових процедур для теплофізичних властивостей м'яса курей, риби, тилози в залежності від температури та з урахуванням даних про динаміку протікання фазових перетворень в них;

– проведення експериментальних досліджень динаміки формування температурних профілів, теплових потоків з поверхні для таких об'єктів холодильної обробки, де відповідних літературних даних недостатньо для апробації розроблених алгоритмів;

– проведення детальної апробації розроблених рішень та реалізуючих їх чисельних алгоритмів, процедур шляхом зіставлення розрахункових та експериментальних даних за теплофізичними властивостями, температурними полями, тепловими потоками, тривалістю процесів в рамках єдиного підходу при моделюванні процесів холодильної обробки об'єктів різної геометричної форми з різної сировини. При позитивних результатах апробації необхідно відповісти і на питання про те, чому існуючі в літературі методи моделювання процесів заморожування не дають навіть можливості надійного прогнозування значень тривалості процесів;

– проведення детальних досліджень процесів попереднього охолодження та попереднього заморожування в напрямку розробки методики розрахунку теплових навантажень на охолоджуюче обладнання при реалізації цих процесів в потокових охолоджуючих системах (тунелях);

– розробка термодинамічної теорії тепловологісних процесів для розрахунку значень втрат маси неупакованої харчової сировини при її холодильній обробці;

– проведення експериментальних досліджень втрат маси харчової сировини від усушки в лабораторних та промислових умовах, з вимірюванням тих характеристик тепловологісного процесу, що необхідні для апробації розробленої термодинамічної теорії;

– розробка рівняння стану вологого повітря, регульованих газових середовищ як газових сумішей змінного складу в тепловологісних процесах, з введенням у перелік термодинамічних властивостей цих об'єктів тепловологісних похідних, що кількісно визначають зміни калоричних властивостей та вологовмісту охолоджуючих середовищ (діапазон температур 173-700 К та тиск до 5 МПа);

– проведення достатньо повної апробації розробленої термодинамічної теорії тепловологісних процесів шляхом зіставлення розрахункових та експериментальних даних з характеристик різних (політропних) тепловологісних процесів;

– розробка тепловологісної моделі, відповідних розрахункових алгоритмів для проектування тунелів поточної холодильної обробки харчової сировини.

Розв'язання сформульованих задач досягнуто при використанні таких **методів досліджень**:

- побудову рівняння стану вологого повітря, газових сумішей як охолоджуючих середовищ виконано в рамках теоретично обґрунтованого рівняння стану з віральними коефіцієнтами та термодинамічної теорії збурень в статистичній фізиці рідкого та газового стану речовини,
- побудову напівемпіричних розрахункових співвідношень для теплофізичних властивостей харчової сировини проведено на базі стандартизованих даних для води, льоду, з урахуванням сучасних даних про динаміку фазових перетворень вода-лід, лід-вода, з детальною апробацією співвідношень на прикладі зіставлення з літературними експериментальними даними для різної харчової сировини, різного її складу,
- крайову нестационарну задачу теплопровідності, що моделює процеси охолодження, заморожування та розморожування об'єктів неправильної геометричної форми з харчової сировини при довільних змінах в часі характеристик охолоджуючого середовища, сформульовано на базі одновимірної **інтерполяційної** крайової задачі, з інтерполяційним параметром, що характеризує геометрію об'єкта холодильної обробки як співвідношення між його об'ємом, теплообмінною поверхнею та характерним розміром. При цьому використано методи математичного або чисельного розв'язання відповідних задач, що дозволяють коректно одержувати значення теплових потоків як похідних температурних полів. На рівні лінійних задач охолодження така можливість досягнута за рахунок формулювання розв'язку у вигляді інтегральних рівнянь з ядрами на основі нових спеціальних функцій (на відміну від розв'язків у вигляді класичних рядів Фур'є). Для процесів заморожування чи розморожування відповідна нелінійна крайова задача розв'язувалась чисельно з використанням процедури **локального усереднення** значень теплофізичних властивостей харчової сировини в околі кожного вузла інтегрування. Апробація розроблених розв'язань та реалізуючих їх алгоритмів проведена шляхом зіставлення з власними експериментальними даними та експериментальними даними інших авторів;
- експериментальні дослідження проведено з використанням сучасних приладів, в рамках стандартизованих методик, проаналізовано узгодження одержаних результатів з даними інших авторів;
- розробка нової термодинамічної теорії тепловологісних процесів проведена в класичних термінах теорії кондиціювання повітря, без суперечностей із стандартами в цій галузі. Апробація теорії проведена не тільки в рамках головних для цієї роботи процесів формування втрат від усушки, а й зіставленням із стандартизованими та експериментальними даними з формування різниці температур сухого й мокрого термометрів у повітрі, розчинності води в газах під тиском, температурних ефектів при швидкому охолодженні листових овочів в атмосфері зниженого тиску;
- розроблені нові методи проектування тунелів потокової холодильної обробки не суперечать діючим технологічним інструкціям, стандартам у галузі проектування охолоджуючих систем промислових холодильників.

Одержані в роботі нові наукові результати дозволяють сформулювати та висунути до захисту такі **наукові положення**:

1. Протікання процесів заморожування чи розморожування харчової сировини, в основному, визначається ефектом локалізації теплоти в об'єктах холодильної обробки, який проявляється як результат взаємодії тепловиділень при фазових перетвореннях вода-лід та граничних умов теплообміну (режими із заостренням для рівнянь параболічного типу).

Це наукове положення розкриває основний недолік розроблених іншими авторами методів розрахунку характеристик процесів заморожування харчових продуктів, а саме: в математичних моделях не розв'язувалось диференційне рівняння теплопровідності (відповідні апроксимаційні розв'язки не задовольняли аксіомі збереження енергії), теплота фазових перетворень враховувалась двічі – в значеннях теплоємності продукту та в граничних умовах Стефана, Лейбензона тощо; лінійні, а, тим більше, і квадратичні, дробові наближення для температурного поля продукту не відображали складні, реальні температурні профілі та їх зміни в часі. **Вперше** в даній роботі нелінійна, коректна постановка математичної моделі процесів заморожування, розморожування, врахування деталей залежності теплофізичних властивостей харчової сировини від температури, її складу та динаміки фазових перетворень, відхід від традиційного трактування цих процесів як задач Стефана дозволили досягти суттєво кращих результатів щодо опису та прогнозування характеристик процесів, використати їх для розв'язання задач проектування.

2. Формування втрат маси неупакованої харчової сировини, продуктів від усушки при холодильній обробці визначається двома головними факторами – динамікою відведення (підведення) теплоти в процесі обробки та здатністю охолоджуючого повітря засвоювати вологу.

Це наукове положення обґрунтовано розроблено автором **вперше**, коректно і послідовно, термодинамічною теорією тепловологісних процесів, апробація якої проведена на розширеній базі експериментальних даних, одержаних автором та іншими науковцями в лабораторних та промислових умовах. У цій розробці дістали подальший розвиток роботи проф. В.З.Жадана з прогнозування втрат від усушки при холодильній обробці, зберіганні м'яса та плодоовочевої сировини. Здатність охолоджуючого повітря засвоювати (розчиняти) вологу визначається параметрами його термодинамічного стану та витратами. Це зумовило детальну розробку в цій роботі рівняння стану вологого повітря та близьких до нього газових сумішей.

Практичне значення одержаних наукових результатів полягає в тому, що розроблені наукові основи процесів та апаратів холодильної обробки є базою для проектування систем їх потокової холодильної обробки в тунелях, швидкозаморожувальних апаратах, що дозволяють ефективно розв'язувати задачі енерго- та ресурсозбереження на промислових холодильниках, при проектуванні нових чи модернізації діючих охолоджуючих систем. Це досягається шляхом більш точного розрахунку теплових навантажень на охолоджуюче обладнання, стабілізації цього теплового навантаження в часі при використанні потокових охолоджуючих систем, підбору холодовадності обладнання відповідно до значень теплового навантаження, досягнутої можливості розробки

та ефективної роботи систем технологічного контролю процесів холодильної обробки сировини, розробки методів контролю втрат маси сировини від усушки та вибору режимних характеристик процесів холодильної обробки, які забезпечують зменшення таких втрат.

Результати роботи впроваджені на багатьох холодильниках м'ясокомбінатів України в рамках держбюджетних та госпдоговірних робіт, проектів, що зазначені вище. Розроблені норми усушки парного м'яса – яловичини молодих тварин при його холодильній обробці, норми усушки різних категорій м'яса при його заморожуванні в камерах холодильників, які затверджені та введені в дію Головою с/госпромом Мінсільгоспспроду України в 1994-1995 рр. Розроблено керівний документ "Методические указания. Проектирование туннелей для холодильной обработки мяса в потоке" (РДМУ 49.54-85), який затверджено Міністерством м'ясної та молочної промисловості СРСР і введено в дію з 01.01.1985 р.

Особистий внесок автора в одержанні наукових результатів роботи полягає в тому, що ним розроблено основні математичні моделі досліджених процесів, виконано розв'язання всіх сформульованих математичних і теплофізичних задач, розроблено методику проектування систем потокової холодильної обробки, розроблено основи методики проведення техніко-технологічної експертизи холодильників м'ясокомбінатів та нормування втрат від усушки відповідно до конкретних умов холодильної обробки на них, проведено необхідні експериментальні дослідження в лабораторних та промислових умовах, їх обробку та всі розрахунки з апробації математичних моделей, узагальнено результати досліджень та сформульовано наукові результати робіт, створено всі необхідні пакети розрахункових процедур. Ряд наукових результатів одержано у співпраці з аспірантами автора: к.т.н. Желіба Ю.О. – дослідження процесів холодильної обробки тушок курей; к.т.н. Головський С.С. - дослідження процесів холодильної обробки упакованої в плівки яловичини; к.т.н. Чумак Н.І. - дослідження процесів формування втрат маси м'яса від усушки. Ідеї, результати досліджень наукового консультанта цієї роботи проф. І.Г.Чумака відносно процесів однофазного заморожування м'яса, доцільності організації процесів попереднього охолодження та попереднього заморожування дістали в цій роботі подальший розвиток та впровадження в методиках проектування, при модернізації охолоджуючих систем конкретних підприємств.

Апробація результатів дисертації досягнута шляхом їх обговорення на більш ніж 30 наукових конференціях, зокрема: на Всесоюзних науково-технічних, науково-практичних конференціях з холоду та його використання в переробних галузях АПК (Ташкент, 1977; Ташкент, 1985; Ленінград, 1986; Кишинів, 1987; Углич, 1988; Одеса, 1989; Санкт-Петербург, 1991); на Всесоюзному семінарі з проблем зменшення втрат харчової продукції (Калінінград, 1983), на республіканських і міжнародних науково-технічних конференціях з нових технологій, обладнання, ресурсозбереження в АПК (Київ, 1989; Київ, 1991; Київ, 1993); на Міжреспубліканській науково-практичній конференції з удосконалення холодильної техніки та технологій мікропроцесорних засобів та міні-ЕОМ у м'ясній та молочної промисловості (Москва, 1983); на ІХ Міжнародній конференції з удосконалення процесів, апаратів хімічних, харчових, нафтохімічних виробництв (Одеса, 1996), на Міжнародній науково-технічній конференції "Холод и пищевые производства" (С.-Петербург,

1996); на Всесоюзному колоквиумі "Процессы и аппараты пищевых производств" під керівництвом акад. М.М. Липатова, засідання №118 від 26.10.1990 р.; на Науковій сесії "35 години ВИХВІП" (Пловдив, 1988); на Міжнародній науково-технічній конференції "Хладильна обработка на мясо и месните произведения" (Софія, 1979); на 26 Європейському конгресі робітників м'ясної промисловості (Colorado, 1980); на 31 Європейському конгресі робітників м'ясної промисловості (Sofia, 1987); на конференціях Міжнародного Інституту Холоду (IIR), комісії B2, C2, D1, D2/3 (Dresden, 1990; Istanbul, 1994; Bordeaux, 1996; Sofia, 1999); на Міжнародних конгресах з холоду (Montreal, 1991; The Hague, 1995; Sydney, 1999).

Публікації про результати дисертаційної роботи налічують 96 найменувань, основні з них: 4 монографії у співавторстві; 14 статей в періодичних фахових журналах; 8 брошур (статей) видання Центрального АгроНДІТЕІ м'ясної та молочної промисловості (Москва); 45 публікацій у вигляді доповідей, тез доповідей у збірниках наукових праць республіканських, всесоюзних, міжнародних семінарів, конференцій, конгресів; 3 авторських свідоцтва на винахід, 3 нормативно-технічні документи.

Обсяг та структура роботи. Дисертація складається зі вступу, семи розділів, висновків, списку використаних джерел та додатків. Загальний обсяг роботи – 415 с., включаючи 61 рисунок, 26 таблиць, 548 найменувань бібліографії на 32 с. та шести додатків на 53 с.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтована актуальність теми дисертації, відображено зв'язок роботи з науковими програмами, темами, сформульовано мету та конкретні задачі проведених досліджень, дано характеристику застосованим методам досліджень. Наведені наукові положення, що узагальнюють одержані наукові результати, дані про публікації та апробацію результатів досліджень, їх практичну значимість.

У першому розділі проведено аналіз сучасного стану моделювання і проектування процесів та апаратів холодильної обробки харчової сировини і продуктів в умовах камер, тунелів холодильників. Результати аналізу приводять до висновку, що необхідний розвиток технологій холодильної обробки харчової сировини, поряд із вирішенням задач енерго- та ресурсозбереження, можливо реалізувати в рамках технологій потокової холодильної обробки. Але розв'язання загальної задачі проектування процесів та охолоджуючих систем потокової холодильної обробки харчової сировини потребує формулювання та вирішення ряду конкретних наукових задач експериментального та теоретичного плану. Перелік цих задач наведено у висновках другого розділу.

Другий розділ присвячено побудові напівемпіричних співвідношень для розрахунку теплофізичних характеристик (ефективна теплоємність $C_e(T)$, густина $\rho(T)$, теплопровідність $\lambda(T)$, ентальпія $i(T)$, частка вимороженої води $\omega(T)$) харчової сировини в залежності від температури T , спираючись на знання таких залежностей для окремих компонент. Об'єктами досліджень були м'ясо яловичини, свинини, курей, риби та модельна синтетична речовина – тилоза, які розглядалися як суміші (вода, лід, жир, суха частина, нерозчинені гази) ізольованих компонент. Склад хар-

чової сировини визначався початковими значеннями вологовмісту, жировмісту та динамікою зміни частки вимороженої води, частки нерозчинених газів зі зміною температури. Опис залежностей густини та ефективної теплоємності проведено в рамках адитивних співвідношень, що апробовані в роботах В.П. Латишева для м'яса яловичини, свинини, інших продуктів. Для опису теплопровідності було апробовано п'ять різних перколяційних моделей (Г.Н. Духовенко, В.В. Новіков) з урахуванням можливих механізмів переносу теплоти в капілярних каналах.

Найбільш прийнятні результати в рамках їх зіставлення з експериментальними даними для яловичини, свинини продемонструвала так звана модель комбінованого перерізу елементарних комірок. Остаточні значення теплопровідності розраховуються в три етапи:

1) розраховуються ефективні теплопровідності L_i , $i=1,5$ середовищ, що в об'єкті охоплюють кожну i -ту компоненту (модель переносу теплоти в шаровому середовищі з компонентами, що паралельні потокові теплоти) за формулою

$$L_i = \sum_{j=1}^s \lambda_j V_j, \quad (1)$$

де V_j – об'ємні концентрації компонент (крім i -того), перенормовані до одиниці;

2) розраховуються теплопровідності K_i бінарних підсистем, що складаються з i -тої компоненти (λ_i , V_i) та компоненти (L_i , $m=1-V_i$) за формулою

$$K_i = L_i \left[1 - \frac{m}{(1-v)^{-1} - (1+m)(1-m^{1/3})(1+m^{1/3})^{-1}} \right], \quad (2)$$

де $v = \lambda_i / L_i$;

3) розраховується ефективна теплопровідність всієї системи

$$\lambda(T) = \sum_{i=1}^s \lambda_i \frac{K_i - L_i}{\lambda_i - L_i}. \quad (3)$$

Проведені розрахунки за формулами (1)-(3) показали, що експериментальні дані з теплопровідності яловичини та свинини описуються з похибкою близько 10-15%. Досягти менших значень похибки не вдалося, бо самі експериментальні дані різних авторів "розлітаються" з похибкою не меншою, ніж 10%.

Для м'яса курей, риб, а також тилози розрахункові співвідношення для всього комплексу необхідних теплофізичних характеристик одержано нами вперше. Відносно тушок курей також одержано кореляційні співвідношення між їх масою та геометричними розмірами. Одержані результати реалізовані у вигляді пакета комп'ютерних процедур.

Третій розділ присвячено розробці математичної моделі процесів охолодження об'єктів з харчової сировини як тіл неправильної геометричної форми, з різним співвідношенням об'єму V , величини теплообмінної поверхні S та характерного розміру R . Додатково приймається також, що зміни в часі температури $T_c(\tau)$ та швидкості руху (коефіцієнта тепловіддачі $\alpha(\tau)$) носять довільний

характер. Головна мета розробки – опис температурних полів, значень теплових потоків у режимі реального часу процесів охолодження.

Геометрична форма об'єктів холодильної обробки характеризується коефіцієнтом $\Gamma \in [0, 2]$, який розраховується за формулою

$$\Gamma = \frac{1}{\Phi} - 1; \quad \Phi = \frac{V}{RS}. \quad (4)$$

Якщо не використовувати локальних значень коефіцієнтів тепловіддачі, а тільки їх усереднені по поверхні (по кутових координатах) теплообміну значення, то слід математичну модель побудувати на базі одновимірного рівняння теплопровідності. При цьому досягається узагальнення оператора дивергенції цього рівняння з використанням коефіцієнта геометричної форми Γ , а необхідна математична модель набирає вигляду інтерполяційної крайової задачі

$$\left\{ \begin{aligned} C_c(\Gamma) \rho(\Gamma) \frac{\partial T(x, \tau)}{\partial \tau} &= \frac{1}{x^r} \frac{\partial}{\partial x} \left[\lambda(\Gamma) x^r \frac{\partial T(x, \tau)}{\partial x} \right], \quad x \in [R_1, R_2], \quad \tau > 0, \end{aligned} \right. \quad (5)$$

$$T(x, 0) = f(x), \quad (6)$$

$$\lambda[\Gamma(R_1, \tau)] \frac{\partial T(R_1, \tau)}{\partial x} + \alpha_1(\tau) [T_{c1}(\tau) - T(R_1, \tau)] \frac{F_1}{F_2} = 0, \quad (7)$$

$$-\lambda[\Gamma(R_2, \tau)] \frac{\partial T(R_2, \tau)}{\partial x} + \alpha_2(\tau) [T_{c2}(\tau) - T(R_2, \tau)] = 0. \quad (8)$$

Індекси 1,2 у цій задачі відносять відповідні величини до двох поверхонь теплообміну – зовнішньої та внутрішньої. Наприклад, внутрішня поверхня теплообміну (порожнина) має місце в еліпсоїді з порожниною, що моделює геометрію курки, упакованої в плівку чи обжату металевою касетою. При аналізі суцільних, без внутрішньої порожнини, тіл $\alpha_1=0$ та $R_1=0$, точка $x=R_1=0$ виступає в ролі точки симетрії температурного поля, що виникає за рахунок усереднення всіх величин, починаючи з α , T_c по зовнішній поверхні (кутових координатах) теплообміну. При сталих значеннях теплофізичних характеристик (C , ρ , λ) та коли зміна в часі величин $\alpha_1(\tau)$, $\alpha_2(\tau)$, $T_{c1}(\tau)$, $T_{c2}(\tau)$ є довільною, розв'язання крайової задачі не може бути проведено повністю аналітичним шляхом, необхідно використати наближені чисельні методи. Наприклад, використаємо в часі τ скінченно-різницьову схему, а за координатою x – аналітичне інтегрування одержаної задачі. Виберемо вузли скінченно-різницьової схеми з довільно-змінним кроком $h(\kappa)$:

$$\tau_{\kappa+1} = \tau_{\kappa} + h(\kappa), \quad \kappa = 0, 1, 2, \dots$$

$$T(x, \tau_{\kappa}) \equiv T_{\kappa}(x), \quad T(x, 0) = T_0(x) = f(x).$$

Якщо далі ввести позначення $\beta_k^2 = 2 C \rho / (h(\kappa) \lambda)$, то розв'язання відповідної крайової задачі знаходиться в термінах спеціальної функції вигляду:

$$M_{\nu}(z) = 1 + \sum_{k=1}^{\infty} \frac{z^{2k}}{(2k)!! (2k + \nu)!!}. \quad (9)$$

Ми назвали її модифікованою функцією Михайлова відповідно до функції Михайлова М.Д. Коли $\Gamma=0$; 2, ці функції вироджуються в елементарні, а саме в

$$M_1(z) = \frac{\text{Sh}(z)}{z}, M_{-1}(z) = \text{Ch}(z).$$

При $\Gamma=1$ одержуємо $M_0(z)=I_0(z)$, де $I_0(z)$ – модифікована функція Бесселя 1 роду нульового порядку. Саме розв'язання скінченно-різницевого аналогу рівняння теплопровідності знаходиться методом функцій Гріна і має вигляд

$$T_{k+1}(x) = A \cdot M_{\Gamma-1}(\beta_k x) + B \cdot (\beta_k x)^{\Gamma-1} \cdot M_{1-\Gamma}(\beta_k x) + \int_0^x \frac{F_k(y) \cdot (\beta_k y)}{\beta_k W_\Gamma(\beta_k y)} \left(\frac{y}{x} \right)^{\Gamma-1} \cdot M_{\Gamma-1}(\beta_k y) M_{1-\Gamma}(\beta_k x) - M_{1-\Gamma}(\beta_k y) M_{\Gamma-1}(\beta_k x) dy, \quad (10)$$

$$F_k(x) = \frac{\partial^2 T_k(x)}{\partial x^2} - \frac{\Gamma}{x} \frac{\partial T_k(x)}{\partial x} - \beta_k^2 T_k(x),$$

$$\begin{cases} W_\Gamma(z) \equiv (1-\Gamma) Q_{1-\Gamma}(z) M_{\Gamma-1}(z) - \frac{z^2}{\Gamma+1} M_{\Gamma+1}(z) \cdot M_{1-\Gamma}(z), \\ Q_{1-\Gamma}(z) \equiv M_{1-\Gamma}(z) + \frac{z^2}{(1-\Gamma)(3-\Gamma)} M_{3-\Gamma}(z). \end{cases}$$

Сталі А, В в (10) знаходяться за умов задовільнення граничних умов (7), (8). Заздалегідь необхідно вписати вирази для $\frac{\partial T_{k+1}(x)}{\partial x}$ та $\frac{\partial^2 T_{k+1}(x)}{\partial x^2}$, значення яких потрібно розраховувати на кожному кроці (в часі) інтегрування крайової задачі. Перша похідна необхідна і для розрахунку теплових потоків, розрахункового контролю значень температури поверхні об'єктів охолодження. Реалізація одержаного розв'язку проведена шляхом розробки спеціальних комп'ютерних процедур, що дозволило одержувати поля значень $T_{k+1}(x)$, $\frac{\partial T_{k+1}(x)}{\partial x}$, $\frac{\partial^2 T_{k+1}(x)}{\partial x^2}$ та інші величини на кожному кроці інтегрування в часі.

Для апробації розробленої математичної моделі та реалізуючих її розрахункових процедур ми використали літературні експериментальні дані з температурних полів, теплових потоків, тривалості процесів охолодження харчової сировини (напівтуші яловичини та свинини, окремі риби). Також проведено власні експериментальні дослідження, об'єктом яких були четвертини яловичини масою близько 50 кг. Їх охолодження було реалізовано в кліматермокамері ІЛКА КТК-3000. Температури охолоджуючого повітря були близько значень $+2^\circ\text{C}$, 0°C , -2°C , а швидкості руху – близько 1.5 м/с. Необхідні значення температур вимірювались мідь-константановими термопарами, а швидкість руху повітря біля поверхні стегнової частини вимірювалась за допомогою багатоточкового анемометра з чутливим елементом на основі мідь-константанової диференціальної термопари. Похибка вимірювань швидкості близько $\pm 5\%$, а температури $\pm 0.05^\circ\text{C}$, але тут ніяк не враховано похибку віднесення координати точки вимірювання. З урахуванням останньої похибки вимірювань температури слід збільшити на порядок.

Зіставлення розрахункових та експериментальних даних показало, що опис температурних профілів об'єктів охолодження в режимі реального часу процесів досягається в межах похибки експериментальних даних, тобто з похибкою близько $\pm 1^\circ\text{C}$ по температурних полях і 10-15 % по теплових потоках. Таким чином, розроблена математична модель дозволяє аналізувати процеси охолодження харчової сировини різної геометричної форми. Розроблені алгоритми розрахунку використано для детального аналізу процесів попереднього охолодження напівтуш яловичини, свинини, що в практичному відношенні важливо для проектування охолоджуючих поточкових систем м'ясокомбінатів.

Четвертий розділ присвячено дослідженню та математичному моделюванню процесів заморожування та розморожування харчової сировини різної геометричної форми включно і різні геометричні форми із тилози. Як математична модель цих процесів вибрана інтерполяційна крайова задача (5)-(8) в її нелінійній постановці, тобто ми відмовились від традиційного використання тут трактування процесів заморожування чи розморожування харчової сировини як процесів з рухомою границею розділу фаз (задача Стефана). Область інтегрування задачі (5)-(8) являє собою прямокутник (при кінцевих значеннях тривалості процесу) і тому чисельне розв'язання цієї задачі може бути проведено на сітці вузлів:

$$x_{i+1} = x_i + h, \quad i = \overline{0, N-1},$$

$$h = (R_2 - R_1)/N, \quad \tau_{j+1} = \tau_j + t, \quad j = \overline{0, 1, 2, \dots}$$

Окіл "efgh" для i, j -го вузла інтегрування подано схематично на рис. 1.

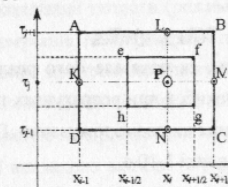


Рис. 1. Окіл "efgh" i, j -го вузла інтегрування

Наступне застосування класичних шаблонів (типу схеми Ніколсона та інших) для скінченно-різницевої апроксимації рівнянь (5)-(8) виявилось неефективним, оскільки, стосовно процесів заморожування та розморожування, не досягалось ефективне врахування залежності теплофізичних властивостей харчової сировини від температури. Тому усереднення значень теплофізичних властивостей проведено нами локально, в околі кожного окремого вузла інтегрування, в рамках виконання рівняння (5) у вигляді співвідношення:

$$\iint_{efgh} x^\Gamma C(T) \frac{\partial T(x, \tau)}{\partial \tau} dx d\tau \equiv \iint_{efgh} \frac{\partial}{\partial x} \left[\lambda(T) x^\Gamma \frac{\partial T(x, \tau)}{\partial x} \right] dx d\tau \quad (11)$$

Підстановка виразів, одержаних в результаті скінченно-різницевої апроксимації (11) в (5), веде до його апроксимації наступною системою лінійних алгебраїчних рівнянь:

$$a_{ij} T_{ij} + b_{ij} T_{i-1,j} + c_{ij} T_{i+1,j} = d_{ij}, \quad i = \overline{1, N-1}, \quad j = \overline{1, M}, \quad (12)$$

Одностороння скінченно-різницева апроксимація граничних умов (7), (8) доповнює систему (12) ще двома рівняннями, а рішення системи одержано методом прогонки, починаючи із заданого температурного поля $T_{i,0}$, $i = \overline{0, N}$ (відповідно до (6)). Температурні поля в наступні моменти часу обчислюються за співвідношенням

$$T_{ij} = M_{i-1,j} T_{i-1,j} + K_{i-1,j}, \quad (13)$$

при цьому вирази для обчислення коефіцієнтів прогонки M_{ij} , K_{ij} одержуються шляхом прямої підстановки (13) в (12).

Оскільки обчислення локально усереднених значень теплофізичних властивостей потребує знання температурних полів на трьох сусідніх проміжках часу $j-1$, j , $j+1$, то розрахунки в цілому проводились у режимі "прогноз-корекція". Розрахований температурний профіль $T_{ij} = T(x, \tau_j)$ тепер може бути використано для розрахунку теплових потоків, а також середньооб'ємного значення ентальпії об'єкта холодильної технології в j -ий момент часу

$$E(\tau_j) = \frac{\Gamma + 1}{R_2^{\Gamma+1} - R_1^{\Gamma+1}} \int_{R_1}^{R_2} x^\Gamma E(x, \tau_j) dx. \quad (14)$$

Після цього можливо обчислити середньоентальпійну температуру $T_e(\tau_j)$ об'єкта охолодження як корінь рівняння

$$E(T_e) = E(\tau_j) \quad (15)$$

та товщину u промороженого прошарку об'єкта заморожування (від поверхні) чи розморожування (від центра) як корінь рівняння

$$T(R_2 - u, \tau_j) = T_{CR} \quad (16)$$

Розроблений чисельний алгоритм, як показала його реалізація, демонструє усталену збіжність ітерацій та прийнятні значення похибок при розрахунках температурних полів, теплових потоків конкретних об'єктів заморожування чи розморожування. При цьому число кроків N за координатою дорівнювало 60-100, а крок t в часі 3-10 с.

З метою апробації розробленої математичної моделі та реалізуючих її розрахункових процедур ми використали літературні експериментальні дані по температурних полях, теплових потоках, тривалості процесів заморожування та розморожування харчової сировини (напівтуші яловичини та свинини, тушки курей, окремі риби та куски яловичини, упаковані та неупаковані в плівки). Також проведено власні експериментальні дослідження, об'єктом яких були процеси заморожування тушок курей та кусків яловичини. Їх заморожування було реалізовано в кліматермокамері ІЛКА КТК-3000 та в охолоджувальній камері НС 700/50. У першій досягались температури до мінус 20 °С та швидкості охолоджуючого повітря до 4.5 м/с, а в другій – температури до мінус 45 °С та швидкості до 3 м/с. Методика вимірювань температур (в об'єктах та охолоджуючого повітря), швидкостей руху повітря в загальних рисах така сама, як і в наших дослідженнях процесів охолодження. Характеристики процесів розморожування розраховувались в рамках припущення, що одержані (І.О.Рогов, В.Н.Кулагін) методом ЯМР дані для частки вимороженої води при розморожуванні яловичини (вологоміст 0.741) характерні і для процесів розморожування риб, тилози, яловичини різних категорій.

Зіставлення розрахункових та експериментальних даних проведено на численному експериментальному матеріалі, одержані значення відхилень такі самі, як і для процесів охолодження, включаючи процеси розморожування, хоч розрахунки характеристик останніх носять прогнозний характер. На прикладі процесів заморожування та розморожування, тривалість яких в експериментах різних авторів визначалась як час досягнення заданих значень температури в псевдоцентрі об'єктів, показана некоректність такого визначення з енергетичних позицій, обґрунтована необхідність використання для визначення тривалості процесів значень середньоентальпійної температури. Таким чином, розроблена математична модель процесів заморожування та розморожування демонструє збіжність з експериментальними даними в режимі реального часу для різних видів харчової сировини, в різних її геометричних формах. Досягнуті позитивні результати апробації математичної моделі по температурних полях $T(x, \tau)$ та теплових потоках підтверджують коректність моделі відносно врахування динаміки тепловиділень за рахунок перетворень вода-лід, лід-вода (тільки один раз в значеннях ефективної теплоємності), відносно відмови від використання фізичної трактовки задач заморожування та розморожування як задач з рухомою границею розділу фаз. Але розрахункові та експериментальні дані з динаміки просування границі температур початку кристалізації води (див. (16)) звертають увагу на немонотонний характер зміни в часі швидкості цього просування. Більш детальний аналіз одержаних результатів зі змін опуклості на вгнутості, знову вгнутості на опуклості в температурних профілях $T(x, \tau)$, $\tau = \text{Const}$ (див.рис.2) приводить до висновку про важливу роль властивостей оператора дивергенції рівняння теплопровідності, а в цілому – про роль ефектів локалізації теплоти (режимів з загостренням в задачах з рівняннями параболічного типу) при формуванні температурних полів, теплових потоків, полів частки вимороженої води та тривалості самих процесів заморожування та розморожування харчової сировини. Тому розроблена математична модель відповідає всім вимогам для подальшого вирішення задач проектування поточкових систем заморожування та розморожування харчової сировини.

У **п'ятому розділі** дисертації викладено методи та результати побудови рівняння стану вологого повітря як основного холодоносія та середовища протікання тепловологісних процесів в камерах, тунелях холодильної обробки харчових продуктів та сировини. Оскільки вологе повітря чи інші регульовані газові середовища в тепловологісних процесах є газовими сумішами змінного складу, до рівняння стану необхідно висунути підвищені вимоги – воно має бути теоретично обґрунтованим, щоб забезпечити достатньо точне обчислення термодинамічних властивостей на рівні похідних термодинамічних потенціалів по температурі, вологовмісту чи концентрації інших компонент суміші. Тому для побудови такого рівняння ми вибрали рівняння стану з віральними коефіцієнтами в діапазоні температур 173-700 К та тисків до 5 МПа. Вважається, що повітря містить в собі такі компоненти як N_2 , O_2 , Ar , CO_2 , H_2O , а міжмолекулярна взаємодія між ними описується модельним потенціалом Ф(Р) Леннарда-Джонса із параметрами $\sigma(T)$ та $\epsilon(T)$, що залежать від температури. Залежності $\sigma(T)$ та $\epsilon(T)$ виділялись нами за умов опису експериментальних даних для всього комплексу термодинамічних властивостей чистих компонент, а параметри неоднорідних взаємодій обчислювались за правилами комбінування Бьорда-Спотца-Гіршфельдера. Щоб звузити коридор можливих залежностей $\sigma(T)$ та $\epsilon(T)$, одержати їх більш "фізичні" значення,

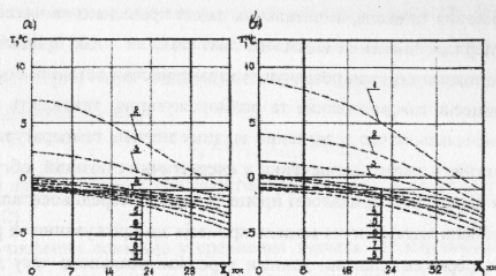


Рис. 2. Розрахункові температурні поля в кусках ялівчичини під час їх заморожування відповідно до умов двох дослідів (а та б) в різні моменти часу (1–60, 2–80, 3–100, 4–120, 5–140, 6–160, 7–180, 8–200, 9–220 хвилин).

була висунута додаткова вимога відносно залежностей $\sigma(T)$, $\varepsilon(T)$ щодо опису термодинамічних властивостей чистих компонент не тільки в газовому, а й в рідинному станах. При цьому виділення залежностей $\sigma(T)$, $\varepsilon(T)$ проводилось в рамках рівняння стану з вірйальними коефіцієнтами (з урахуванням п'ятого вірйального коефіцієнта в області газового стану) та термодинамічної теорії збурень (в області рідинного стану та густого флюїду). Для забезпечення відносної простоти обчислень, збіжності інтегралів в теорії збурень розроблено її варіант, коли всі розрахункові співвідношення сформульовані в просторі хвильових векторів, тобто в рамках інтегрального перетворення Фур'є

$$\Phi_1(r) = \begin{cases} 0, \forall r < \sigma \\ \Phi(r), \forall r \geq \sigma, \Phi(\sigma) = 0 \end{cases}, \quad \Phi_1(q) = \frac{4\pi n}{kT} \int_0^\infty \Phi(r) \frac{\sin(qr)}{qr} r^2 dr, \quad (17)$$

де n – частинкова густина. Кінцеве розрахункове співвідношення для енергії Гельмгольца в термінах функції

$$\frac{q\Phi_1(q)}{16\pi n \varepsilon(T) \sigma^2(T)} = F(z), \quad z = q\sigma, \quad (18)$$

$$F(z) = \left\{ \begin{aligned} & -\left[\frac{z^{10}}{10!} + \frac{z^4}{4!} \left[\frac{\pi}{2} - \text{Si}(z) \right] + \sin(z) \left[-\frac{3}{20} + \frac{29}{720} z^2 + \frac{5!}{10!} z^4 - \frac{3!}{10!} z^6 + \frac{1}{10!} z^8 \right] + \right. \\ & \left. \cos(z) \left[-\frac{13}{180} z + \left(\frac{1}{4!} - \frac{6!}{4!} \right) z^3 + \frac{4!}{10!} z^5 - \frac{2!}{10!} z^7 + \frac{1}{10!} z^9 \right] \right\} \end{aligned} \right.$$

та структурного фактора системи $S_0(\eta, \alpha)$ в наближенні Перкуса-Євіка має вигляд ($x = qd$)

$$\frac{F(\rho, T)}{RT} = \frac{F_0(\rho, T)}{RT} - \frac{32}{3} \frac{\eta}{T^*} \left(\frac{\sigma}{d} \right)^3 + \frac{4}{\pi T^*} \left(\frac{\sigma}{d} \right)^2 \int_0^\infty [S_0(\eta, x) - 1] F \left(\frac{x\sigma}{d} \right) x dx. \quad (19)$$

Індекс "0" відносить відповідні величини до базової системи твердих сфер, $T^* = kT/\varepsilon(T)$.

Права частина цього виразу залежить від густини через параметр упаковки η , а від температури – явно і неявно через η (залежність від температури діаметра твердих сфер $d(T)$) та параметрів $\sigma(T)$,

$\varepsilon(T)$. Тому провести диференціювання (19) для одержання явних виразів для всіх термодинамічних властивостей достатньо просто. Наприклад, рівняння тиску має вигляд

$$\frac{PV - (PV)_0}{RT} = -\frac{32}{3} \frac{\eta}{T^*} \left(\frac{\sigma}{d} \right)^3 + \frac{4}{\pi T^*} \left(\frac{\sigma}{d} \right)^2 \int_0^\infty \eta \frac{\partial S_0(\eta, x)}{\partial \eta} F \left(\frac{x\sigma}{d} \right) x dx. \quad (20)$$

Серед інших аспектів побудови рівняння стану вологого повітря слід виділити проведений нами детальний аналіз даних та одержання розрахункових співвідношень для ідеально-газової теплосності компонент з урахуванням досліджень останніх років, розрахунок 80 коефіцієнтів розкладу третього вірйального коефіцієнта в ряд по T^* , зіставлення розрахункових та експериментальних літературних даних за другими та третіми вірйальними коефіцієнтами чистих компонент та їх бінарних сумішей, сухого повітря. В цілому, для опису термодинамічних властивостей вологого повітря у вибраному діапазоні параметрів стану, з похибками на рівні похибок експериментальних даних, достатньо урахування другого, максимум третього вірйальних коефіцієнтів. Виділені в роботі залежності $\sigma(T)$ та $\varepsilon(T)$ забезпечують похибку в $\pm 1 \text{ см}^3/\text{моль}$ в обчисленні другого вірйального коефіцієнта однорідних взаємодій та $\pm 3-7 \text{ см}^3/\text{моль}$ для неоднорідних взаємодій. Розроблений пакет комп'ютерних процедур забезпечує розрахунок всього комплексу термодинамічних властивостей вологого повітря та інших сумішей довільної концентрації із тих самих компонент.

Шостий розділ присвячено розробці та апробації термодинамічної теорії тепловолгісних процесів як процесів взаємодії вологого повітря з поверхнею вологовміщуючого капілярно-пористого тіла. Серед таких процесів в роботі розглянуто (на загальній основі) процеси формування втрат маси харчової сировини під час її холодильної обробки (усушка), розчинності води в повітрі в залежності від його температури та тиску (газова екстракція), формування різниці температур сухого та мокрого термометрів, вакуум-випаровувального охолодження листових овочів. Кількість вологи, яку засвоїло вологе повітря масою m в елементарному тепловолгісному процесі, може бути розрахована через вирази для повного диференціала його питомої ентальпії, які записані через незалежні змінні стану вологого повітря – тиск P , температуру T , вологовміст d або P , d та відносну вологість ϕ :

$$\Delta G = \frac{\Delta Q - m \left(\frac{\partial \tilde{h}}{\partial P} \right)_{P,d} \Delta P - m \left(\frac{\partial \tilde{h}}{\partial P} \right)_{P,\phi} \Delta P}{\left(\frac{\partial \tilde{h}}{\partial d} \right)_{P,\phi}}, \quad \Delta G = \frac{\Delta Q - m \cdot C_{\text{в.п.}} \cdot \Delta T - m \left(\frac{\partial \tilde{h}}{\partial P} \right)_{T,d} \Delta P}{i_{\text{H}_2\text{O}}(P, T)}. \quad (21)$$

Тут враховано, що $\left(\frac{\partial \tilde{h}}{\partial T} \right)_{P,d} = C_{\text{в.п.}}$ – питома теплосність вологого повітря, а $\left(\frac{\partial \tilde{h}}{\partial d} \right)_{P,T} = i_{\text{H}_2\text{O}}(P, T)$ –

питома ентальпія водяної пари. Також відмітимо, що знаменники цих двох формул принципово відрізняються як кількісно, так і за фізичним змістом. Крім того, похідна $\left(\frac{\partial \tilde{h}}{\partial P} \right)_{P,d}$ має завжди

від'ємні значення, тобто в чисельнику першої з формул (21) фактично підсумовуються дві величини. В другій з формул (21) у чисельнику наявна різниця двох великих та близьких за

значенням величин, що суттєво зменшує розрахункові можливості за цією формулою. Величина $\Delta Q = m \Delta i$ характеризує загальну зміну ентальпії повітря як за рахунок зміни його температури, тиску, так і вологовмісту. Але розраховувати цю величину необхідно в рамках інших міркувань, відмінних від наведених. Наприклад, ΔQ , в рамках законів збереження теплоти та маси, повинна дорівнювати величині зміни ентальпії об'єктів взаємодії з повітрям – капілярно-пористе тіло, харчова неупакована сировина, продукт тощо. У цьому разі розрахунок ΔQ треба проводити через розрахунок температурних (ентальпійних) полів перерахованих об'єктів за методикою вищенаведених третього та четвертого розділів. З іншого боку, не слід особливо зосереджувати увагу на фізичному змісті тепловологісних похідних у знаменниках (21), бо комбінуванням формул (21) можливо одержати ряд інших аналогічних виразів, наприклад,

$$\Delta G = m \frac{C_{\text{в.п.}} \Delta T - \left(\frac{\partial \tilde{\alpha}}{\partial \phi} \right)_{p,d} \Delta \phi - \left[\left(\frac{\partial \tilde{\alpha}}{\partial p} \right)_{p,d} - \left(\frac{\partial \tilde{\alpha}}{\partial p} \right)_{T,d} \right] \Delta p}{\left(\frac{\partial \tilde{\alpha}}{\partial d} \right)_{p,\phi} - i_{\text{H}_2\text{O}}(p, T)} \quad (22)$$

У (22) фігурує вже інше тепловологісне відношення в знаменнику, немає величини ΔQ , фігурують тільки вимірювані величини та типові розрахункові термодинамічні характеристики вологого повітря. Останні (перш за все, похідні $\left(\frac{\partial \tilde{\alpha}}{\partial d} \right)_{p,\phi}$, $\left(\frac{\partial \tilde{\alpha}}{\partial \phi} \right)_{p,d}$ у разі ізобарних тепловологісних процесів) розраховуються в рамках рівняння стану вологого повітря, що розроблено нами (п'ятий розділ роботи). Аналог тепловологісної похідної $\left(\frac{\partial \tilde{\alpha}}{\partial d} \right)_{p,\phi}$, як $\frac{\Delta i}{\Delta d}$, що залежить тільки від температури, було введено на емпіричному рівні В.З. Жаданом. Проведене зіставлення цих величин показало їх якісну узгодженість при $P=1$ атм, $\phi=1$, але обидві тепловологісні похідні суттєво залежать і від тиску, і від відносної вологості.

Повна апробація розробленої термодинамічної теорії проведена нами на основі власних експериментальних даних, одержаних в процесі охолодження четвертини яловичини в кліматермокамері ПЛКА КТК-3000 за умов теплообміну, наведених в третьому розділі. Відносно вологості повітря до і після взаємодії повітря з м'ясною четвертиною вимірювали за допомогою гігрісторів, виготовлених у Ленінградському агрофізичному НДІ. Для області температур від мінус 5 °С до 5 °С було проведено тарування гігрісторів в герметичних ексикаторах з насиченими розчинами солей. Розрахункова похибка вимірювань відносної вологості не перевищувала $\pm 0.01-0.02$. Об'ємні витрати повітря склали величину близько 0.045 м³/с з відносною похибкою не більше 8%. Початкова та кінцева маси четвертин яловичини вимірювались на поштових терезах ВП-150 ШЗ з похибкою ± 0.005 кг. Втрати маси в процесах охолодження вимірювались періодично, як і температурне поле, через кожні 1-1.3 години, без порушень тепловологісного процесу при охолодженні. Це досягнуто з допомогою тензометричних терезів з похибкою ± 0.005 кг. У конструкції останніх головним елементом був важіль довжиною 800 мм, що опирався на стальну призму. На один кінець цього важеля підвішувалась четвертина яловичини, а на другий – противага, така, щоб кон-

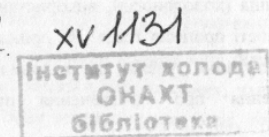
трольована вага була близько 2 кг. Нескомпенсована вага передавалась сталій тензобалці з чотирма наклеєними тензорезисторами, опором в 200 Ом кожний. Сигнал від тензорезисторів надходив в тензопосилувач УТ-4, а потім на цифровий вольтметр В7-23. Було проведено три окремі дослідження для четвертин яловичини першої категорії масою 50.2, 51.35, 50.1 кг при температурах 0 °С, 2.0 °С, мінус 2 °С. Барометричний тиск під час дослідів дорівнював 755.3, 757.6, 753.8 мм рт.ст. Зіставлення розрахункових та експериментальних даних щодо втрат маси четвертин дало позитивні результати, за результатами одного з дослідів таке зіставлення демонструється на рис.3. Однією з цілей тут було також еспериментальне підтвердження теоретичного висновку щодо більших значень втрат від усушки, коли охолоджуюче повітря має температуру в діапазоні від 0 до мінус 2 °С проти температур в діапазоні від 0 до 2 °С. Це і зумовило вибір температур повітря в проведених дослідях.

При аналізі значень втрат маси м'ясної сировини, що має місце в умовах камер промислових холодильників, не всі величини в формулах (21), (22) можуть бути визначені, з принципових причин чи за відсутністю вимірювальних приладів. Особливо це відноситься до вимірювань змін відносної вологості повітря $\Delta \phi$ в процесі взаємодії повітря з продуктом та ежекції повітря камер у струмінні, що омиває продукт. Тому величини змін ΔT та $\Delta \phi$ ми розраховували в рамках балансових співвідношень:

$$C_p(T, d) \cdot m \cdot \Delta T = \Delta Q - \Delta G \cdot i_{\text{H}_2\text{O}}(T), \quad \Delta \phi = \frac{\Delta d - \left(\frac{\partial d}{\partial T} \right)_{\phi} \cdot \Delta T}{\left(\frac{\partial d}{\partial \phi} \right)_{T}} \quad (23)$$

Обчислення $\Delta \phi$ проводились в ітераційному режимі – спочатку за першою з цих формул прогнозувалось значення ΔT , а потім уточнювалось $\Delta \phi$. Зіставлення розрахункових (прогнозних) величин втрат маси (усушки) яловичини, конини, баранини, свинини в напівтушах та різних категорій з експериментальними даними проведено нами при виконанні робіт за техніко-технологічною експертизою багатьох холодильників м'ясокомбінатів. Результати зіставлень позитивні, похибки прогнозу не перевищують похибки самих еспериментальних визначень маси м'ясної сировини. Враховуючи все ж достатньо великі значення похибок визначення маси партій м'яса по відношенню до значень втрат від усушки, нами проведена додаткова апробація розробленої термодинамічної теорії на прикладі тепловологісних процесів, для яких експериментальні дані одержано, підтверджено в різних лабораторіях світу. У цьому плані ізобарно-ізоентальпійний тепловологісний процес можливо моделює процес формування різниці температур сухого та мокрого термометрів або вакуум-випаровувального процесу охолодження листових овочів. В цьому разі з формул (21) маємо відповідне співвідношення

$$\left(\frac{\Delta T}{\Delta \phi} \right)_{i,p} = \frac{\left(\frac{\partial \tilde{\alpha}}{\partial \phi} \right)_{p,d} \cdot i_{\text{H}_2\text{O}}(T)}{C_{\text{в.п.}} \left(\frac{\partial \tilde{\alpha}}{\partial d} \right)_{p,\phi}} \quad (24)$$



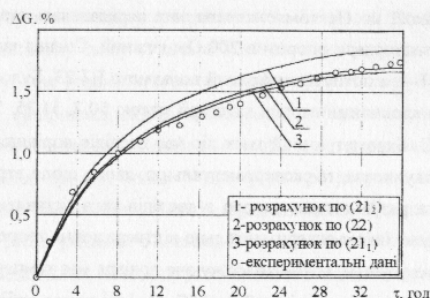


Рис. 3. Динаміка формування втрат маси чвертини яловичини в процесі її охолодження повітрям

Інтегруючи праву частину (23) за ϕ від його початкового значення, характерного для довкілля психрометра чи листових овочів, до максимального можливого 1, одержимо значення різниці чи змін температур. Аналогічно, розчинність d'' води в повітрі відповідає значенню насиченого вологовмісту при заданій температурі та тиску. Тому в разі ізобарно - ізотермічного процесу

$$d'' = - \int_0^1 \frac{\left(\frac{\partial \alpha}{\partial \phi} \right)_{P,d} \cdot d\phi}{\left(\frac{\partial \alpha}{\partial d} \right)_{P,\phi} - i_{H_2O}(P, T)} \quad (25)$$

При розрахунках за (25), особливо при підвищених значеннях тиску, уточнювались значення тиску насиченої водяної пари, його підвищення за рахунок ефекту Пойтінга. Результати інтегрування за (24)-(25) у зіставленні з експериментальними даними демонструють відхилення на рівні похибок експериментальних даних.

Аналіз одержаних результатів дозволив сформулювати вищенаведене наукове положення, розробити методику проведення та пакет комп'ютерних процедур для проведення техніко-технологічних експертиз холодильників м'ясокомбінатів.

Сьомий розділ присвячено питанням впровадження розроблених вище наукових основ проектування процесів та охолоджуючих систем в практику проектування процесів і камер, тунелів, апаратів потокової холодильної обробки харчової сировини.

Виходячи з аналізу одержаних наукових та практичних результатів, при проектуванні охолоджуючих систем необхідно відмовитись від використання усереднених значень теплофізичних властивостей харчової сировини в процесах її холодильної обробки, усередненого теплового навантаження на охолоджуюче обладнання, усереднених витрат і характеристик охолоджуючого середовища (холодоносія), використання величин типу "температура в центрі..." для визначення тривалості процесів тощо. На прикладі розробленого керівного документа "Методичні вказівки "Проектування тунелів для холодильної обробки м'яса в потоці" у розділі наведено загальні положення про призначення процесів попереднього охолодження та попереднього

заморожування, про технічні засоби для реалізації цих процесів, про вибір режимних параметрів процесів холодильної обробки, про порядок та зміст технологічних розрахунків, таких як розрахунки тривалостей процесів, температурних полів, теплових потоків, теплових навантажень на охолоджуюче обладнання. Вже вибір охолоджуючого обладнання (повітроохолоджувачів) проводиться шляхом реалізації розрахункової методики для узгодження характеристик повітроохолоджувачів, системи розподілу повітря, необхідних режимних параметрів процесів холодильної обробки, теплового навантаження на охолоджуючу систему, процесів інесутворення на поверхнях повітроохолоджувачів та формування втрат маси неупакованої сировини від усушки.

Ця методика сформульована в термінах розробленої теорії тепловологісних процесів та відомої теорії неізотермічних затоплених струменів, що дозволяє враховувати зміни і температури, і відносної вологості охолоджуючого повітря. Методика проектування тунелів потокової холодильної обробки пройшла апробацію при проектуванні тунелів попереднього охолодження та попереднього заморожування на холодильниках м'ясокомбінатів в м. Тернопіль, Прилуки, Береза (Республіка Білорусь) та інших.

За розробленою методикою виконано також проектування потокового спірального швидкозаморожувального апарата, призначеного для потокового охолодження та заморожування окремих кусків сировини чи продуктів, упакованих або неупакованих у плівки.

У **додатках** до дисертації наведено тексти ряду розроблених комп'ютерних процедур, результати проведених експериментальних досліджень, фрагмент результатів проведених техніко-технологічних експертиз на промислових холодильниках, характеристики продуктів та режимів їх охолодження в розробленому проекті потокового швидкозаморожувального апарата.

ВИСНОВКИ

Вище в розділах даної роботи наведена аргументація актуальності, методи та результати розв'язання задач розробки наукових основ холодильної технології харчових продуктів, а саме, методів проектування процесів та відповідних систем потокової холодильної обробки об'єктів з харчової сировини, в упакованому та неупакованому вигляді.

Одержані в роботі наукові результати дозволяють зробити загальний висновок про те, що сформульовані вище конкретні задачі з розробки наукових основ холодильної технології харчових продуктів, проектування сучасних потокових охолоджувальних систем у даній роботі виконані. Наукова новизна та практична значимість одержаних наукових результатів сформульована у висновках відповідних розділів роботи. Узагальнення одержаних наукових та практичних результатів проведено нами і може бути сформульовано у вигляді таких висновків за даною роботою в цілому:

1. Використання усереднених значень теплофізичних властивостей $C_p(T)$, $\rho(T)$, $\lambda(T)$ харчової сировини дозволяє описувати експериментальні дані за тривалістю процесів холодильної обробки (більшою мірою – процесів заморожування та розморожування) тільки в рамках самих, наперед відомих, експериментальних даних. Достатньо детальний опис змін температурних полів, тепло-

вих потоків під час холодильної обробки, а не тільки загальної тривалості процесу, досягається тільки за умови використання залежностей теплофізичних властивостей від температури, з урахуванням динаміки структурних та вода-лід фазових перетворень у харчовій сировині. Оскільки харчова сировина найчастіше є гетерогенною, неоднорідною термодинамічною системою, її неможливо характеризувати теплофізичними властивостями в їх класичному розумінні, використовувати зіставлення з експериментальними даними за $C_p(T), \rho(T), \lambda(T)$ для апробації розрахункових методик. У цьому плані апробацією методик опису теплофізичних властивостей харчової сировини мають виступати результати зіставлення розрахункових та експериментальних даних по температурних полях, теплових потоках, якщо залежності $C_p(T), \rho(T), \lambda(T)$ використані у відповідній методичі розв'язання крайових задач теплопровідності. Саме таку концепцію побудови моделей для розрахунку $C_p(T), \rho(T), \lambda(T)$ харчової сировини використано в даній роботі. Харчова сировина виступає як ізотропна система з ізольованими та взаємопроникаючими компонентами – водою, сухою частиною, льодом, жиром, атмосферними газами.

Побудова розрахункових співвідношень для теплоємності та густини м'яса курей, риб та синтетичної речовини – тилози проведена нами за методикою проф. В.П. Латишева в рамках зворотної задачі – виділення температурних залежностей властивостей сухої частини з даних за властивостями об'єкта в цілому. Для опису теплоємності та густини яловичини, свинини використані безпосередньо результати проф. В.П. Латишева.

Апробовано п'ять різних моделей проф. Дудльсва Г.М., Новикова В.В. для розрахунку теплопровідності м'яса яловичини, свинини, м'яса курей та риб, синтетичної речовини – тилози. Найбільш близькі до експериментальних даних дає модель комбінованого перерізу елементарних комірок досліджуваних об'єктів. На основі цієї моделі виділені залежності теплопровідності сухих компонент харчової сировини від температури. В цілому досягнута можливість опису залежностей $C_p(T), \rho(T), \lambda(T)$ м'яса яловичини, свинини, м'яса курей та риб, тилози в рамках єдиних співвідношень та розрахункових процедур.

Для тушок курей проведені експериментальні виміри геометричних характеристик, а також статистичну обробку одержаних результатів у кореляції з масою тушок. Таку роботу проведено автором зі співробітниками вперше, її результати дозволили в подальшому провести коректний аналіз, дослідження процесів холодильної обробки тушок курей.

Аналіз літературних даних, перш за все щодо частки вимороженої води в яловичині при її розморожуванні, вказує на наявність незворотних ефектів під час заморожування харчової сировини. Такі ефекти повинні призводити до явища гістерезису теплофізичних властивостей сировини від змін температури (заморожування-розморожування). Спираючись на експериментальні дані Кулагіна В.М., Рогова І.О. (ЯМР), у даній роботі виконані модельні, прогностичні розрахунки $C_p(T), \rho(T), \lambda(T)$ при розморожуванні м'ясної сировини, а в подальшому аналізі апробовано ці результати шляхом аналізу температурних полів при розморожуванні пластин з яловичини, окремих риб та об'єктів з тилози. Ці результати нами одержані вперше, вони позитивні, потребують подальшого уточнення.

2. Опубліковані у вітчизняній та зарубіжній літературі методи розрахунку тривалості процесів холодильної обробки містять емпіричні, напівемпіричні коефіцієнти (коефіцієнти гомохронності). Такі коефіцієнти використовуються для оцінки тривалості процесів холодильної обробки реального об'єкта через розрахункову тривалість процесу холодильної обробки об'єктів з тієї самої сировини, але правильної геометричної форми – нескінченної пластини, нескінченного циліндра, кулі. Характерно, що використання тих самих коефіцієнтів для одержання даних з температурних полів, теплових потоків з поверхні реальних об'єктів неможливе, потребує введення нових емпіричних коефіцієнтів. На відміну від таких методів інших дослідників нами сформульована інтерполяційна крайова задача теплопровідності, в якій коефіцієнтом інтерполяції є коефіцієнт геометричної форми об'єктів холодильної обробки. Цей коефіцієнт набуває значення на інтервалі $[0, 2]$ і розраховується через співвідношення об'єму, величини теплообмінної поверхні та характерного розміру об'єктів холодильної обробки. Найбільш важливим науковим та практичним результатом сформульованого підходу є одержання (в результаті розв'язання крайової задачі) всіх характеристик процесу холодильної обробки (температурні поля, теплові потоки в довільний момент часу, тривалість процесу) в режимі реального часу процесу, для об'єктів різної геометричної форми. Коефіцієнт геометричної форми об'єктів холодильної обробки як інтерполяційний коефіцієнт введено в оператор дивергенції рівняння теплопровідності. Крім того, коректне зіставлення розрахункових та експериментальних даних з характеристик процесів охолодження харчової сировини можливе, якщо в крайовій задачі граничні умови містять довільні залежності температури, швидкості руху охолоджуючого середовища в часі. Тому для розв'язання сформульованої крайової задачі вибрано метод скінченно-різницевої апроксимації задачі за такою змінною як час, а за координатою проведено аналітичне розв'язання. На відміну від класичних розв'язків лінійних задач у вигляді рядів Фур'є, нами одержано розв'язок у вигляді інтегралів зі змінною верхньою границею, де ядра підінтегральних виразів виписані через модифіковані функції Михайлова М.Д. На основі одержаних розв'язків проведено коректне зіставлення експериментальних та розрахункових даних за характеристиками процесів охолодження м'ясної, рибної сировини. При цьому використані дані як власних експериментальних досліджень процесів охолодження четвертин яловичини, так і дані досліджень інших авторів у промислових умовах. Результати зіставлення позитивні, свідчать, що досягнуто вирішення поставлених задач щодо процесів охолодження об'єктів різної геометричної форми в рамках єдиної крайової інтерполяційної задачі теплопровідності.

3. Аналіз процесів заморожування та розморожування проведено в рамках тої самої інтерполяційної крайової задачі теплопровідності, в її нелінійній постановці, оскільки теплофізичні властивості харчової сировини при температурах, нижчих від температур початку кристалізації води, сильно залежать від температури. При побудові даної моделі ми відмовились від трактування процесів заморожування чи розморожування харчової сировини як процесів з рухомою границею розділу фаз (вода-лід, заморожено-тільки охолоджено). На цій основі не використовувались і граничні умови Стефана, Лейбензона, було підкреслено, що, як і в лінійних задачах теплопровідності, джерельний член (теплота фазових перетворень) може міститись або в самому диференційному рівнянні, або в граничних умовах. Оскільки цей член міститься в значеннях ефективної теплоємності

харчової сировини (тобто в рівнянні теплопровідності), то більше ніде він не має бути. Використання нами терміну про рух границі початку кристалізації води в об'єктах заморожування є коректним. Таким чином, розроблена математична модель принципово відрізняється від тих, що використовуються в існуючих моделях процесів заморожування харчових продуктів.

Апробація математичної моделі процесів заморожування чи розморожування шляхом зіставлення розрахункових та експериментальних даних по температурних полях, теплових потоках у різні моменти часу проведення експерименту дала позитивні результати – похибки в описі температурних полів становлять близько 1–3 °С, теплових потоків – не більше 15–20 %. Тривалість процесів описується з похибкою, що не перевищує 5–7 %. Апробацію проведено на численному експериментальному матеріалі для процесів заморожування м'ясної сировини з яловичини, свинини, м'яса курей та риби, різних геометричних форм з тилози. Серед експериментальних даних використано і результати власних досліджень процесів заморожування окремих кусків яловичини, тушок курей. Апробація моделі проведена також на прикладі процесів розморожування пластин, куль, циліндрів з яловичини, окремих риби та різних геометричних форм з тилози. Важливо відмітити, що той самий, що і для процесів охолодження, інтерполяційний коефіцієнт геометричної форми об'єктів холодильної обробки дав можливість описати процеси заморожування і розморожування **в режимі реального часу процесу**. Цей результат суттєво відрізняє нашу роботу від робіт інших вчених, де використовується коефіцієнт геометричної форми, що залежить від умов охолодження, теплофізичних властивостей сировини тощо.

При розв'язанні інтерполяційної задачі теплопровідності нами використаний метод її скінченно-різницевої апроксимації як в часі, так і за координатою. Ефективне, усталене розв'язання, як і саму побудову скінченно-різницевого шаблону, одержано за рахунок усереднення значень теплофізичних властивостей об'єктів в залежності від температури довкола кожного окремого вузла інтегрування кінцево-різницевої схеми. Таким чином, одержані температурні поля, теплові потоки задовольняють, на відміну від існуючих в літературі апроксимацій, як граничним умовам, так і рівнянню теплопровідності.

Проведений детальний аналіз одержаних результатів розрахунку температурних полів, відповідних експериментальних даних дозволив сформулювати основний науковий результат цього напрямку досліджень – про **ефект інерції теплоти**, його проявлення та вплив на динаміку протікання і характеристики процесів заморожування та розморожування. Саме цей науковий результат дає можливість пояснити, чому узагальнена, інтерполяційна крайова задача теплопровідності описує експериментальні дані різних авторів стосовно заморожування різної харчової сировини і в різних геометричних формах, чому вже багато років дослідження багатьох авторів замикаються на нових модифікаціях формули Планка.

Серед практичних результатів розділу з досліджень процесів заморожування та розморожування слід виділити розробку чисельних процедур для проведення відповідних розрахунків характеристик процесів, що необхідні як при проектуванні, так і для вирішення задач контролю роботи охолоджуючих систем холодильників м'ясокомбінатів. Особливо це стосується проектування поточкових охолоджуючих систем (тунелів), які старими, відомими з літератури та нормативних до-

кументів методами проектувати неможливо. Поняття “середньоентальпійної температури”, як чисельної характеристики для оцінки тривалості процесів холодильної обробки, сформульоване та обґрунтоване тут як основний термін для розв'язання задач енергозбереження в процесах холодильної обробки харчової сировини.

4. З метою подальшого аналізу тепловологісних процесів, що протікають під час холодильної обробки харчової сировини, побудоване рівняння стану вологого повітря, як газової суміші змінного складу за такою компонентою, як водяна пара. Рівняння стану побудоване як рівняння з віріальними коефіцієнтами, в діапазоні температур 173+700 К та тисків до 5 МПа, з використанням модельного потенціалу міжмолекулярної взаємодії Леннарда–Джонса. При цьому використано відому ідею П.М.Кессельмана відносно температурної залежності параметрів потенціалу міжмолекулярної взаємодії. Але виділення цих параметрів з експериментальних даних з термодинамічних властивостей компонент вологого повітря проведене нами в рамках додаткової вимоги – опис термодинамічних властивостей як газової, так і рідинної фаз компонент досягнуто в рамках одного набору значень параметрів потенціалу.

Розрахунок термодинамічних властивостей рідинної фази компонент вологого повітря проведений в рамках термодинамічної теорії збурень. При цьому нами розроблений варіант теорії, де розрахункові співвідношення в разі модельного потенціалу Леннарда–Джонса сформульовані в q-просторі (q-Фур'є змінна відносно координати g-відстані між молекулами), забезпечена збіжність відповідних інтегралів та відносна простота обчислень. Одержані результати з температурних залежностей для параметрів Леннарда–Джонса компонент вологого повітря не суперечать літературним даним, узгоджуються з даними дифракційних досліджень, дають прийнятні результати за неоднорідним другим віріальним коефіцієнтом. Розроблене рівняння стану може бути використано для розрахунку всіх термодинамічних властивостей, в тому числі і похідних термодинамічних потенціалів по температурі, тиску та вологовмісту, відносній вологості газової суміші.

5. Побудована термодинамічна теорія тепловологісних процесів, що протікають при холодильній обробці харчової сировини та в яких формуються втрати маси сировини від усушки. Розроблену термодинамічну теорію апробовано шляхом зіставлення розрахункових та експериментальних даних з втрат маси сировини при холодильній обробці яловичини, свинини. Такі дані одержані автором з співробітниками як в лабораторних, так і в промислових умовах холодильників м'ясокомбінатів.

Розроблена термодинамічна теорія апробована і на прикладі тепловологісних процесів іншого типу, таких як формування різниці температур сухого та мокрого термометрів, як процес випарувального охолодження листових овочів (ізобарно-ізоентальпійні процеси), розчинність води в повітрі при різних значеннях барометричного тиску (ізобарно-ізотермічний тепловологісний процес). Встановлені похибки моделювання, прогнозних оцінок характеристик таких процесів виявляються на рівні похибок експериментальних даних.

На базі математичних моделей процесів охолодження, заморожування та розробленої термодинамічної теорії виконані роботи за техніко-технологічною експертизою холодильників ряду м'ясокомбінатів. Результати цих робіт показали високу ефективність розроблених методик не

тільки при аналізі результатів окремих контрольних дослідів в умовах камер холодильника, але й при проведенні експертизи роботи камер холодильника за минулий довгостроковий період. Позитивні результати одержані і при розробці нормативних документів зі втрат від усушки.

У цілому, при багатофакторному аналізі процесів формування втрат маси сировини від усушки в процесі її холодильної обробки, виявлено, що такі втрати визначаються, в основному, двома головними факторами – кількістю відведеної від об'єкта холодильної обробки теплоти та здатністю вологого охолоджуючого повітря засвоювати вологу.

Послідовна побудова співвідношень термодинамічної теорії тепловологісних процесів проведена автором зі співробітниками вперше. Вона не суперечить існуючим до цього часу методам, які широко застосовувались в теорії кондиціювання повітря – Ф.Мержеля, О.Кокоріна та інших. Найбільшою мірою фізичні аспекти розробленої термодинамічної теорії перекликаються з роботами Д.Г.Рютова, В.З.Жадана, результатами інших досліджень, в яких чітко підкреслюється, як головний, енергетичний фактор.

6. Одержані наукові результати в розділах 2, 3, 4, 5, 6 використані для побудови методик проектування тунелів потокової холодильної обробки м'ясної сировини. При цьому теорія неізотермічних затоплених струменів Г.Н.Абрамовича використана і розвинута для проведення розрахунків тепловологісних характеристик системи розподілу повітря. Цього вдалося досягти завдяки використанню розробленої термодинамічної теорії тепловологісних процесів.

Розв'язання крайових інтерполяційних задач теплопровідності при розрахунках характеристик процесів охолодження та заморожування м'ясної сировини в режимі реального часу дозволило розробити методику оцінки теплових навантажень в тунелях потокової холодильної обробки. Розроблена методика проектування тунелів потокової холодильної обробки пройшла апробацію при проектуванні тунелів попереднього охолодження та попереднього заморожування на багатьох холодильниках м'ясокомбінатів, в цих роботах розвинуто ідеї та розробки проф. І.Г.Чумака, к.т.н. Д.М.Ільїнського відносно потокових методів реалізації процесів охолодження та однофазного заморожування м'яса.

7. При проведенні апробації математичних моделей для теплофізичних властивостей м'яса курей, риби, тилози, для температурних полів, теплових потоків, тривалості процесів охолодження, заморожування та розморожування, для характеристик тепловологісних процесів використовувались експериментальні дані різних авторів, одержані в різних лабораторіях світу. Всі ці дані узгоджуються між собою в рамках похибок експериментальних даних, описуються математичними моделями, розробленими в даній роботі. Для цілей тієї самої апробації розроблених математичних моделей проведено і власні експериментальні дослідження, наприклад, виміряно геометричні характеристики тушок курей різної маси, виміряно характеристики процесу охолодження четвертин з яловичини, виміряно характеристики процесів заморожування тушок курей та окремих кусків яловичини (упакованих і неупакованих в плівки), проведено дослідження динаміки формування втрат маси при охолодженні четвертин яловичини. Всі ці власні експериментальні дослідження проведено для цілей більш повної апробації математичних моделей, з використанням сучасних приладів та із застосуванням стандартизованих метрологічних методик. Одержані результати ап-

робації математичних моделей свідчать, що власні експериментальні дані не суперечать даним інших авторів. Одержані наукові результати в цілому повинні розглядатись як обґрунтовані та достовірні.

Наукові результати даної роботи, розроблена методика проектування процесів та охолоджуючих систем потокової холодильної обробки м'ясної сировини рекомендуються для використання в практиці проектування нових та модернізації діючих холодильників м'ясокомбінатів як такі, що забезпечують більш ефективну реалізацію вимог технологічних інструкцій поряд з меншими питомими витратами енергії та меншими втратами маси харчової сировини від усушки. Результати даної роботи рекомендуються також для використання при проектуванні систем технологічного контролю (мінімально Т-т-контролю) холодильників м'ясокомбінатів, а також при проведенні техніко-технологічних експертиз таких холодильників. Результати даної роботи рекомендуються також для використання при розв'язанні аналогічних задач потокової холодильної обробки плодів – овочевої сировини.

ОСНОВНІ ПУБЛІКАЦІЇ ПО ТЕМІ ДИСЕРТАЦІЙНОЇ РОБОТИ

Монографії, підручники :

1. Холодильні установки: Підручник. У двох книгах / І.Г.Чумак, В.П.Чепурненко, С.Ю.Лар'янівський, Е.Г.Парцхаладзе, В.П.Онищенко, Н.І.Чумак, В.П.Кочетов, Г.К.Мнацаканов. - Київ: Либідь, 1995. - 460 с.(С.55-61, 93-96, 186-203 в кн. 1).
2. Холодильные установки / Чумак И.Г., Чепурненко В.П., Чумак Н.И., Онищенко В.П., Ларьяновский С.Ю., Мнацаканов Г.К., Парцхаладзе Э.Г., Савченков Г.А.; Под ред. д.т.н., проф. И.Г. Чумака. - 3-е изд., перераб. и доп. - М.: Агропромиздат, 1991. - 495 с. - (Учебн. и уч.пособия для студентов высших учебных заведений), (С.207-246).
3. Холодильные установки. Проектирование: Учебное пособие для вузов / И.Г. Чумак, Д.Г. Никульшина, Э.Г. Парцхаладзе, С.Ю. Ларьяновский, В.П. Онищенко, Н.С. Зайнулина, Н.И. Чумак, под общей ред. проф. И.Г. Чумака. - К.: Выща школа. Головн. изд-во, 1988. - 280 с.(С.18-25, 105-110, 157-159).
4. Чумак И.Г., Шахневич В.И., Онищенко В.П., Гордиенко А.В., Вязовский В.П., Чумак Н.И. Экономика энергоресурсов и сокращение потерь продукции при холодильной обработке. - Киев: Урожай, 1990. - 168 с.(С.34-65, 89-120, 135-142).

Авторські свідчення :

5. Способ хранения неупакованного мяса: А.с. 1346925 СССР от 22.06.1987. / И.Г. Чумак, С.М. Косой, В.П. Онищенко, К.Г. Грушевский, В.П. Попов. - Б.И.- 1987.-№ 39.- F25.- С.180.
6. Способ замораживания мясных туш: А.с. 1375917 СССР от 22.10.1987. / С.В. Ольшанский, И.Г. Чумак, В.П. Онищенко, В.И. Шахневич, В.П. Вязовский, В.Е. Когут. - Б.И.- 1988.-№ 7.- F25.- С.161-162.
7. Установка для удаления влаги: А.с. 982634 СССР от 23.08.1982. /Шахневич В.И, Чумак И.Г., Онищенко В.П., Коноплев Л.М., Ильенко С.Н. - Б.И.- 1982.-№ 47.- С.16.

Статті в журналах :

8. Онищенко В.П. Проблемы мясокомбинатов // Холодильная техника и технология. - 1997. - вып.57. - С. 27-29.
9. Онищенко В.П. Проектирование процессов холодильной технологии пищевых продуктов для производственных холодильников // Холодильная техника и технология. - 1998. - №2. - вып.59. - С.51-56.
10. Онищенко В.П. К вопросу о построении уравнения состояния газов, жидкостей и их смесей // Холодильная техника и технология. - 1999. - вып.63. - С. 68-73.
11. Онищенко В.П., Чумак И.Г. Системы охлаждения для холодильников мясокомбинатов // Холодильная техника. - 1992. - № 11-12. - С.10-12.
12. Онищенко В.П., Чумак Н.И., Вязовский В.П. Теплообмен при охлаждении мяса в камерах холодильников // Известия высших учебных заведений. Пищевая технология. - 1989. - № 5. - С.70-73.
13. Рекомендации по проектированию камер интенсивного замораживания мяса на предприятиях мясной промышленности (Файнзильберг Е.Я., Маяковский Ю.В., Доильницын А.В., Чумак И.Г., Онищенко В.П., Вязовский В.П., Шахневич В.И., Фридман Б.А., Стефановский В.М., Боков А.Е., Щербаков И.А.) // Холодильная техника. - 1988. - № 3. - С.34-47.
14. Чумак И.Г., Онищенко В.П. О термодинамической теории тепловлажностных процессов // Холодильная техника. - 1991. - № 11. - С.18-20.
15. Чумак И.Г., Онищенко В.П. О термодинамической теории тепловлажностных процессов в камерах холодильников // Холодильная техника. - 1981. - № 3. - С.44-48.
16. Чумак И.Г., Онищенко В.П., Шахневич В.И. Сокращение потерь при холодильной обработке мяса // Холодильная техника. - 1979. - № 11. - С.22-25.
17. Чумак И.Г., Онищенко В.П., Шахневич В.И., Вязовский В.П. Замораживание мяса с использованием поточных методов обработки // Холодильная техника. - 1988. - № 3. - С.17-20.
18. Чумак Н.И., Онищенко В.П. Анализ тепловлажностных процессов в камерах хранения неупакованных грузов // Холодильная техника. - 1984. - № 2. - С.16-20.
19. Чумак Н.И., Онищенко В.П. Усушка мяса при охлаждении и замораживании / Респ. межведом. научн.-техн. сб. "Холодильная техника и технология". - К.: Техніка, 1984. - вып.39. - С.85-90.
20. Onistchenko V.P., Kutirkin O.F., Bykov A.Yu. Thermodynamic properties of liquid lead and bismuth at temperatures from the melting points to 2000 K / High Temperatures - High Pressures, GB. - 1999. - Vol.31. - P.113-118.
21. Onistchenko V.P., Kutirkin O.F., Zhelezny V.P., Vladimirov V.P. Thermodynamic properties of polar fluids: ozone-safe refrigerants in gaseous and liquid states // High Temperatures - High Pressures, GB. - 1997. - Vol.29. - P.313-318.

Брошури:

22. Онищенко В.П. Повышение интенсивности существующих охлаждающих систем камер однофазного замораживания (Обзорная информация) - М.: АгроНИИТЭИММП, 1988. - 41 с. - (Холодильная промышленность и транспорт).

23. Онищенко В.П., Головский С.Е., Желиба Ю.А. Теплообмен при холодильной обработке разделанного и упакованного мяса (Обзорная информация). - М.: АгроНИИТЭИММП, 1992. - 28 с. - (Холодильная промышленность).
24. Чумак И.Г., Онищенко В.П. Резервы холодильной техники и технологии в мясной и молочной промышленности: Обзорная информация. - М.: АгроНИИТЭИММП, 1991. - 28 с. - (Холод. пром.).
25. Чумак И.Г., Онищенко В.П., Желиба Ю.А., Головский С.Е. Создание систем технологического контроля процессов холодильной обработки и хранения мяса: Обзорная информация. - М.: АгроНИИТЭИММП, 1992. - 24 с. - (Холодильная промышленность).
26. Чумак И.Г., Шахневич В.И., Онищенко В.П., Когут В.Е., Вязовский В.П. Модернизация компрессорных цехов производственных холодильников на базе компаунд-схем: Обзорная информация. - М., АгроНИИТЭИММП, 1987. - 44 с. - (Холодильная промышленность и транспорт).
27. Чумак И.Г., Шахневич В.И., Онищенко В.П., Исаев В.И. Пути повышения эффективности охлаждающих систем производственных холодильников: Обзорная информация. - М.: ЦНИИТЭИмясомолпром, 1981. - 26 с. - (Холодильная промышленность).
28. Чумак И.Г., Яценко А.П., Онищенко В.П., Тихоненко Л.Я. Интенсификация процесса замораживания мяса и мясopодуKтов в скороморозильных аппаратах. - М.: ЦНИИТЭИмясомолпром, 1982. - 16 с.
29. Шахневич В.И., Онищенко В.П., Вязовский В.П., Чумак Н.И. Модернизация производственных холодильников мясокомбинатов: Обзорная информация. - М.: ЦНИИТЭИмясомолпром, 1985. - 41 с. - (Холодильная промышленность и транспорт).

Доповіді на вітчизняних конференціях:

30. Онищенко В.П. Теоретические основы проектирования процессов и охлаждающих систем холодильной обработки мясных и молочных продуктов. - Докл. на Всесоюзн. коллоквиуме «Процессы и аппараты пищевых производств» под руководством акад. Липатова Н.Н., Москва, Институт народного хозяйства им. Плеханова, 26.10.1990.
31. Грайзи Ж.А., Онищенко В.П. Математическое моделирование процессов охлаждения и замораживания рыбы // Тез. док. Междунар. науч.-техн. конф. «Холод и пищевые производства» (С.-Петербург, 1996.). - С.-Петербург: СПГАХПТ, 1996. - С.129-130.
32. Дидык Н.Н., Онищенко В.П., Старчевский И.П., Боронина О.Н., Стрижков А.Г., Кошолуп С.В. Исследование теплофизических процессов предварительного охлаждения продуктов при создании установок промышленного типа // Тез. док. Межд. науч.-техн. конф. «Холод и пищевые производства» (С.-Петербург, 1996.). - С.-Петербург: СПГАХПТ, 1996. - С.146.
33. Головский С.Е., Желиба Ю.А., Онищенко В.П. Технологические аспекты проектирования точного скороморозильного оборудования // Тез. док. республ. науч.-технич. конф. «Разработка и внедрение высокоэффективных ресурсосберегающих технологий, оборудования и новых видов пищевых продуктов в пищевую и перерабатывающую отрасли АПК», Киев, сентябрь 1991. - Киев, КТИПП, 1991. - С.485-486.
34. Желиба Ю.А., Головский С.Е., Онищенко В.П. Прогнозирование теплофизических свойств мяса кур / Тез. док. межреспубл. научн.-практ. конф. «Совершенствование холодильной техники и

- технологии для эффективного хранения и переработки сельскохозяйственной продукции", Краснодар, 1992. - Краснодар, изд-во КПИ, 1992. - С.39-40.
35. Желиба Ю.А., Соколов В.А., Онищенко В.П. Холодильная обработка упакованных тушек птицы в воздушных поточных скороморозильных аппаратах // Тез. док. Всесоюз. науч.-техн. конф. "Холод - народному хозяйству", октябрь 1991, С.-Петербург. - Изд-во ЛТИХП. - С.117-118.
36. Желиба Ю.О., Онищенко В.П., Желиба Т.О., Головський С.Є. Теплообмін під час термообробки м'яса курей // Тез. доп. Міжнар. наук.-техн. конф. "Розробка та впровадження нових технологій і обладнання у харчову та переробні галузі АПК" (Київ, 1993.). - Київ: КТІХП, 1993. - С.540.
37. Желиба Ю.О., Онищенко В.П., Головський С.Є., Ільїнський Д.М. Технологічні аспекти холодильної обробки м'яса і напівфабрикатів у потокових швидкоморозильних апаратах // Тез. доп. Міжнар. наук.-техніч. конф. "Розробка та впровадження нових технологій і обладнання у харчову та переробні галузі АПК" (Київ, 1993). - Київ: КТІХП, 1993. - С.564-565.
38. Нгуен Суан Тьен, Онищенко В.П. Способность воздуха усваивать влагу и усушка мяса при его замораживании в туннелях / Тез. док. Всесоюз. конф. "Пути интенсификации производства и применения искусственного холода в отраслях АПК", 26-28 сентября 1985, Ташкент. - М.: ВНИКТИХолодпром, 1985. - С.116.
39. Онищенко В.П., Вязовский В.П., Головський С.Є. Эффект локализации теплоты в процессах замораживания мяса / Тез. док. Всесоюз. науч.-техн. конф. "Пути развития науки и техники в мясной и молочной промышленности", 17-19 сентября 1988, Углич, часть III. - М.: АгроНИИТЭИММП, 1988. - С.20-21.
40. Онищенко В.П., Головський С.Є., Желиба Ю.А. Математическое моделирование процессов холодильной обработки упакованного разделанного мяса и тушек птицы // Тез. док. республ. науч.-техн. конф. "Интенсификация технологий и совершенствование оборудования перерабатывающих отраслей АПК", сентябрь 1989, Киев. - К.: изд. КТИПП, 1989. - С.221-222.
41. Онищенко В.П., Шаройко О.Я., Куликовская Л.В. Термодинамическая теория тепловлажностных процессов в произвольной влагосодержащей газовой среде // Тез. док. Всесоюз. науч.-техн. конф. "Холод - народному хозяйству", октябрь 1991. - С.-Петербург, изд-во ЛТИХП, 1991. - С.181-182.
42. Онищенко В.П., Шаройко О.Я., Чумак Н.И. Тепловлажностные процессы при холодильной обработке пищевых продуктов воздухом // Тез. докл. Всесоюз. науч.-техн. конф. "Пути развития науки и техники в мясной и молочной промышленности", 17-19 сентября 1988, Углич, часть III. - М.: АгроНИИТЭИММП, 1988. - С. 11-12.
43. Онищенко В.П., Шахневич В.И., Вязовский В.П., Чумак Н.И. Методика автоматизированного проектирования туннелей предварительного охлаждения и предварительного замораживания мяса в потоке / Тез. док. Всесоюз. конф. "Пути интенсификации производства и применение искусственного холода в отраслях АПК", 26-28 сентября 1985, Ташкент. - М.: ВНИКТИХолодпром, 1985. - С.49.
44. Онищенко В.П., Шахневич В.И., Ширшков А.К. Алгоритм управления компрессорным цехом мясокомбината / Тез. док. Всесоюз. семинара "Основные направления применения микропро-

- цессорных средств и мини-ЭВМ в мясной и молочной промышленности", Москва, 14-15 сентября 1983. - М.: СКБ АСУмясомолпром, 1983. - С.60-61.
45. Онищенко В.П., Желиба Ю.А., Головський С.Є., Грайзи Ж.А. Научно-методические аспекты задач замораживания биологических объектов растительного и животного происхождения // Тез. док. 4-ой междунар. конф. по экологии "Экология, продукты питания, здоровье"(3-5 октября 1995, Одесса). - Одесса: ОГАХ, 1995. - С.52.
46. Онищенко В.П., Желиба Ю.О., Желиба Т.О. Дослідження втрат від усушки на всіх стадіях виробництва та холодильної обробки упакованого фасованого м'яса і напівфабрикатів // Тези доп. Міжнар. наук.-техніч. конф. "Розробка та впровадження нових технологій і обладнання у харчову та переробні галузі АПК" (Київ, 1993 р.). - Київ: КТІХП, 1993. - С.563-564.
47. Онищенко В.П., Кутыркин О.Ф., Владимиров Б.П., Железный П.В., Жидков В.В. Термодинамические свойства озонобезопасных хладагентов в рамках метода эффективного потенциала межмолекулярного взаимодействия // Тез. док. Междунар. науч.-техн. конф. "Холод и пищевые производства" (С.-Петербург, 1996 г.). - С.-Петербург: СПГАХПТ, 1996. - С.344.
48. Онищенко В.П., Іукурідзе В.Г., Желиба Ю.О., Головський С.Є. Теоретичні основи опису процесів заморожування харчових напівфабрикатів із сільгоспсировини стосовно задач проектування потокових швидкоморозильних апаратів // Тез. доп. IX Міжнародн. конф. "Удосконалення процесів та апаратів хімічних, харчових та нафтохімічних виробництв", Частина 2,3, (Одеса, 10-13 вересня 1996). - Одеса: ОДАХТ, 1996. - С.20.
49. Онищенко В.П., Чумак И.Г., Желиба Ю.А., Іукурідзе Э.Ж. Математическое моделирование тепловлажностных процессов в холодильной технологии и газовой экстракции полуфабрикатов // Тез. док. Междунар. науч.-техн. конф. "Холод и пищевые производства" (С.-Петербург, 1996). - С.-Петербург: СПГАХПТ, 1996. - С.369-370.
50. Чумак И.Г., Онищенко В.П. Выбор путей повышения эффективности работы производственных холодильников // Тез. док. Всесоюз. науч.-техн. конф. "Холод - народному хозяйству", октябрь 1991, С. - Петербург. - С.-Петербург: изд-во ЛТИХП, 1991. - С.85-86.
51. Чумак И.Г., Онищенко В.П. Состояние и пути развития мясоперерабатывающей отрасли // Тез. док. республ. науч.-техн. конф. "Разработка и внедрение высокоэффективных ресурсосберегающих технологий, оборудования и новых видов пищевых продуктов в пищевую и перерабатывающую отрасли АПК", Киев, сентябрь 1991. - Киев: КТИПП, 1991. - С.471-472.
52. Чумак И.Г., Онищенко В.П., Головський С.Є., Желиба Ю.А. Теплообмен при холодильной обработке разделанного говяжьего мяса и птицы, упакованных в пленку // Тез. док. Всесоюз. науч.-практ. конф. "Пути интенсификации производства с применением искусственного холода в отраслях агропромышленного комплекса, торговле и на транспорте", октябрь 1989, Одесса, секция 1. - Одесса, ОИНТЭ, 1989. - С.18.
53. Чумак И.Г., Онищенко В.П., Шахневич В.И. Алгоритм расчета тепловой нагрузки при поточной холодильной обработке мяса / Тез. док. Всесоюз. семинара "Основные направления применения микропроцессорных средств и мини-ЭВМ в мясной и молочной промышленности", Москва, 14-15 сентября 1983. - М.: СКБ АСУмясомолпром, 1983. - С.52-53.

54. Чумак И.Г., Онищенко В.П., Шахневич В.И. Аналитическое описание и сравнительная оценка режимов охлаждения пищевых продуктов / Тез. док. Всесоюзн. конф. по холоду, октябрь 1977, Ташкент. - М.: ВНИКТИХолодпром, 1977. - С.79-80.
55. Чумак И.Г., Попов В.П., Онищенко В.П. Общие принципы построения информационной системы для технологического контроля режимов холодильной обработки и оценки качества эксплуатации охлаждающих систем холодильников мясокомбинатов / Тез. док. Всесоюзн. науч.-практ. конф. "Интенсификация производства и применения искусственного холода", 16-18 октября 1986, Ленинград. - Л.: ЛТИХП, 1986. - С.52-53.
56. Чумак Н.И., Онищенко В.П. Анализ тепловлажностных процессов в камерах холодильников мясокомбинатов / Тез. док. Всесоюзн. семинара "Использование искусственного холода для сокращения потерь пищевых продуктов - важное средство в решении продовольственной программы страны", Калининград, 11-12 октября 1983. - М.: ВНИКТИХолодпром, 1983. - С.37.
57. Шахневич В.И., Чумак И.Г., Онищенко В.П., Вязовский В.П. Пути модернизации охлаждающих систем холодильников действующих мясокомбинатов // Тез. док. Всесоюзн. науч.-практ. конф. "Искусственный холод в отраслях АПК", декабрь 1987, Кишинев. - М.: ВНИКТИХолодпром, 1987. - С.66.

Доповіді на зарубіжних конференціях, конгресах:

58. Онищенко В., Чумак Н., Петросян Т. Теплообменные процессы в аппарате за хладилна технология на хранителните продукти // Тезиси доклада на научной сессии "35 години ВИХВП", 1988 г., Болгария, Пловдив. - С.157-158.
59. Чумак И., Онищенко В., Вязовский В. Теоретични основи на проектирането на поточно охлаждане и замразяване на месото в поток // Тезиси доклада на научной сессии "35 години ВИХВП", 1988 г., Болгария, Пловдив. - С.158.
59. Чумак И.Г., Онищенко В.П., Шахневич В.И. Пути сокращения естественных потерь при холодильной обработке мяса / Сб. докладов на международной научно-технической конференции "Хладилна обработка на мясо и месните произведения", София, октябрь 1979. - С.156-162.
60. Chumak I.G., Shakhnevich V.I., Onishenko V.P. Optimizing Technological Processes of Meat Cold Treatment // 26 - th European meeting of Meat Research Workers. Congress documentation. Proceedings. Vol. Two. August 31 - September 5, 1980, Colorado, USA. - P.L151-L154.
61. Chumak I.G., Onishchenko V.P. The peculiarities of calculation and accomplishing the refrigeration technology processes in production lines // Progress in the science and technology of refrigeration in food engineering, IIR (Commiss. B2, C2, D1, D2/3), Dresden, 1990. - Paris: IIR, 1990. - Vol.4. - P.361-366.
62. Chumak I.G., Onistchenko V.P., Sharoiko O.Y. Thermodynamics of moisture-containing gas mixtures and processes of refrigerating technique and technology // Proceedings of the XVIII-th International Congress of Refrigeration, Montreal, Quebec, Canada, August 10-17, 1991. - Paris: IIR, 1991. - Vol.III. - P.1402-1405.
63. Chumak I.G., Onishchenko V.P., Golovsky S.E., Zheliba Y.A. The method of prediction for characteristics of cooling and freezing processes of food-stuff // Proc. of Internat. Conference "New

- Applications of Refrigeration to Fruit and Vegetables Processes", Commissions C2, D1, D2/3 of IIR, June 1994, Istanbul (Turkey). - Paris, IIR, 1995. - P.361-366.
64. Chumak I.G., Onistchenko V.P., Tersiev G.S., Kalinchak V.V. Simulation of the Heat- and -Moisture Transfer Process during the Food Stuff Refrigeration // Proceedings of the 19-th International Congress of Refrigeration, The Hague, The Netherlands, 1995. - Paris, IIR, 1995. - Vol.II. - P.51-56.
65. Graizi J.A., Onistchenko V.P., Chepurmenko V.P. Thermophysical properties of different kinds of fish // Proc. of Internat. Conference "Refrigeration and Aquaculture", Commission C2 of IIR, Bordeaux, France, 1996.03.20-22. - Paris: IIR, 1996. - P.283-290.
66. Graizi J.A., Chumak I.G., Onistchenko V.P., Terziev G.S. Mathematical model of various freezing processes of fish and fish products // Proc. of Internat. Conference "Refrigeration and Aquaculture", Commission C2 of IIR, Bordeaux, France, 1996.03.20-22. - Paris: IIR, 1996. - P.379-386.
67. Chumak I., Onistchenko V., Graizi J., Zheliba Yu. Modeling of cooling, freezing and thawing processes for meat and fish // Proc. of the conference of Commissions B2 & C2, with D1 & D2/3 "Advances in the refrigeration systems, food technologies and cold chain", 23-26 September 1998, Sofia, Bulgaria. - Paris, IIR, 2000. - P.249-254.
68. Onishchenko V.P., Chumak I.G. Computer-based design of refrigerating systems for meat plants with flow meat processing // XXXI European meeting of meat research workers. Rapports. - Sofija: Inst. of Meat Industry, 1987. - Vol.1. - P.102-104.
69. Onishenko V.P., Vjazovsky V.P., Gnatiuk P.G. The calculation of the processes of refrigeration technology at the foodstuff processing on the processing line // Proceedings of the XVIII-th International Congress of Refrigeration, Montreal, Quebec, Canada, August 10-17, 1991. - Paris: IIR, 1991. - Vol.3. - P.1947-1950.
70. Onistchenko V.P., Chumak I.G., Kalinchak V.V., Ilinsky D.N. New approach to the description of heat- and moisture transfer while refrigerating and cold storage of foodstuffs // New applications of refrigeration to fruit and vegetables. Processing Commission C2,D1,D2/3 of IIR, Istanbul (Turkey), 1994-3. - Paris: IIR, 1994. - P.367-372.
71. Chumak I.G., Onistchenko V.P. General mathematical model of cooling, freezing and thawing processes for various foodstuffs - Report No.483, 20-th Internat. Congress of Refrigeration, IIF/IIR, Sydney, 1999. - 7 p.
72. Onistchenko V.P., Chumak I.G., Dergacheva V.A. Formulation for thermodynamic properties of moist air and other moisture containing gas mixtures from 173 K to 673 K, at pressures to 5 Mpa - Report No.482, 20-th Internat. Congress of Refrigeration, IIF/IIR, Sydney, 1999. - 7 p.
73. Onistchenko V.P., Zhelezny V.P., Vladimirov B.P. Thermodynamical properties of binary azeotropes of ozone-nondepleting refrigerants // Proceedings of 19th Internat. Congress of Refrigeration, The Hague, The Netherlands, 1995.08.20-25. - Paris: IIR, 1995. - Vol.IVa. - P.450-456.

Нормативні документи:

74. РДМУ 49.54-85. Методические указания. Проектирование туннелей для холодильной обработки мяса в потоке (введен с 01.01.86 г.) / Авторы: И.Г. Чумак, В.П. Онищенко, В.И. Шахневич,

В.П. Вязовский, Н.И. Чумак, Е.М. Агарев, М.А. Дибирасулаев, В.П. Попов. - М.: ММнМП СССР, 1985. - 37 с.

75. Чумак И.Г., Онищенко В.П., Ильинский Д.Н., Желиба Ю.А. Временные нормы усушки парного мяса - говядины первой категории от молодняка крупного рогатого скота при охлаждении до 4-0 °С и замораживании до минус 8 °С в камерах холодильников: Утв. 20.04.95 Главмясспромом Минсельхозпрода Украины. - Киев, 1995. - 1 с.

76. Чумак И.Г., Онищенко В.П., Ильинский Д.Н., Желиба Ю.А. Временные нормы усушки мяса при его домораживании в камерах холодильников: Утв. 14.12.94 Главмясспромом Минсельхозпрода Украины. - Киев, 1994. - 2 с.

АНОТАЦІЇ

Оніщенко В.П. Наукові основи процесів та апаратів холодильної технології харчових продуктів. - Рукопис. Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.18.14 – Холодильна технологія харчових продуктів. – Одеська державна академія холоду, Одеса, 2000.

Дисертацію присвячено розробці наукових основ холодильної технології, необхідних для проектування процесів та апаратів потокової холодильної обробки харчової сировини та продуктів в умовах промислових холодильників, з вирішенням задач енерго- та ресурсозбереження.

У роботі розвинені узагальнені моделі для опису процесів охолодження, заморожування, розморожування різної харчової сировини (м'ясної, рибної) та продуктів, тепловологісних процесів, що реалізуються в камерах холодильників, окремих тунелях та апаратах потокової холодильної обробки. Апробація математичних моделей проведена на численному експериментальному матеріалі. Розроблено методики проектування поточкових апаратів та тунелів холодильної обробки з узгодженням цілей холодильної технології та можливостей охолоджуючих систем. Апробація розроблених методик проведена шляхом модернізації охолоджуючих систем, техніко-технологічної експертизи багатьох діючих промислових холодильників, проектування спірального потокового швидкозаморожувального апарата.

Ключові слова: м'ясна сировина і продукти, потокова холодильна обробка, тепловологісні процеси, втрати маси, моделювання, проектування.

Онищенко В.П. Научные основы процессов и аппаратов холодильной технологии пищевых продуктов. – Рукопись. Дисертація на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.18.14 – Холодильная технология пищевых продуктов. – Одесская государственная академия холода, Одесса, 2000.

Дисертація посвящена разработке научных основ холодильной технологии, необходимых для проектирования процессов и аппаратов поточной холодильной обработки пищевого сырья и продуктов в условиях промышленных холодильников, с решением задач энерго- и ресурсосбережения. В процессе решения поставленных задач разработаны:

– методика прогнозирования значений теплопроводности разных видов мясного сырья, модельного вещества – тилозы в зависимости от температуры, которая согласована с методиками расчета эффективной теплоемкости, плотности, энтальпии, доли вымороженной воды. Для мяса кур, рыб, а также для тилозы расчетные соотношения по всему комплексу теплофизических характеристик получены впервые;

– показано впервые, что краевая интерполяционная, одномерная, нестационарная задача теплопроводности (интерполяционный коэффициент – коэффициент геометрической формы объектов холодильной обработки как тел неправильной геометрической формы введен в оператор дивергенции) описывает, с погрешностью на уровне погрешности экспериментальных данных, не только величины продолжительности процессов, но и температурные поля, тепловые потоки, поля долей вымороженной воды, значения среднэнтальпийных температур в режиме реального времени процессов холодильной обработки. Решение краевой задачи, при условии произвольного изменения температуры и скорости движения охлаждающей среды во времени, построено в терминах модифицированных специальных функций Михайлова М.Д. (процессы охлаждения), в рамках специальной конечно-разностной схемы с локальным усреднением теплофизических свойств в окрестности каждого узла интегрирования (процессы замораживания и размораживания). Апробація розроблених рішень проведена на обширному експериментальному матеріалі для процесів холодильної обробки говядини, свинини (полутуши, отдельные куски), тушек кур, отдельных рыб, разных геометрических форм из тилозы. Определена роль эффектов локализации теплоты (режимов с обострением) при формировании во времени характеристик процессов замораживания и размораживания пищевого сырья;

– термодинамическая теория тепловлажностных процессов, апробированная на примере моделирования процессов формирования во времени величин потерь массы (усушки) пищевого сырья при его холодильной обработке, растворимости воды в воздухе при разных значениях давлений (изобарно-изотермические процессы), испарительного охлаждения листовых овощей и формирования разности температур сухого и мокрого термометров (изобарно-изоэнтальпийные процессы). Для реализации соотношений термодинамической теории тепловлажностных процессов разработано уравнение состояния влажного воздуха в рамках уравнения состояния с виральными коэффициентами и термодинамической теории возмущений;

– методика проектирования туннелей, аппаратов поточной холодильной обработки пищевого сырья и продуктов.

Апробація розроблених методик проведена путем модернізації охолоджуючих систем, техніко-технологічної експертизи многих действующих промышленных холодильников мяскокомбинатов, проектирования спирального поточного скороморозильного аппарата.

Ключевые слова: мясное сырье и продукты, поточная холодильная обработка, тепловлажностные процессы, потери массы, моделирование, проектирование.

Onistchenko V.P. Scientific fundamentals of processes and apparatus of refrigeration technology of foodstuffs. – The manuscript. Thesis for a doctor of engineering science's degree by speciality 05.18.14- Refrigeration technology of foodstuffs. - Odessa State Academy of Refrigeration, Odessa, 2000.

The subject of the thesis is the development of scientific foundations of refrigeration technology which can be used for designing processes and apparatus of stream refrigeration processing of food raw materials and foodstuffs, in conditions of industrial refrigerators, solving the problems of energy- and resources saving. These problems having been solved, the following results were obtained:

- the method of predicting temperature dependence of values of heat conductivity of meat raw materials of different species and the tylose - model substance, in the agreement with the methods of calculation of the effective heat capacity, and density, and enthalpy, and the frozen-out water fraction. Calculated interrelations on all complex of thermophysical characteristics of the hens, fishes, and tylose were obtained for the first time;

- it is shown for the first time, that the interpolating one-dimensional non-stationary boundary problem of a heat conductivity (the geometrical form coefficient of refrigeration processing objects, considered as bodies with irregular forms, is placed as the interpolation coefficient in the operator of a divergence) describes, within the experimental data error, not only the duration of processes, but also temperature fields, and heat flows, and frozen-out water fraction fields, and mean-enthalpy temperature values in “real-time regime” of refrigeration processing. Solution of the boundary value problem is obtained in the terms of modified special Mihailov M.D. functions (cooling processes), under condition of arbitrary variation of temperature and cooling medium velocity, and within the frames of special finite-difference scheme with the local averaging of thermophysical properties in the vicinity of each point of integration (freezing and thawing processes). Approbation of the obtained methods is made with the use of numerous experimental data on refrigeration processing of beef, and pork (half-carcasses, and single pieces), carcasses of hens, fishes, and various geometric tylose forms. The role of the heat localization phenomena (regimes with a peaking) is forming the characteristics of processes of food raw materials freezing and thawing;

- thermodynamic theory of heat-and- moisture processes is checked by modelling the processes of mass losses of food raw materials during refrigeration, and solubility of water in air at various pressures (isobar-and-isotherm process), and evaporation cooling of leaf vegetables, and the forming the difference of temperatures of dry and wet thermometers (isobar-and-isoenthalpy process).

The equation of state of moist air is obtained on the base of thermodynamic perturbation theory and the virial equation to implement the relations of thermodynamic theory of heat-and- moisture processes;

- the method of designing tunnels and apparatus for the stream refrigeration processing of food raw materials and foodstuffs.

Approbation of the obtained methods is carried out by modernization of cooling systems, and technique-and-technological expertise of various industrial refrigerators of meat-processing factories, and designing of spiral fast-freezing stream apparatus.

Keywords: meat raw materials and foodstuffs, stream refrigerating processing, heat- and moisture processes, mass losses, simulation, designing.

B. Cut