

ОДЕСЬКИЙ ІНСТИТУТ НИЗЬКОТЕМПЕРАТУРНОЇ ТЕХНІКИ ТА ЕНЕРГЕТИКИ

На правах рукопису

Мирончук Єврія Анатолійович

ЗАМОРОЖУВАННЯ МІЛНОПОДРІВНЕНОЇ РОСЛИННОЇ СИРОВИНИ
У ПСЕВДОВІДРОДНОМУ ШАРІ.

Спеціальність 05.04.03 - машини і апарати холодної та
криогенної техніки і системи кондиціонування.

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

дисертації на здобуття вченого ступеня
кандидата технічних наук

Одеса 1993

7021.100
Робота виконана в Одеському Інституті низькотемпературної техніки та енергетики.

Науковий керівник - академік АНТК України,
заслужений діяч науки і техніки України,
доктор технічних наук, професор
Чепурненко В. П.

Ріцільні опоненти - доктор технічних наук, професор
Войтко А. М.
- кандидат технічних наук
Плужников І. І.

Відбула організація - НВО "Консервпромкомплекс", м. Одеса.

Захист дисертації відбудеться 28 " 06 1983 р.
11.00 " години на засіданні спеціалізованої ради К.003.27.01
при Одеському Інституті низькотемпературної техніки та енергетики
по адресі: 270057, м. Одеса, вул. Петра Великого, 1/3, ОІНТЕ.
З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Інституту.

Автороферат розісланий 28 " 05 1983 р.

Учений секретар
спеціалізованої ради
Д.Т.Я., професор

Р. К. Нікульшин

ЛНБ ім. В. Стефаніка
АН України

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

АКТУАЛЬНІСТЬ ТЕМИ. Не секрет, що в той час, коли країна відчуває гострий дефіцит продуктів харчування, біля 40% виробленої сільськогосподарської продукції безповоротно втрачається як в ході її збирання, так і із-за недосконалості технології зберігання і переробки. Держава змушена витратити значні кошти як на забезпечення виробництва, так і на дозakupку продовольства за рубежом - і це в той час, коли в Україні є всі потенційні умови для того, щоб стати одним із найбільших його світових експортерів.

Актуальність створення і впровадження власних високоінтенсивних холодительних технологій зберігання і переробки сільськогосподарської продукції очевидна. Крім вирішення ряду проблем, уже ставших тривіальними, це дозволить також частково вирішити наступні проблеми зайнятості населення і створити необхідні передумови для виходу України на світовий ринок як експортера відповідного технологічного обладнання.

На даний час в країні існує певний досвід створення швидко-морозильних апаратів, у тому числі і флюїдизаційних, які являються базовим елементом високоінтенсивних технологій. Але для дальшого розвитку і розширення цього напрямку необхідні більш повні дослідження і визначення ряду вузлових питань, які лежать в основі проектування і створення швидкоморозильних апаратів - це зумовлюється і як зростанням інтенсивності протікаючих у них процесів, так і значним розширенням асортименту перероблюваної продукції.

МЕТА РОБОТИ. Основною метою роботи являється вивчення питань, які стали "вузькими місцями" на шляху розробки флюїдизаційних апаратів для заморожування молокопродукційної рослинної сировини. В числі таких питань виділені:

1. Експериментальне дослідження гідродинаміки псевдозрідженого шару молокопродукційних часток різної форми з характерним розміром від 5 до 15 мм, вивчення впливу змоченості поверхні таких часток на режими псевдозрідження.
2. Створення програм для числового розв'язання одно-, дво- і тривісних нелінійних задач заморожування харчових продуктів у вигляді тіл канонічної форми, які дозволяють б детально враховувати динаміку тепломіну при конструюванні швидкоморозильного обладнання.

3. Розробка моделі теплопровідності харчових продуктів, дозволяючої надійно й обчислювати для нових і маловивчених продуктів не звертаючись до постановки відповідних натурних експериментів.

НАУКОВА НОВИЗНА. Досліджено вплив структури системи на її ефективну теплопровідність при різних граничних умовах і на базі цього створена модель теплопровідності харчових продуктів, враховуюча особливості структури їх клітинної та внутрішньоклітинної будови.

Отримані числові рішення одно-, дво- і тримірних нелінійних задач заморожування харчових продуктів у вигляді тіл канонічної форми. Досліджені взаємоспіввідношення між отриманими рішеннями в залежності від геометричної форми продуктів і режимів їх заморожування.

ОСНОВНІ НАУКОВІ ПОЛОЖЕННЯ, ЯКІ ЗАХИЩАЮТЬСЯ У РОБОТІ.

1. Теплопровідність харчових продуктів визначається особливостями структури їх клітинної та внутрішньоклітинної будови.
2. Коефіцієнт гомохронності досягнення заданої температури в центрі по відношенню до нескінченної пластини при заморожуванні харчових продуктів у вигляді тіл канонічної форми є змінним у часі, має екстремуми на початку процесу і при переході через криоскопічну температуру, а також функціонально залежить від теплофізичних властивостей продуктів і режимів заморожування.

НАУКОВІ РЕЗУЛЬТАТИ, ОТРИМАНІ В РОБОТІ.

1. Створена математична модель теплопровідності харчових продуктів, яка базується на врахуванні особливостей структури їх клітинної і внутрішньоклітинної будови. Модель на структурному рівні описує відмінності в теплопровідності м'ясопродуктів удовж і впоперек м'язових волокон, дозволяє розраховувати теплопровідність різноманітних продуктів у широкому діапазоні температур з використанням мінімальної кількості даних по їх складу і будові.

Адекватність моделі підтверджена опрацюванням даних різних авторів по теплопровідності цільних м'ясопродуктів в діапазоні температур від -30 до +30 °С.

2. Проведено експериментальне дослідження режимів псевдосвіднення для шару дрібних часток (з характерним розміром від 5 до 15 мм.) сферичної, еліпсоїдної і кубічної форми. Досліджено вплив ступеня вологості поверхні часток на динаміку псевдосвідненого шару, отримані експериментальні дані по усунічці мікроподібною

картонні в псевдозрідженому шарі.

Отримані узагальнюючі формули для розрахунку критичних і оптимальних швидкостей псевдозрідження для шару як сухих, так і зволжених часток.

3. Створений комплекс програм для рішення нелінійних задач заморожування харчових продуктів у вигляді тіл канонічної форми в одно-, дво- і тримірних постановках. Розрахунковим шляхом виявлено залежність коефіцієнту гомохронності від режиму заморожування і теплофізичних властивостей продукту. Установлено наявність екстремуму коефіцієнта гомохронності при переході температури центру заморожуваного тіла через криоскопічну.

Проведена серія фізичних експериментів, які підтверджують достовірність результатів, отриманих шляхом комп'ютерного моделювання.

ПРАКТИЧНА ЦІННІСТЬ РОБОТИ. Комплекс програм, математичні моделі, емпіричні формули і результати експериментальних досліджень, які приводяться у роботі, можуть бути використані при розробках як флотизаційних швидко-розильних апаратів, так і іншого обладнання і технологій, якими передбачається високоінтенсивна холодильна обробка продукції, вимагаюча детального врахування динаміки теплообміну і зв'язних із нею факторів.

ПУБЛІКАЦІЇ. По матеріалах дисертації підготовлено 5 робіт для опублікування.

АПРОБАЦІЯ РОБОТИ. Результати проведеної роботи частково доповідались на науково-технічній конференції професорсько-викладацького складу і наукових працівників Одеського інституту низькотемпературної техніки та енергетики (1992 р.)

СТРУКТУРА І ОБ'ЄМ ДИСЕРТАЦІЇ. Робота складається із вступу, трьох частин, висновків, списку використаної літератури і прикладень. Дисертація нараховує 131 сторінку машинописного тексту, в тім числі 5 таблиць, 37 малюнків. Бібліографія вклучає 91 вказування.

Текст дисертації написано російською мовою.

ЗМІСТ РОБОТИ.

У вступі обґрунтовані актуальність роботи, сформульовані мета і задачі досліджень, наукові положення, які захищаються у роботі. Вказані наукова новизна і практична цінність роботи.

Кожна із трьох частин дисертації присвячена розробці одного з питань, сформульованих у меті роботи. Згідно з цим, частина містить короткий літературний огляд з аналізом існуючих робіт по розглядуваному питанню і виклад відповідних рішень автора з описом методів їх стримання.

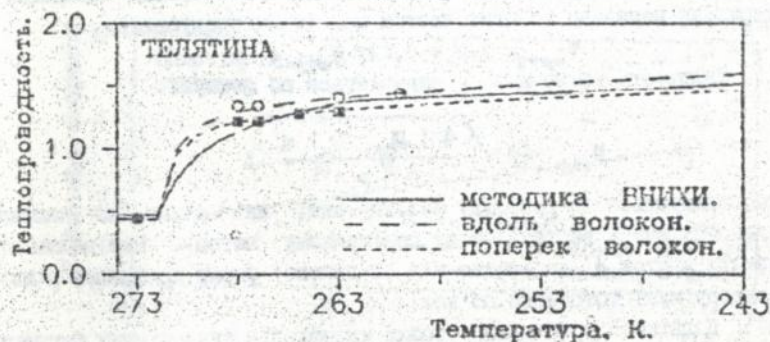
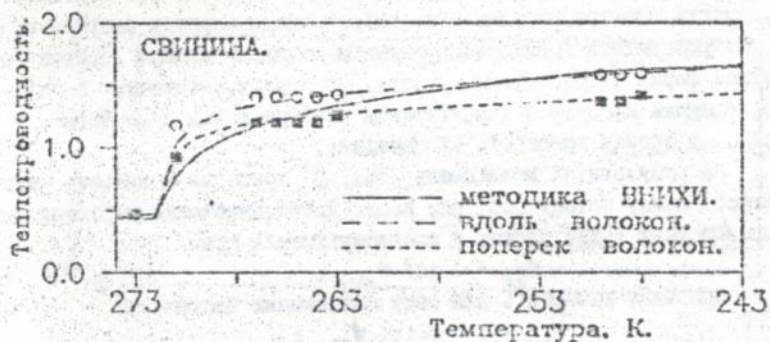
Перша частина присвячена розробці математичної моделі теплопровідності харчових продуктів з клітинною будовою. На основі аналізу існуючих робіт зроблено висновок, що їх автори не змогли створити адекватних математичних моделей тому, що нехтували врахуванням структурних особливостей будови харчових продуктів на клітинному рівні.

Із наявних даних цитологічних досліджень по внутрішній будові клітин біологічних організмів прийнято до уваги, що крім зовнішньої мембрани всередині клітини існує складна розгалужена система внутрішніх мембран, які створюють ендоплазматичну сітку. Будова і теплофізичні властивості ендоплазматичної сітки аналогічні зовнішній мембрані. Виходячи з цього, а також із розгляду будови внутрішньоклітинних органелів і утворень прийнято, що клітину в цілому можна розглядати як побудовану з окремих елементарних комірок. Всередині комірки міститься цитоплазма з розчиненими в ній жирами, солями, газами і іншими речовинами. Зовні комірка покрита білково-ліпідною оболонкою. Теплопровідність клітини в цілому рівна теплопровідності елементарної комірки з врахуванням впливу особливостей її структури на проходження теплового потоку — теплові місточки, місцеві термічні опори і т. п.

Для спрощення математичних викладок прийнято, що комірка має форму прямокутного паралелепіпеда. Товщина оболонки однакова по всій поверхні комірки. Співвідношення розмірів комірки і її орієнтація визначаються родом харчового продукту. Відносна товщина оболонки знаходиться через вологість внутрішньоклітинних соків φ , яка може бути встановлена експериментально.

Для перевірки адекватності розробленої моделі використані експериментальні дані по теплопровідності свинини, гов'ядини, телятини, ягнятину, тріски, пікні, скумбрії в діапазоні температур від -30 до $+30$ °C. На відміну від загальнорекомендованої у даний час методики ВНИИ, результати розрахунків по розробленій математичній моделі узгоджуються з наявними експериментальними даними як кількісно, так і якісно — мал. 1.

Однією із складових частин загальної моделі теплопровідності являється система з двох паралельних суміжних пластин з різними теплопровідностями і неадіабатною границею контакту при напрямку теплового потоку, паралельному пластинам. Числовими методами досліджено еквівалентну теплопровідність такої системи (у двовимірній постановці) при різних граничних умовах на поверхнях входу і виходу теплового потоку. Установлено, що еквівалентна теплопровідність такої системи являється максимальною при граничних умовах 1-го роду. При граничних умовах 2-го роду еквівалентна теплопровідність мінімальна і залежить від співвідношення загальних розмірів системи. При граничних умовах 3-го роду еквівалентна теплопровідність також залежить від величини коефіцієнта тепловіддачі.



Мал. 1.

з другої частини приводяться результати експериментального дослідження псевдозрідженого шару дрібних часток округлої і кубічної форми. Звернено увагу, що при розробці флоридизаційних апаратів для заморожування подрібненої плодівовчевої сировини необхідні дані про вплив степеня вологості поверхні часток продукту на режими його псевдозрідження, які в літературі відсутні.

Для проведення дослідів по псевдозрідженню побудований експериментальний стенд на базі малогабаритного центробіжного вентилятора з приводом постійного струму. Робочий участок стенда являє собою вертикальну трубу з прямокутним поперечним перерізом 67x80 мм. Днищем труби являється дрібночарункова металева сітка, під яку знизу подається потік повітря. Для заміру швидкостей повітря використані два крильчатих анемометри УБ, одні з яких установлено на виході робочого участку, а другий - на вході в вентилятор. Швидкість повітря регулювалась зміною числа обертів вентилятора.

Проведились дослідження режимів псевдозрідження часток округлої форми (ягоди бузини, глоду, винограду, кісточка вишні) і картопляних кубиків з характерними розмірами від 5 до 15 мм. і з різним ступенем вологості їх поверхні.

По результатах досліджень (мал. 2) критична швидкість набігаючого знизу потоку повітря, необхідна для початку переходу насипного шару сухих часток у псевдозріджений стан:

$$W_{kr} = 0.147 W_{fly} ;$$

Критична швидкість для шару зволжених часток:

$$W_{kr} = 1 + 0.147 W_{fly} ;$$

Оптимальна швидкість, необхідна для запобігання можливості змерзання незначно вологих часток при їх заморожуванні:

$$W_{opt} = 2.2 + 0.147 W_{fly} ;$$

Швидкість витання W_{f-y} знаходиться по формулі

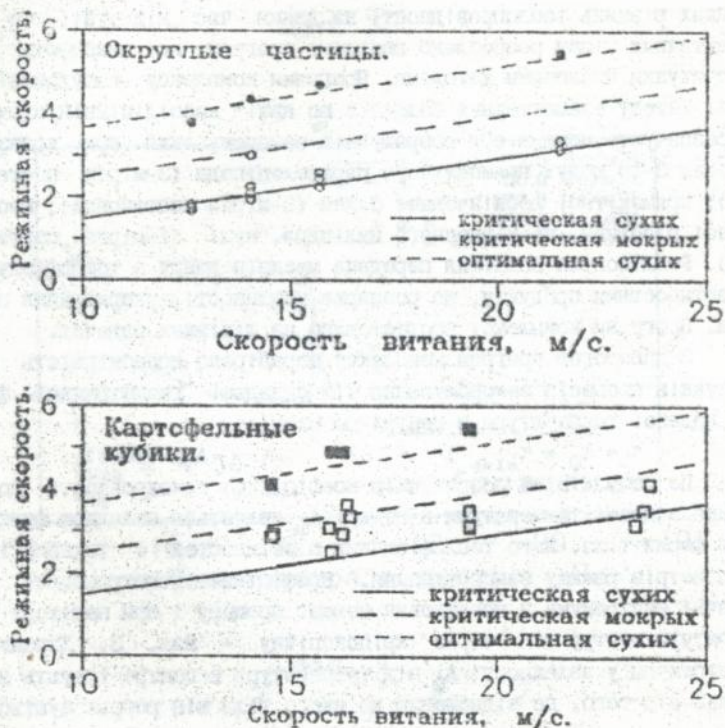
$$W_{fly} = 2 \sqrt{\frac{d (\rho_{pr} - \rho_a) g}{3 \xi \rho_a}} ;$$

яка отримується із розгляду балансу сил, які діють на частку, вільновитанчу у вертикальному повітряному потоці. Еквівалентний діаметр часток d незалежно від їх дійсної форми приймається рівним діаметру кулі тотожного об'єму.

Додатково проведена с'робка матеріалів агалогічних експериментальних досліджень А. Фікіїна і А. М. Войтко для сухих часток

округлої форми діаметром від 15 до 50 мм., яка також підтверджує лінійний характер залежності $W_{кр}$ від $W_{віт}$. Відмічається лиш розбіжність у коефіцієнтах пропорційності (0,104 у А. М. Войтко і 0,122 у А. Фікіґа), яка може бути пояснена через величину вібрації підтримуючої сітки і вплив форми і розмірів робочого участку стєнда на структуру упаковки часток у насипному шарі.

Оскільки при проведенні дослідів з картопляними кубиками відмічається значне зменшення їх розмірів із-за усування, то в ході дослідів додатково проводилось зважування кубиків для внесення відповідних коректив. Таким чином побічно отримані дані по усумці в псевдосрідженому шарі. Їх аналіз показує, що інтенсивність



Мал. 2.

усушки в значній мірі визначається процесами дифузії в продукті. Але на коротких початкових проміжках часу можна вважати, що холода випаровується тільки з поверхні часток. Значення коефіцієнтів тепловіддачі, розраховані по рівнянню Льюїса, узгоджуються з діапазоном аналогічних даних різних авторів - це показує можливість використання такого підходу з метою експериментального визначення коефіцієнтів тепловіддачі в псевдозрідженому шарі.

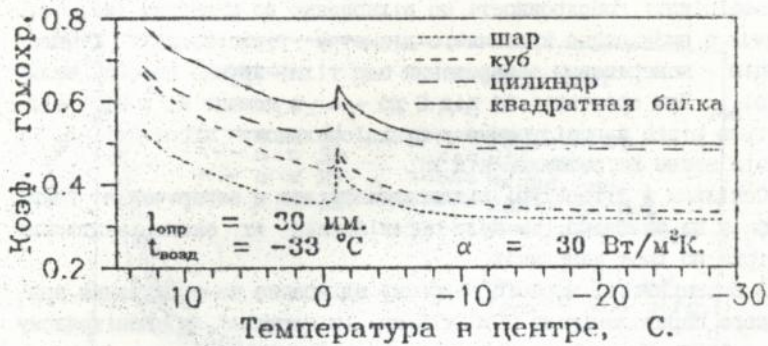
В третій частині коротко проаналізовано основні існуючі методи розрахунків процесів заморожування харчових продуктів, відмічені їх недоліки і причини непридатності для розрахунків високодинамічних процесів у швидкокоморовозильних апаратах. Показана недостатня обґрунтованість і явні протиріччя широко використовуваного методу коефіцієнта гомохронності (коефіцієнта форми).

Оскільки аналітичні методи розв'язання нелінійних диференціальних рівнянь теплопровідності на даний час відсутні, то для практичних цілей розроблено комплекс програм, які виконують такі розрахунки числовими методами. Програми комплексу побудовані на базі методу елементарних балансів по явній квазілінійній схемі і забезпечують можливість розрахунків заморожування при граничних умовах 3-го роду: прямокутного паралелепіпеда (3-мірна постановка); прямокутної нескінченної балки (2-мірна постановка); необмеженої пластини, нескінченного циліндра, кулі (1-мірна постановка). Реалізована зовнішня передача масивів даних з теплофізичними властивостями продукту, що розширює можливості використання програм. Програми комплексу протестовано на лінійних задачах.

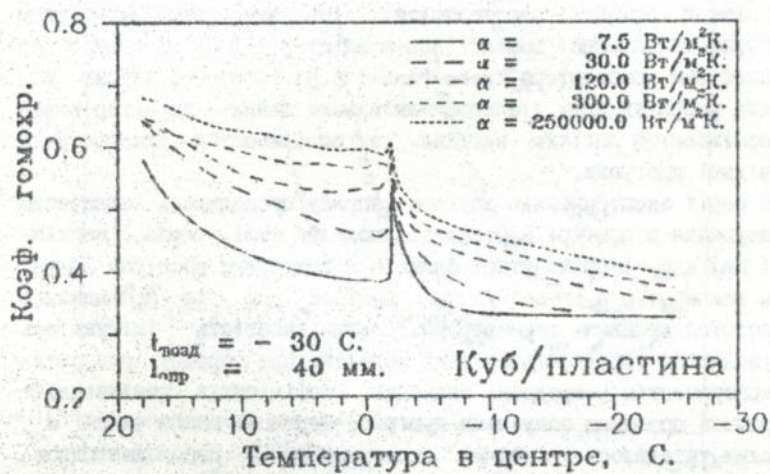
З допомогою програм комплексу перевірено правомірність розрахунків процесів заморожування тіл складної геометричної форми до заданої температури в центрі по схемі:

$$\tau = A_{\text{ф}} * \tau_{\text{stab}} ; \quad A_{\text{ф}} = \text{Const} ;$$

По результатах розрахунків коефіцієнт гомохронності досягнення заданої температури в центрі $A_{\text{ф}}$ являється складною функцією від форми тіла, його теплофізичних властивостей і технологічних параметрів режиму заморожування. Коефіцієнт гомохронності має значні екстремуми у початковий момент процесу і при переході температури центру тіла через криоскопічну - мал. 3. Характерні екстремуми у залежності $A_{\text{ф}}$ від температури в центрі існують незалежно від того, по відношенню до якого тіла він розраховується.



Мал. 3.



Мал. 4.

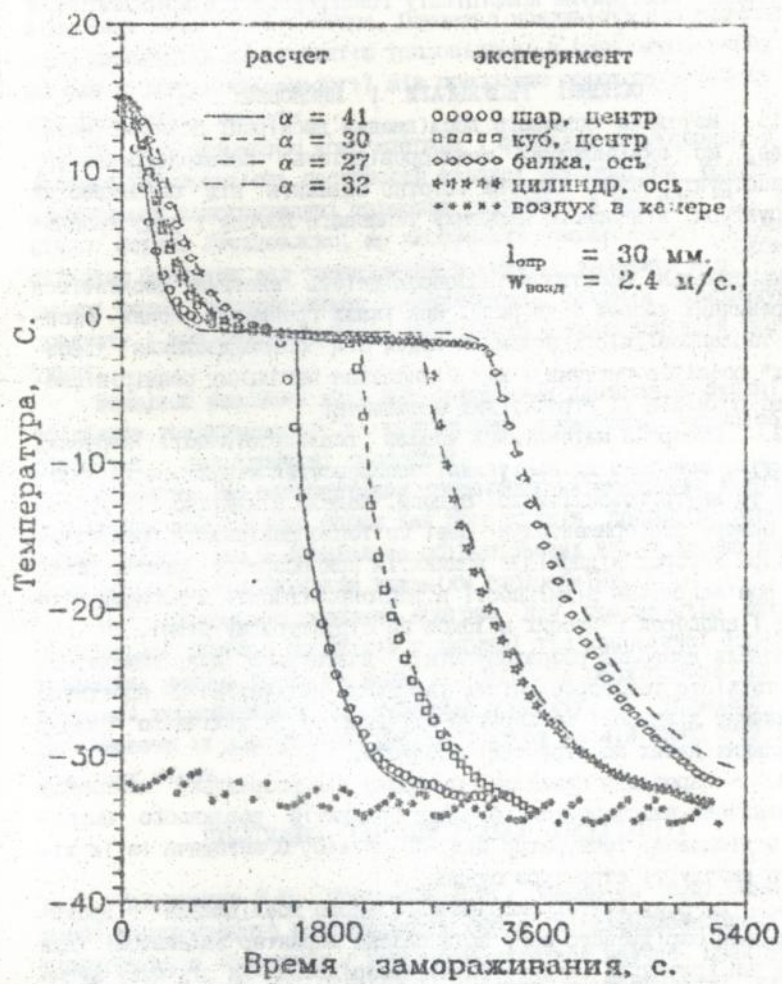
Виважено також зв'язок між критичними діаметрами теплоізоляції сферичних і циліндричних поверхневих та функціональної поведінкою коефіцієнту гомохронності по відношенню до пластини (мал. 4). Виходячи з визначення критичного діаметру теплоізоляції (теплоізоляція - поверхневий заморожений шар тіла) зручно ввести величину $Bi_{кр}$. При зростанні Bi від 0 до $+\infty$ в момент $Bi = Bi_{кр}$ відбувається різке заповільнення у функціональному зростанні A_{ϕ} і далі він майже не залежить від Bi .

Оскільки в літературі підтвердження або ж заперечення таких висновків не знайдено, то була організована їх експериментальна перевірка по двох напрямках.

В експерименті першого напрямку здійснено заморожування прямокутного паралелепіпеда $30 \times 30 \times 73$ мм. із картоплі в повітряному потоці -33°C . На поверхні паралелепіпеда закріплювались датчики температури і теплового потоку - по їх показках визначались значення коефіцієнтів тепловіддачі. Результати експерименту обраховувались програмово для прямокутного паралелепіпеда. Особливість цієї програми в тому, що вона забезпечує розрахунок теплообміну лише в одному октанті паралелепіпеда (це зумовлено сегментною структурою оперативної пам'яті ЕЕМ-комп'ютерів і зв'язаними з нею властивостями компілятора Turbo-Pascal 5.5). Отримано хороше узгодження розрахункових і експериментальних даних - характер наявних розбіжностей логічно витікає із особливостей використання відповідної програми.

В серії експериментів другого напрямку проводилось одночасне заморожування в повітрі картопляних моделей кулі, куба, нескінченних циліндра і прямокутної балки з характерним розміром 30 мм. Заміри температур в геометричних центрах цих тіл проводились мідь-константановими термопарами. "Нескінченність" імітувалась теплоізоляцією торців відповідних моделей. При обробці результатів експериментів усереднені значення коефіцієнтів тепловіддачі підбирались пробними запусками програм. Отримане таким чином $\alpha_{ар}$ для балки узгодилось із даними експерименту з паралелепіпедом, який проводивсь при аналогічних умовах. Значення $\alpha_{ар}$ для кулі і циліндра узгодились з розрахованими по відповідних методиках.

Незначні відмінності між експериментальними і розрахунковими даними дані (мал. 5) по температурах центрів і їх характер пояснюються теплопровідністю термопар (кулі, куб) і проходженням



Мал. 5.

тепла через теплоізоляцію торців (циліндр, балка). Характер і величина розбіжностей такі, що не зумовляють істотного впливу на розрахункові екстремуми коефіцієнту теплохронності в криоскопічних точці.

ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ І ВИСНОВКИ.

1. Методами числового дослідження двовірної області встановлено, що еквівалентна теплопровідність багатокomпонентної складноструктурованої системи істотно залежить від особливостей її структури, відносного напрямку теплового потоку і роду граничних умов.

Максимальна ефективна теплопровідність системи досягається при граничних умовах 1-го роду. При інших граничних умовах ефективна теплопровідність залежить також від співвідношення "табаритних" розмірів системи і від відношення загальних розмірів системи до розмірів її структурних елементів.

2. Створена математична модель теплопровідності харчових продуктів, основана на врахуванні особливостей структури їх лінійної та внутрішньоклітинної будови. Модель кількісно і якісно добре описує експериментальні дані по теплопровідності продуктів, структура которых відповідає прийнятій при розробці моделі. Так, добре роз'яснюються відмінності в теплопровідності м'ясопродуктів вздовж і впоперек м'язових волокон на структурному рівні.

Модель дозволяє розраховувати з достатньою для інженерних цілей точністю теплопровідність харчових продуктів в практично цікалому діапазоні температур виходячи із їх хімічного складу і загальних даних по структурі продукта.

3. Розроблена прикладна програма для розрахунку комплексу теплофізичних властивостей харчових продуктів рослинного походження в діапазоні температур від -40 до $+40$ °C виходячи із їх хімічного складу та структури будови.

4. По результатах експериментального дослідження гідродинаміки псевдоерідженого шару встановлено характер залежності для визначення критичних швидкостей псевдоерідження як лінійної функції від швидкості витягання окремої частки.

5. Експериментально вивчено вплив ступеня вологості поверхні часток різної форми на гідродинаміку псевдоерідженого шару. Встановлено, що цей вплив найбільш істотний для дрібних часток із

обширними плоскими поверхнями, по яких можливе їх злипання.

6. Стримані експериментальні дані по усущі мілкоподрібленої картоплі в псевдозрідженому шарі при кімнатних температурах і відносних вологостях повітря. Показана можливість експериментального визначення коефіцієнтів тепловіддачі в псевдозрідженому шарі на основі потрібної аналогії між процесами переносу кількості маси, імпульсу і теплоти.

7. За допомогою комп'ютерних і фізичних експериментів досліджена гомохронність досягнення заданої температури центру при однофазному заморожуванні харчових продуктів у вигляді тіл канонічної форми. Установлено, що коефіцієнт гомохронності являється складною функцією від температури в центрі, залежить від геометричної форми, теплофізичних властивостей, режимів заморожування продукту і має екстремуми при початковій і критичній температурах.

Виявлено взаємозв'язок між граничними значеннями функції коефіцієнту гомохронності і критичними діаметрами теплоізоляції сферичних і циліндричних поверхней.

Показано, що використання одновірних математичних моделей з константою коефіцієнта форми для розрахунків процесів заморожування можливо лиш в спеціально обґрунтованих випадках, не вимагаючи детального врахування динаміки теплообміну.

8. Розроблено комплекс програм для розрахунків процесів холодоильної обробки продуктів у вигляді тіл канонічної форми при граничних умовах третього роду. В програмах реалізована зовнішня загрузка теплофізичних властивостей продукту, що дозволяє використовувати їх для рівняння широкого класу як лінійних, так і нелінійних задач.

ПУБЛІКАЦІЇ ПО МАТЕРІАЛАХ ДИСЕРТАЦІЇ:

1. Чедурнейко В.П., Бельченко В.М., Мирончук Ю.А. Замораживание мелкозернистого растительного сырья в флюидизационных скороморозных аппаратах. // Межреспубликанская научно-практическая конференция. // Совершенствование техники и технологии для эффективного хранения и переработки сельскохозяйственной продукции: тезисы докладов. - Краснодар.: Краснодарский Дом науки и техники, 1992. - с. 27.

2. Мирончук Ю.А., Чепурненко В.П. Теплопроводность слоистых структур и ее влияние на тепловые свойства пищевых продуктов. (на печати).
3. Мирончук Ю.А., Чепурненко В.П. Гидродинамика псевдооживленного слоя влажных частиц мелкоземельчатых растительных продуктов. (на депонировании).
4. Мирончук Ю.А., Чепурненко В.П. Математическая модель теплопроводности пищевых продуктов с клеточным строением. / Холодильная техника. (в печати).
5. Мирончук Ю.А., Чепурненко В.П. Фактор геометрической формы при замораживании пищевых продуктов. / Холодильная техника. (в печати).

УМОВИ ПОЗНАЧЕННЯ

A_{ϕ} - коефіцієнт гомохронності; Bi - критерій Біо; d - діаметр, м.; g - прискорення вільного падіння, m/s^2 ; w - швидкість, m/s ; α - коефіцієнт теплопровідності, $Вт/(m^2 \cdot c)$; ρ - густина, $кг/м^3$; ξ - коефіцієнт гідродинамічного опору; τ - час, с.;

ІНДЕКСИ

δ - повітря; glu - вугляння; kr - критичне значення; opt - оптимальне значення; pr - продукт; $plab$ - пластинка; ar - усереднене значення;