

Авторефер
437

Н

ОДЕСЬКА ДЕРЖАВНА АКАДЕМІЯ ХОЛОДУ

Нгуєн В'єт Зунг

УДК 621.6

**РОЗРОБКА ПРОЦЕСІВ ХОЛОДИЛЬНОЇ ТЕХНОЛОГІЇ ПЛОДІВ МАНГО
МЕТОДАМИ ТЕПЛОФІЗИЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ**

Спеціальність 05.18.13 – Технологія консервованих і охолоджених
харчових продуктів

АВТОРЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Одеса - 2008

Дисертація є рукописом.

Робота виконана на кафедрі холодильних установок Одеської державної академії холоду Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник : доктор технічних наук, професор, заслужений діяч науки України Чумак Ігор Григорович, Одеська державна академія холоду, радник ректора

Офіційні опоненти : доктор технічних наук, професор, Тележенко Любов Миколаївна, Одеська національна академія харчових технологій, професор кафедри консервування

кандидат технічних наук, доцент, Масліков Максим Михайлович, Національний університет харчових технологій, доцент кафедри теплоенергетики та холодильної техніки

Захист відбудеться "12" 05, 2008 р. о 11⁰⁰ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 41.087.01 в Одеській державній академії холоду Міністерства освіти і науки України за адресою

082, м. Одеса, вул. Дворянська, 1/3, ауд. 108.

можна ознайомитись в бібліотеці Одеської державної академії холоду за вул. Дворянська, 1/3.

"11" 04, 2008 р.

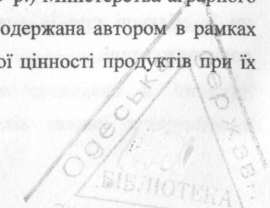
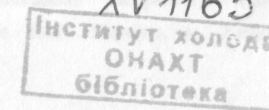
В.І. Мілованов

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність дослідження. Вирішення задач забезпечення продовольчої безпеки України та В'єтнаму, подальший розвиток агропромислового комплексу та збільшення об'ємів експорту плодоовочевої сировини В'єтнаму, зберігання зібраного урожаю сільськогосподарських культур в рамках концепції збереження не тільки привабливого торгівельного вигляду, а і високих значень показників харчової цінності, отримало новий розвиток та актуальність за відомих причин демографічного, соціального, економічного та екологічного характеру. Особливо актуальною є сьогодні розробка науково-технічних основ для обґрунтованого проектування технологій зберігання харчової сировини з акцентом на зміни значень показників харчової цінності, втрат маси за рахунок протікання процесів респірації та транспірації, вибору пакувальних матеріалів з наперед заданими параметрами щодо проникливості через них атмосферних газів, режимними характеристиками процесів холодильної обробки та холодильного зберігання.

Одним з перспективних плодів В'єтнаму, що має високу харчову якість, є плоди манго. Перспективи розширення виробництва та експорту манго пов'язані з необхідністю проведення наукових досліджень в напрямі технології охолодження та подовженого в часі холодильного зберігання свіжих плодів манго у модифікованому газовому середовищі (МГС), а також технології заморожування плодів чи їх м'якшу з подальшим довготерміновим зберіганням, транспортуванням у замороженому стані. Фізико-хімічні процеси, біохімічні реакції, фазові та структурні перетворення води суттєвим чином впливають як на зміни якості плодоовочевої сировини, так і на режими та терміни її зберігання, витрати електроенергії на проведення технологічних процесів. Вирішенню фізико-хімічних, теплофізичних, тепломасообмінних задач, а через них і задач проектування технологій зберігання плодів манго в умовах МГС чи в замороженому стані 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 даної роботи, необхідно назвати такі імена : Алямовський І.Г., Головкин М.О., Дульнев Г.М., Жадан В.З., Загоруйко В.О., Латішев В.П., Метлицький Л.В., Чумак І.Г., Фікіїн А.Г., Bart Nikolai, Cameron A. C., Cle'ment Vigneult , Cleland A.C., Kader A. A., J. van't Leven, Lee D.S., Pol Tijskens, Yam K. L, Fishman S., Song Y., Tucker V.L., James S.J., Bailey C.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами : Тематика роботи відповідає визначенням Законом України пріоритетним напрямом розвитку науки і техніки, зокрема, п.7 „Нові технології і ресурсозберігаючі технології в енергетиці, промисловості і агропромислового комплексу” та державної програми розвитку виробництва плодів, овочів і квітів на період 1999 – 20010 р. (№ 2725/BNN-CBNLS від 04.08.1999 р.) Міністерства аграрного та сільськогосподарського розвитку В'єтнаму. Частина результатів одержана автором в рамках науково-дослідної роботи „Розробка наукових основ оцінки харчової цінності продуктів при їх



зберіганні та транспортуванні“ (номер державної реєстрації – 0106U002624), що виконувалась в Одеській державній академії протягом 2006-2007 років.

Мета і завдання дослідження полягають в розробці технології зберігання свіжих плодів манго в МГС та технології заморожування плодів чи м'якушу манго, а також відповідних математичних моделей процесів для відтворення цих технологій в умовах конкретного промислового виробництва.

Основними задачами, що вирішувались для досягнення поставленої мети, були такі :

- в рамках відомої гіпотези про ферментно-субстратний комплекс (ФСК) розробити математичну модель процесів респірації та транспірації плодоовочевої сировини в умовах МГС, при цьому моделювання процесів транспірації побудувати в рамках гіпотези про ізобарно-ізоентальпійне протікання процесу випаровування води в МГС;

- провести експериментальне дослідження процесу респірації плодів манго методами газової хроматографії МГС з метою подальшого виділення параметрів диференціальних рівнянь Міхаєліса-Ментена (ММ) для змін концентрацій O_2 та CO_2 в МГС;

- провести апробацію розробленої математичної моделі процесів респірації та транспірації, що протікають в МГС з використанням різних пакувальних плівок, шляхом співставлення розрахункових та експериментальних даних (своїх та інших авторів) на прикладі зберігання ягід чорниці та плодів манго;

- провести експериментальне дослідження методами спектроскопії ядерного магнітного резонансу (ЯМР) та низькотемпературної диференціальної калориметрії (НДК) температурної залежності рівноважної частки вимороженої води при заморожуванні м'якушу манго та можливих теплових ефектів, що можуть проявитися при розморожуванні манго (свіжозамороженого, місячного зберігання в камері холодильника, місячного зберігання в рідкому азоті);

- з урахуванням останніх літературних даних з теплофізичних властивостей переохолодженої води, льоду та м'якушу манго розробити методику прогнозування теплофізичних властивостей манго в діапазоні температур від 77 К до 313 К;

- розробити математичну модель процесу заморожування плодів манго чи упаковок його м'якушу як тіл неправильної геометричної форми у вигляді нелінійної нестационарної задачі теплопровідності та провести її апробацію;

- розробити техніко-технологічні рекомендації щодо проведення процесів зберігання в МГС та процесів заморожування плодів манго чи їх м'якушу в умовах промислових холодильників.

Об'єкт дослідження - плоди манго чи їх м'якуш, що зберігаються в умовах МГС чи заморожуються та розморожуються.

Предмет дослідження - фізико-хімічні, теплофізичні процеси, що протікають у плодах манго чи їх м'якуші при їх холодильному зберіганні в умовах МГС та при їх заморожуванні і розморожуванні.

Методи досліджень - експериментальні методи газової хроматографії, спектроскопії ЯМР, низькотемпературної диференціальної калориметрії та математичне моделювання процесів респірації, транспірації плодів в МГС і заморожування свіжих плодів чи їх м'якушу.

Наукова новизна одержаних результатів. У роботі вперше отримано та захищаються такі наукові положення та наукові результати :

1. В рамках загальної математичної моделі процесів респірації та транспірації плодоовочевої сировини одержала підтвердження гіпотеза про ізобарно-ізоентальпійне протікання процесів транспірації. Це дозволило на рівні похибок експериментальних даних описати зміни в часі температури МГС, її відносної вологості, кількості водного конденсату та загальних втрат маси продукту при його зберіганні в умовах МГС.

2. Розроблено математичну модель процесів респірації та транспірації плодів манго при зберіганні в умовах МГС. Модель дозволяє на базі малоємних хроматографічних досліджень плодів манго нового урожаю та даних про проникливість пакувальної плівки атмосферними газами проектувати технологію подовженого в часі зберігання плодів манго в умовах МГС без утворення конденсату в упаковці та з мінімізацією втрат маси продукту.

3. Методами ЯМР та НДК одержано дані щодо рівноваг „переохолоджена вода – лід“ в м'якуші манго, при цьому чисельні дані для частки вимороженої води суттєво не відрізняються при розморожуванні свіжозамороженого, місячного зберігання в холодильній камері та місячного зберігання в рідкому азоті. В області температур від мінус 60°C до мінус 40°C при розморожуванні спостерігається перехід склованого льоду в переохоложену воду с наступним утворенням кристалічного льоду, при цьому зберігання замороженого манго супроводжується слабо вираженою кристалізацією.

4. Розроблено методику прогнозування теплофізичних властивостей (ізобарна ефективна теплоємність, провідність теплоти, густина, ентальпія) м'якушу манго в широкому діапазоні температур та одержано таблиці цих властивостей для манго з початковим вологовмістом 0.84. Похибки прогнозування оцінені як $\pm 8\%$ для C_p , $\pm 10\%$ для λ , $\pm 5\%$ для ρ при температурах від мінус 40°C до 40°C.

5. Розроблено математичну модель процесів заморожування плодів манго та його м'якушу (в контейнері форми паралелепіпеду), яка дозволяє розраховувати змінні в часі температурні поля продукту, поля частки вимороженої води, теплові потоки, кількість відведеної теплоти, середньомасову температуру та загальну тривалість процесу заморожування як час досягнення наперед заданого значення середньомасової температури.

6. Розроблено техніко-технологічні рекомендації щодо проведення попередніх досліджень плодів манго нового урожаю для розробки технології їх зберігання в умовах МГС, щодо режимів заморожування плодів чи їх м'якушу, попереднього охолодження плодів перед їх пакуванням.

Обґрунтованість та достовірність наукових положень, висновків і рекомендацій забезпечена використанням сучасних апробованих методів спектроскопії ЯМР та низькотемпературної диференціальної калориметрії (дослідження проведено в Інституті кріобіології та кріомедицини НАН України, м. Харків), методів газової хроматографії

(дослідження проведено на підприємстві „Айсблік”, м.Одеса) та апробованих методів математичного моделювання тепломасообмінних процесів і статистичної обробки експериментальних даних. Обґрунтованість наукових результатів і висновків також базується на аналізі значної кількості експериментальних даних інших авторів, зокрема, досліджень процесів респірації і транспірації ягід чорниці та процесів заморожування об'єктів тваринного та рослинного походження.

Наукове значення мають такі результати проведених досліджень :

- математична модель ізобарно – ізентальпійного процесу випаровування води з плодів та овочів в МГС в рамках загальної моделі процесів їх респірації і транспірації та її апробація;
- експериментальні дані з характеристик процесу респірації плодів манго та результати їх обробки;
- експериментальні дані з рівноважної частки вимороженої води в залежності від температури при заморожуванні та розморожуванні м'якшу манго, експериментальні дані низькотемпературної калориметрії щодо фазового перетворення „склована вода-рідина на вода-кристалічний лід” в процесі розморожування м'якшу манго;
- температурні залежності ефективної теплоємності, густини, ентальпії, частки вимороженої води, перколяції теплоти плодів манго в діапазоні мінус 40 °С-40 С.

Практичне значення одержаних результатів полягає в тому, що виробництву плодів манго запропоновано пакет розрахункових процедур, з допомогою яких можуть бути розраховані параметри пакувальних плівок для пакування плодів нового урожаю за результатами вимірювань їх респіраційних характеристик (з метою подовження термінів зберігання плодів у свіжому стані). Аналогічно, за результатами вимірювань масової частки води та температури початку кристалізації за розробленими в роботі алгоритмами та розрахунковими процедурами можуть в умовах конкретного підприємства запроєктовані режими процесів заморожування плодів та м'якшу манго. Впровадження результатів даної роботи має бути на підприємствах агропромислового комплексу В'єтнаму, а наукові результати при розробці технологій холодильного зберігання рослинної сировини, що вирощується на Україні.

Особистий внесок здобувача. Дисертаційна робота виконана при консультативній підтримці наукового керівника. У виконанні окремих розділів роботи брали участь д.т.н., проф. Овціченко В.П. (ОДАХ), д.ф.-м.н., проф. Зінченко В.Д., д.б.н., проф. Зінченко О.В. (Інститут проблем кріобіології і кріомедицини НАН України), зав. лаб. Чех Ю.О., гол. інж. Кислий А.М. (підприємство „Айсблік”) та інші співробітники ОДАХ. Особисто здобувачем виконано : аналіз літературних даних за тематикою роботи, розробка методики експериментального дослідження процесів респірації плодів манго, проведення експериментальних досліджень процесів респірації, розробка математичної моделі та розрахункових процедур для процесів респірації та транспірації, обробка результатів експериментальних досліджень процесів респірації, участь у проведенні експериментальних досліджень спектрів ЯМР та низькотемпературної калориметрії, розробка процедур прогнозування теплофізичних властивостей манго, розробка процедур розрахунку

характеристик процесів охолодження та заморожування манго, проведення усіх розрахунків та аналіз одержаних результатів.

Висновки і рекомендації, наведені у роботі, отримані дисертантом самостійно, текст дисертації написано ним самостійно.

Апробація результатів дисертації. Основні положення і результати дисертаційної роботи доповідалися дисертантом і обговорювалися на таких конференціях : міжнародна науково-технічна конференція «Промисловий холод і аміак», Одеса, ОДАХ, 28-30 серпня 2006 р.- дві доповіді; II міжнародна науково-технічна конференція –виставка "Іноваційні технології XXI століття для кліматизації і теплопостачання будівель", Одеса, "АВОК-Україна", 18-19 вересня 2006 р.- одна доповідь; VI науково-технічна конференція «Сучасні проблеми холодильної техніки і технології», Одеса, ОДАХ, 19-21 вересня 2007 р.- дві доповіді; VII міжвузівська студентська науково-технічна конференція «Еколого-енергетичні проблеми початку XXI століття», Одеса, ОДАХ, 18-19 квітня 2007 р. – одна доповідь.

Публікації. Основні результати роботи опубліковано в 4 статтях спеціалізованого наукового видання та у 5 доповідях і тезах конференцій.

Структура та обсяг дисертації. Дисертація складається зі вступу, чотирьох розділів, переліку літературних джерел 310 найменувань та 5 додатків. Загальний обсяг дисертації становить 239 сторінок, з яких 135 с. основного тексту, 49 рисунків та 18 таблиць.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовано актуальність теми дисертаційного дослідження, сформульовано мету, задачі роботи, одержані наукові результати та положення, що захищаються, практичну значимість одержаних результатів дослідження, відомості про апробацію результатів та публікації.

У першому розділі на основі огляду літературних джерел з питань технологій збереження плодовоовочевої сировини, програми розвитку агропромислового комплексу В'єтнаму сформульовано мету і конкретні задачі досліджень.

Аналіз програм виробництва плодів, овочів і квітів у В'єтнамі свідчить про перспективи його економічного розвитку за рахунок удосконалення технологій зберігання плодовоовочевої продукції. З іншого боку, технології, що поширені в світі, наприклад, застосування холодильної обробки сумісно з РГС чи МГС для збереження сировини у свіжому вигляді, науково недостатньо обґрунтовані, носять часто тільки якісний характер. Інформаційні довідники ще не містять даних відносно проникливості атмосферними газами нових, екологічно прийнятних пакувальних плівок. Технологія МГС більш прийнятна за багатьох причин для зберігання ряду видів плодів та овочів, але математичні моделі формування МГС ще не достатньо розвинуті. Зокрема, процеси дихання (респірації) ефективно моделюються в рамках гіпотези про ФСК, але процеси випаровування (транспірації) моделюються рівняннями, що не дають задовільного

узгодження з експериментальними даними. Тому, в даній роботі прийнято розробити математичну модель процесів холодильного зберігання плодів та овочів на базі використання гіпотези про ФСК з доповненням відповідних рівнянь ММ рівняннями, що моделюють тепловологісні процеси в системі "продукт + МГС + пакувальна плівка + зовнішня атмосфера" в рамках гіпотези про ізобарно-ізоентальпійне протікання процесу випаровування води продукту в МГС.

Більш довгострокове, альтернативне зберігання ряду плодів та овочів можливе і в замороженому стані. Але науково обґрунтованої технології (ресурсо - та енергозберігуючої) для конкретних видів рослинної сировини не розроблено, бракує для проведення такої розробки даних щодо температурних залежностей теплофізичних властивостей сировини, зокрема, для багатьох плодів, що вирощуються в тропіках. Тому вирішення відповідних проблем також ввійшло в перелік задач даної роботи.

В якості основного об'єкту розробки холодильної технології вибрано плоди манго, що складають вагому частку виробництва у В'єтнамі. З іншого боку, вирішення поставлених задач може бути використано для розробки холодильної технології інших плодів та овочів, як В'єтнаму, так і України.

Другий розділ "Експериментально – теоретичне дослідження процесів дихання, випаровування при холодильному зберіганні плодів манго в МГС" присвячено удосконаленню математичної моделі протікання процесів респірації та транспірації при зберіганні плодів, ягід, овочів в індивідуальних упаковках (в умовах МГС). В рамках гіпотези про ФСК диференційні рівняння кінетики формування концентрацій чотирьох атмосферних газів в МГС мають вид

$$\frac{dO_2}{dt} = \frac{100}{V} \cdot \left\{ \frac{F \cdot k_{O_2} \cdot P}{L} \cdot \left[\frac{O_{20} - O_2}{100} \right] - M_{pr} \cdot R_{O_2} \right\}, \quad \frac{dCO_2}{dt} = \frac{100}{V} \cdot \left\{ \frac{F \cdot k_{CO_2} \cdot P}{L} \cdot \left[\frac{CO_{20} - CO_2}{100} \right] + M_{pr} \cdot R_{CO_2} \right\}, \quad (1)$$

$$\frac{dN_2}{dt} = \frac{100}{V} \cdot \left\{ \frac{F \cdot k_{N_2} \cdot P}{L} \cdot \left[\frac{N_{20} - N_2}{100} \right] \right\}, \quad \frac{dAr}{dt} = \frac{100}{V} \cdot \left\{ \frac{F \cdot k_{Ar} \cdot P}{L} \cdot \left[\frac{Ar_0 - Ar}{100} \right] \right\},$$

а питомі інтенсивності дихання R_{O_2} та R_{CO_2} моделюються рівняннями ММ

$$R_{O_2} = \frac{K_{1,O_2} \cdot O_2}{K_{2,O_2} + (1 + CO_2/K_{3,O_2}) \cdot O_2}, \quad R_{CO_2} = \frac{K_{1,CO_2} \cdot O_2}{K_{2,CO_2} + (1 + CO_2/K_{3,CO_2}) \cdot O_2} \quad (2)$$

Параметри K_{1,O_2} , K_{1,CO_2} , K_{2,O_2} , K_{2,CO_2} , K_{3,O_2} , K_{3,CO_2} рівнянь (2) визначаються з експериментальних даних газової хроматографії МГС в різні моменти часу на ізотермах, носять характер

апроксимаційних коефіцієнтів. При диханні виділяється теплота дихання, питоме значення інтенсивності q_R якої визначалось за виразом

$$q_R = \frac{2816}{6} \left(\frac{R_{O_2} + R_{CO_2}}{2} \right) \cdot \theta \cdot V_\mu^{-1}(T)$$

Подальше моделювання, результати якого складають наукову новизну даної роботи, проводилось в рамках гіпотези (Онiщенко В.П., Чумак І.Г., 1981 р.) про ізобарно-ізоентальпійне протікання процесу випаровування (транспірації) води з плодів в МГС (рівність зміни ентальпії продукту за проміжок часу $\Delta\tau$ та відповідної зміни ентальпії МГС). Відповідні співвідношення записані на мові шести незалежних змінних - мольні концентрації $x_i(\tau)$, $i=1,4$ для чотирьох неконденсуючих атмосферних газів, абсолютний вологовміст $d(\tau)$ водяної пари в МГС. Шостою незалежною змінною є температура $T(\tau)$ або відносна вологість $\varphi(\tau)$ газової суміші (МГС). Питома ентальпія МГС в ідеально-газовому наближенні визначається через ці змінні виразом

$$i_0(\tau) = \sum_{j=1}^4 x_j \cdot H_{0j}(T) + \frac{d}{(1+d) \cdot \mu_{H_2O}} \cdot H_{H_2O}^0(T) \quad (3)$$

Вираз для зміни ентальпії ΔI_{pr} продукту має при цьому вигляд

$$\Delta I_{pr} = \Delta\tau \cdot \left\{ M_{pr} \cdot q_R + \frac{m \cdot M_{pr}}{\mu_m \cdot V} \left[H_{O_2}^0 \cdot R_{O_2} - H_{CO_2}^0 \cdot R_{CO_2} \right] - L(T) \left[\frac{m}{1+d} \cdot \frac{dd(\tau)}{d\tau} + \frac{\Delta m_{cond}}{\Delta\tau} \right] \right\},$$

а зміни ентальпії ΔI_{MGS} МГС визначаються через зміни маси газової суміші та її питомої ентальпії плюс втрати ентальпії за рахунок конденсації водяної пари та її проникнення через пакувальну плівку (мембрану).

$$\Delta\tau \cdot \left[\frac{\Delta m}{\Delta\tau} \cdot i_0(\tau) + m(\tau) \cdot \frac{di_0(\tau)}{d\tau} \right].$$

Якщо питому ентальпію (3) розглядати як функцію незалежних змінних x_i , $i=1,4$, d , φ , то рівняння для $\frac{dd(\tau)}{d\tau}$ в рамках гіпотези про ізобарно – ізоентальпійний процес транспірації води одержано у вигляді

$$\frac{dd(\tau)}{d\tau} = \left[\left(\frac{\partial i_0}{\partial d} \right)_{x_j, P, \varphi} + \frac{L(T)}{1+d} \right]^{-1} \cdot \left\{ \frac{M_{pr}}{m(\tau)} \cdot q_R - \left(\frac{\partial i_0}{\partial \varphi} \right)_{x_j, P, d, j=1,4} \cdot \frac{\Delta\varphi}{\Delta\tau} \cdot \frac{2 \cdot L(T)}{m(\tau)} \cdot \frac{\Delta m_{cond}}{\Delta\tau} + \frac{M_{pr}}{\mu_m V} \left(\frac{H_{O_2}^0 R_{O_2}}{-H_{CO_2}^0 R_{CO_2}} \right) - \right. \quad (4)$$

$$\left. \left[\frac{1}{m(\tau)} \cdot \frac{\Delta m}{\Delta\tau} \cdot i_0(\tau) - \sum_{i=1}^4 \left(\frac{\partial i_0}{\partial x_i} \right)_{x_j, P, d, \varphi, i \neq j} \cdot \frac{dx_i}{d\tau} + \frac{H_{H_2O}^0}{m(\tau)} \cdot \frac{k_{H_2O} F(\varphi P''(T) - \varphi_0 P''(T_0))}{\delta} \cdot \left[\frac{P}{RT} \right] \right] \right\}$$

Сумма в притоки і втрати ентальпії, віднесена до продукту у сукупності з МГС, дає можливість записати і диференційне рівняння для температури :

$$\frac{dT(\tau)}{d\tau} = B / [M_{pr} \cdot C_{pr} + m(\tau) \cdot C_p^0(T)], \quad (5)$$

$$B = M_{pr} \cdot q_R - \sum_{j=1}^4 \frac{k_j \cdot F \cdot P^2}{\delta} (x_j - x_{0j}) \frac{H_{0j}(T)}{RT} - hF(T - T_0) - \left[\frac{H_{H_2O}^0}{\mu_{H_2O}} + L(T) \right] \frac{k_{H_2O} \cdot F \cdot (\varphi P''(T) - \varphi P''(T_0)) \cdot \left[\frac{\mu_{H_2O} P}{RT} \right]}$$

В процесі моделювання мають місце припущення, що в початковий момент часу продукт і МГС мають однакову температуру, склад МГС та навколишнього повітря також однакові. У наступні моменти часу температурне поле продукту однорідне, теплообмін між продуктом і МГС відсутній, температури продукту та МГС співпадають. Також співпадають склад продукту і МГС по неконденсуючим атмосферним газам. Такі припущення прийнятні у випадку, коли елементи продукту мають достатньо малий об'єм (дрібні ягоди та овочі, листові овочі). В протилежному випадку необхідно у математичну модель вводити крайові задачі теплопровідності та дифузії неконденсуючих атмосферних газів в елементах продукту.

Присутні в рівняннях (4,5) часткові тепловолгісні похідні питомої ентальпії МГС (3) розраховуються з урахуванням функціонального зв'язку між змінними T , d , φ , $P''(T)$ та концентраціями газів. Система шести звичайних нелінійних диференціальних рівнянь (1, 4, 5) разом з початковими умовами для концентрацій N_2 , O_2 , CO_2 , Ar , температури T_0 та відносної вологості φ_0 складають задачу Коші, чисельне інтегрування якої на інтервалі часу $(\tau, \tau + \Delta\tau)$ проводилось нами одночасно методами Рунге-Кутта, Кутта-Мерсона і Мілна з метою контролю похибок інтегрування. Можливе досягнення значень насиченого вологовмісту $d''(T)$ контролювалось в кінці кожного інтервалу інтегрування. Якщо різниця $\Delta d = d(T) - d''(T) > 0$, то $d(\tau + \Delta\tau) = d''(T)$ і, відповідно, добуток $\frac{m(\tau)}{1+d} \Delta d = \Delta m_{cond}$ трактувався як маса водяної пари, що сконденсувалася. Вона сумувалася з масою раніш утвореного конденсату $m_{cond}(\tau + \Delta\tau) = m_{cond}(\tau) + \Delta m_{cond}$. Після цього в рамках ідеально-газових термічних рівнянь стану $\frac{PV}{RT} \frac{\mu_i}{m_i(\tau)} \left(\frac{V_i}{V} \right) = 1$, $i = \overline{1,4}$ уточнюються нові значення мас неконденсуючих компонент в МГС. Нова загальна маса МГС $m(\tau + \Delta\tau) = (1+d) \sum_{i=1}^4 m_i$ дозволяє провести уточнення величин $\frac{\Delta\varphi}{\Delta\tau}$, $\frac{\Delta m}{\Delta\tau}$ і $\frac{\Delta m_{cond}}{\Delta\tau}$, позірної молекулярної маси μ_m суміші та її об'єму V за рівнянням $\frac{PV}{RT} \cdot \frac{\mu_m}{m(\tau + \Delta\tau)} = 1$. Такі обчислювальні процедури виконуються поки не буде досягнуто збіжності значень усіх характеристик МГС. Одержані значення характеристик МГС використовуються як початкові значення для проведення розрахунків на наступному інтервалі часу. Кінцево-різницеві відношення $\frac{\Delta\varphi}{\Delta\tau}$, $\frac{\Delta m}{\Delta\tau}$ і $\frac{\Delta m_{cond}}{\Delta\tau}$

введено в розрахункові формули, оскільки виконання нерівності $\Delta d = d(T) - d''(T) > 0$ приводить до зламу залежностей відповідних величин у часі.

У наведеному алгоритмі розрахунків представляє інтерес також обчислення маси CO_2 , що покидає продукт у результаті дихання, оскільки як в рамках гіпотези про ФСК, так і в більш складних моделях, така величина корелює з втратами субстрату (глюкози), втратами харчової цінності продукту. Сумування цих втрат з масою водяної пари, що випарувалась з продукту, дає величину загальних втрат маси продукту, яка є вимірюваною величиною і може бути використана для апробації математичної моделі. В свою чергу, прогнозування m_{cond} дає основу для вибору маси абсорбенту з метою недопущення розвитку популяції мікрофлори в упаковці.

З метою визначення параметрів рівнянь ММ (2) було проведено експериментальне хроматографічне дослідження процесу поглинання O_2 та виділення CO_2 при зберіганні свіжих плодів манго в умовах формування МГС у скляній посудині. Експериментальний стенд було створено на базі газового хроматографа "ЦВЕТ-500" з детектором по теплопровідності. Газовий носій – гелій, вимірювання складу проб МГС проводились з інтервалом в 1-3 години поки не було досягнуто об'ємної концентрації 2% O_2 . Похибка вимірювань концентрацій газів оцінена як ± 0.2 %. Одержані значення параметрів рівнянь (2) шляхом обробки одержаних експериментальних даних в рамках розробленої математичної моделі використані для прогнозних розрахунків характеристик процесів респірації та транспірації в умовах МГС, для апробації математичної моделі шляхом співставлення розрахункових та експериментальних даних різних авторів на прикладі плодів манго. Одержані нами значення параметрів рівнянь ММ для плодів манго сорту «Камрань» представлені у табл.1. Апробація розробленої математичної моделі проведена нами також з використанням надійних експериментальних даних (Song Y. et.al.,2001) для ягід чорниці (blueberry).

Таблиця 1.
Параметри формули (2) для плодів манго сорту "Камрань"

T, °C	K ₁ (мкг ⁻¹ ·год ⁻¹)	K ₂ (%)	K ₃ (%)
Параметри кривої поглинання O ₂			
13	25,12	0,3	3,72
14	27,84	0,42	4,01
24,6	79,3	9,2	10,4
Параметри кривої виділення CO ₂			
13	11,42	0,42	28,7
14	13,3	0,5	30
24,6	63,82	2,98	46,99

Окремі результати прогнозування та апробації представлені для плодів манго на рис.1 та в табл.2, а для ягід чорниці на рис. 2,3.

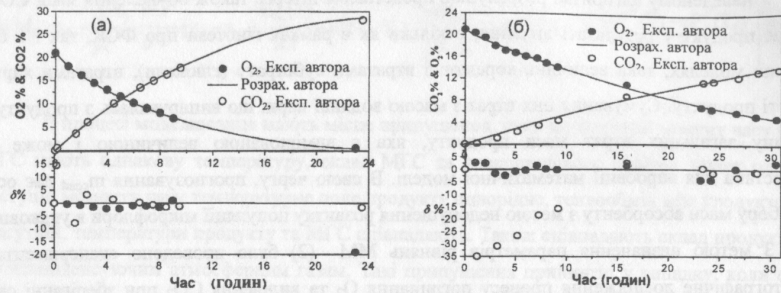


Рис.1 Розрахункові значення концентрацій O₂ і CO₂ у порівнянні з експериментальними даними автора для плодів манго сорту Камрань : а) T=24,6°С, V=894 мл, m_{пр}= 414 гр; б) T=14°С, V=922 мл; m_{пр}= 385 гр.

Таблиця 2.

Результати прогнозування втрат маси плодів манго в упаковці з МГС і на відкритому повітрі у порівнянні з експериментальними даними

Умови збереження манго в МГС				Загальні втрати маси манго, (%)			δ, %
Термін лнів	T, °С	Плівка	Товщина плівки, мкм	Метод	Розрахунок	Експ. дані (Hung C.V., 2006)	
13	25	PEmpC H	41	ізобарно-ізоент. гіпотеза	2,195	2,40	-8,54
				град., Q _{сух} + Q _{вол}	2,960	2,40	23,33
30	13	PEmpS X	34	ізобарно-ізоент. гіпотеза	2,068	2,45	-15,59
				град., Q _{сух} + Q _{вол}	3,135	2,45	27,96
13	25	На відкритому повітрі		ізобарно-ізоент. гіпотеза	13,47	12,24	10
30	13	На відкритому повітрі		ізобарно-ізоент. гіпотеза	10,89	12,88	-15,45

Одержані результати свідчать про адекватність розробленої математичної моделі експериментальним даним для манго та чорниці, про достовірність одержаних наукових результатів, що сформульовано вище, їх наукову новизну та про можливість використання розробленої моделі для вирішення задач подовження термінів зберігання плодів та овочів свіжозібраного урожаю.

Третій розділ роботи присвячено експериментально-теоретичному дослідженню теплофізичних властивостей м'якоті манго в широкому діапазоні температур. На лабораторному стенді методом ядерного магнітного резонансу (ЯМР) одержано дані для рівноважної масової частки вимороженої води ω(T) у плодах манго при температурах до мінус 45 °С, а методами

низькотемпературної скануючої калориметрії встановлено, що фазові перетворення «склована вода – рідинна вода – кристалічний лід» при розморожуванні м'якоті манго протікають при

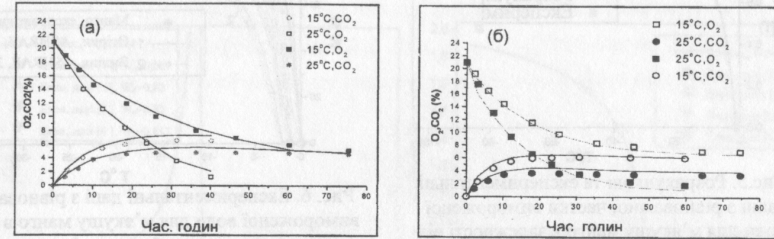


Рис.2. Розрахункові значення концентрацій O₂ і CO₂ у порівнянні з експериментальними даними [Song Y. et al., 2001] для ягід чорниці при T₀= 15 і 25 °С : а) m_{пр}= 200 г, V_{ін}= 492 мл, Orega-плівка ; б) m_{пр}= 250 г, V_{ін}= 413 мл, Clean-Plas-пленка.

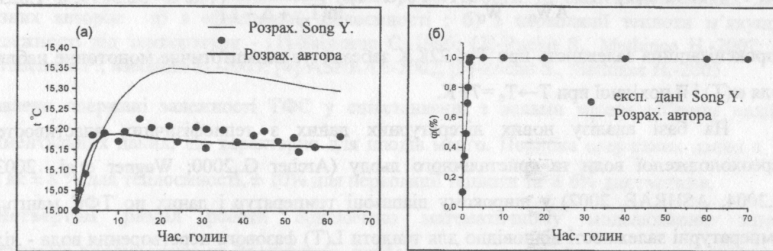


Рис. 3. Порівняння розрахункових та експериментальних даних за умов T₀= 15 °С, m_{пр}= 200 г, V_{ін}=550 мол, Clean-Plas-плівка: а) зміна температури продукту + МГС усередині упаковки ; б) зміна відносної вологості МГС усередині упаковки.

температурах мінус 60 – 50 °С. Кріоскопичним методом (термограма замерзання розчину) отримано значення температури початку кристалізації T_{кр} води в манго, що дорівнює мінус1,3 °С при вологовмісті W₀=0.843. Результати експериментальних досліджень методом ЯМР також показали, що значення ω(T) істотно не відрізняються при розморожуванні зразків свіжозамороженого, замороженого при місячному зберіганні в холодильній камері та замороженого при місячному зберіганні в рідкому азоті. На рис 5,6 представлені одержані дані з ω(T) , при цьому на рис.6 в співставленні з масивом літературних даних для ω(T) ряду ягід, плодів, овочів (яблуко, чорниця, морква, огірок, цибуля, персик, груша, слива, малина, шпинат, полуниця, вишня, горох та інші). Динаміка процесу виморожування води в манго найбільш близька до такого процесу у вишні. Апроксимація експериментальних даних з ω(T), що в подальшому дає монотонну залежність похідної dω(T)/dT, проведена нами для діапазону температур від 77 К до T_{кр} :

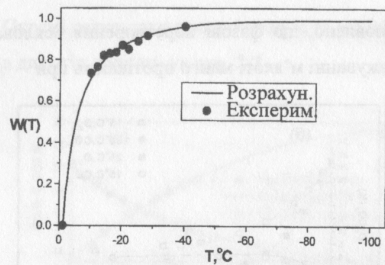


Рис.5. Розрахункові та експериментальні дані з рівноважної частки вимороженої води для м'якшу манго в залежності від температури

при $T_{кр} > T \geq 228 \text{ K}$, $\omega(T) = \frac{a + c \cdot T}{1 + b \cdot T}$, де $a=1.051195108$; $b=-0.00362012$; $c=0.00386679$; (6)

при $T < 228 \text{ K}$ $\omega(T) = 1 + \frac{\alpha}{A W_0} - \frac{1}{W_0} \cdot A = 1 + (\alpha - 1) \frac{\ln(T_{кр} + \Delta - T_c)}{\ln(T_{кр} + \Delta - T)}$, де $\Delta = -32.5879$; $\alpha = 1.02324$.

Апроксимаційна залежність при $T < 228 \text{ K}$ забезпечує асимптотичне монотонне наближення до нуля $\omega(T)$ і її похідної при $T \rightarrow T_c = 77 \text{ K}$.

На базі аналізу нових літературних даних з теплофізичних властивостей (ТФС) переохолодженої води та кристалічного льоду (Archer G., 2000; Wagner et al., 2003; Bischof C., 2004; ASHRAE, 2002) у широкому діапазоні температур і даних по ТФС манго одержано температурні залежності відповідно для теплоти $L(T)$ фазового перетворення вода - лід, питомої ізобарної теплоємності $C_B(T)$, теплопровідності $\lambda_B(T)$, густини $\rho_B(T)$ переохолодженої води та $C_C(T)$, теплопровідності $\lambda_C(T)$, густини $\rho_C(T)$ „сухої” компоненти манго. Відповідно з використанням масових часток W_B води, $W_L = W_0 \cdot \omega(T)$ льоду, W_C „сухого” компоненту та $W_I(T)$ нерозчинених газів за співвідношеннями

$$C_c(T) = C_B W_B + C_L W_L + C_C W_C - W_0 \cdot L(T) \frac{d\omega(T)}{dT} \quad (7)$$

$$L(T) = L_0 - \int_T^{273,15} C_B(x) dx + \int_T^{273,15} C_L(x) dx \quad (8)$$

$$i(T) = W_C \int_{T_c}^T C_C(x) dx + W_0 \int_{T_c}^T C_B(x) dx - W_0 \cdot \omega(T) \cdot L(T) + W_0 \cdot L(T_c) \quad (9)$$

$$\frac{1}{\rho(T)} = \frac{W_B}{\rho_B} + \frac{W_L}{\rho_L} + \frac{W_C}{\rho_C} + \frac{W_I}{\rho_I} \quad (10)$$

розраховано та створено таблиці термодинамічних властивостей м'якшу манго у діапазоні температур від мінус 40 °С до 40°С. Відповідно одержано температурну залежність для

провідності теплоти $\lambda(T)$ за перколяційними методиками для гетерогенних систем (Дульнев Г., Новіков В., 1991). Для ентальпії $i(T)$ за нуль відрахунку прийнято температуру $T_c = 77 \text{ K}$. На рис.7

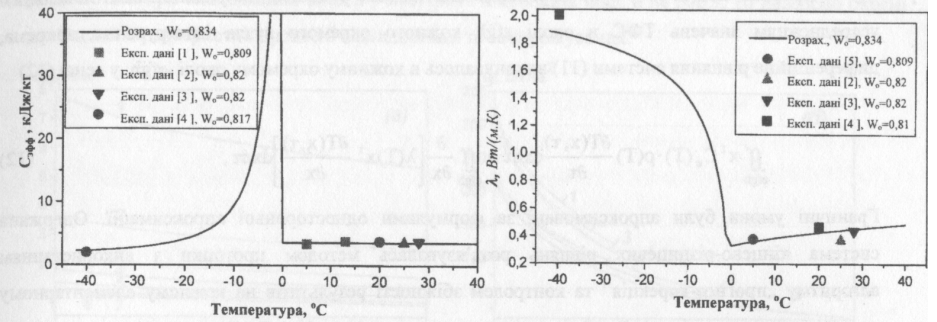


Рис.7. Співставлення розрахункових даних даної роботи та експериментальних даних різних авторів: а) з ефективною теплоємності; б) з перколяції теплоти м'якшу в залежності від температури - [1]-Saiwarun C.-1995; [2]-Rachit S., Methinee H.-2007; [3]-Pirunchana P., Methinee H.-2005; [4]-ASHRAE-2002; [5]-Rachit S., Methinee H.-2005.

представлено одержані залежності ТФС у співставленні з вельми малим об'ємом надійних експериментальних даних, що характерно для плодів манго. Похибка одержаних даних з ТФС оцінена як $\pm 8 \%$ для теплоємності, $\pm 10\%$ для перколяції теплоти та $\pm 6\%$ для густини.

Четвертий розділ роботи присвячено математичному моделюванню процесу заморожування плодів манго та їх м'якшу, розфасованого у контейнери, а також розрахунку характеристик різних режимів реалізації такого процесу в умовах промислового холодильника. Математична модель прийнята у вигляді нелінійної інтерполяційної крайової задачі теплопровідності (Онiщенко В.П., 1989) для тіл неправильної геометричної форми :

$$\begin{cases} C_c(T) \cdot \rho(T) \frac{\partial T(x, \tau)}{\partial \tau} = \frac{1}{x^\Gamma} \cdot \frac{\partial}{\partial x} \left[\lambda(T) \cdot x^\Gamma \frac{\partial T(x, \tau)}{\partial x} \right]; & x \in [0, R], \tau > 0 \\ T(x, 0) = f(x), \\ \frac{\partial T(0, \tau)}{\partial x} = 0, \\ -\lambda[T(R, \tau)] \frac{\partial T(R, \tau)}{\partial x} + \alpha(\tau) \cdot [T_c(\tau) - T(R, \tau)] = 0. \end{cases} \quad (11)$$

Тут інтерполяційним параметром є коефіцієнт геометричної форми об'єкту (плоди манго чи контейнер з м'якшом манго) охолодження $\Gamma = \frac{1}{\Phi} - 1$, $\Phi = \frac{V}{RS}$; як співвідношення між об'ємом V , його характерним розміром R (найменша напівовщина), величина поверхні теплообміну S . Коефіцієнт тепловіддачі $\alpha(\tau)$ та температура $T_c(\tau)$ охолоджуючого середовища змінні у часі

довільним способом, $\alpha(\tau)$ розраховується за формулами Gnielinski V. для тіл довільної геометричної форми з довжиною обтікання в якості характерного розміру.

Крайова задача (11) була апроксимована кінцево-різницевиими рівняннями з локальним усередненням значень ТФС в околі e fgh кожного окремого вузла інтегрування, зокрема, диференційне рівняння системи (11) виконувалось в кожному окремому околі e fgh у сенсі (12)

$$\iint_{efgh} x^r C_e(T) \cdot \rho(T) \frac{\partial T(x, \tau)}{\partial \tau} dx d\tau \approx \iint_{efgh} \frac{\partial}{\partial x} \left[\lambda(T) x^r \frac{\partial T(x, \tau)}{\partial x} \right] dx d\tau, \quad (12)$$

Граничні умови були апроксимовані за формулами односторонньої апроксимації. Одержана система кінцево-різницевих рівнянь розв'язувалась методом прогонки з використанням алгоритму „прогноз-корекція” та контролем збіжності результатів на кожному елементарному кроці інтегрування в часі. Розв'язок давав температурні профілі $T_{ij}=T(x_i, \tau_j)$ у i, j – тих вузлах інтегрування, а за формулами

$$E(\tau_j) = \frac{\Gamma+1}{R} \int_0^R x^\Gamma E(x, \tau_j) dx, \quad E(T_c) = E(\tau_j).$$

контролювались середньооб'ємна ентальпія $E(\tau_j)$ та середньомасова температура $T_c(\tau_j)$ об'єкту в кожний момент τ_j часу процесу охолодження (заморожування). Коефіцієнт геометричної форми плодів манго за результатами геометричних вимірювань становив значення для в'єтнамських і

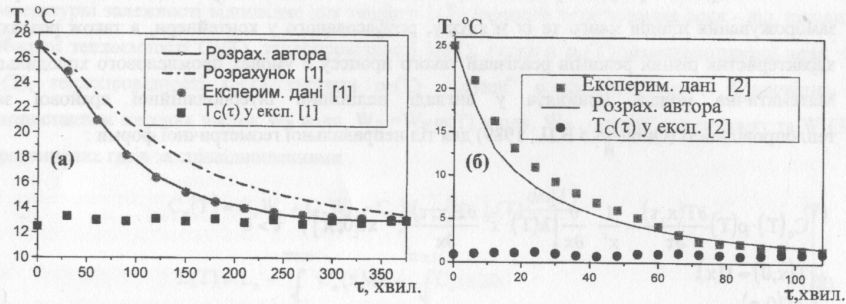


Рис.8. Співставлення розрахункових та експериментальних даних зі змін температур плодів манго : а) на глибині 3 см під час його охолодження за умов досліді [1-Rachit S., Methinee H., 2005, ($V \approx 1$ м/с , $R=0,039$ м, $\Gamma=1,4$)]; б) на глибині 1 см під час його охолодження у воді за умов досліді [2- Barbara T., Theo K., Luis C., 2004, ($V \approx 0,1$ м/с, $R=0,0415$ м, $\Gamma=1,6$)];

тайських манго $\Gamma = 1,35-1,45$, а для бразильських манго $\Gamma = 1,6$. Для окремих кусків м'якушу манго (форма типу рибної) приймали $\Gamma \approx 1.1$, а при заморожуванні в поліетиленових контейнерах у формі паралелепіпеду приймали $\Gamma \approx 0.5$. Дана методика розрахунку температурних полів, теплових потоків, тривалостей процесу, досягнутих значень середньомасових температур

апробована на багатьох видах продуктів різної геометричної форми. Задовільні результати апробації мають місце і для плодів манго. На рис.8 представлено співставлення температур, що досягаються при охолодженні плодів у повітрі та в холодній воді, а на рис.9, 10 наведено окремі дані щодо характеристик процесів охолодження та заморожування.

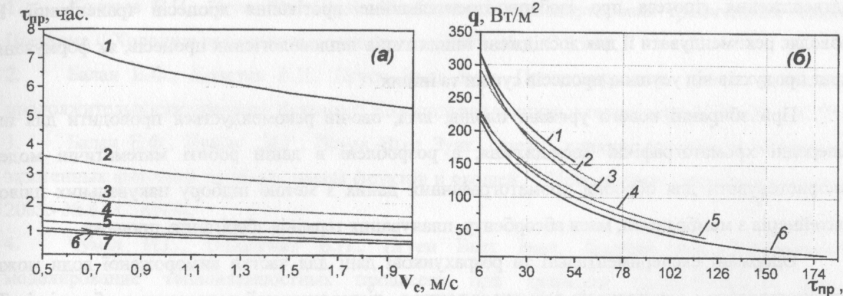


Рис. 9. Характеристики процесу охолодження плодів манго у повітрі : а) залежність тривалості процесу від швидкості повітря при різних його температурах (крива 1 - 13°C; 2 - 12°C; 3 - 10°C; 4 - 8°C; 5 - 5°C; 6 - 2°C; 7 - 0°C); б) Зміни значень теплового потоку в часі для різних режимів охолодження (крива 1 - $T=0^\circ\text{C}$, $V=0.5$ м/с; 2 - $T=2^\circ\text{C}$, $V=0.5$ м/с; 3 - $T=5^\circ\text{C}$, $V=1$ м/с; 4 - $T=8^\circ\text{C}$, $V=0.5$ м/с; 5 - $T=10^\circ\text{C}$, $V=0.8$ м/с; 6 - $T=12^\circ\text{C}$, $V=1$ м/с).

На підставі одержаних даних щодо характеристик та режимів охолодження і заморожування розроблено технологічні рекомендації щодо їх реалізації у промислових умовах, щодо їх використання при проектуванні відповідних технічних охолоджуючих систем.

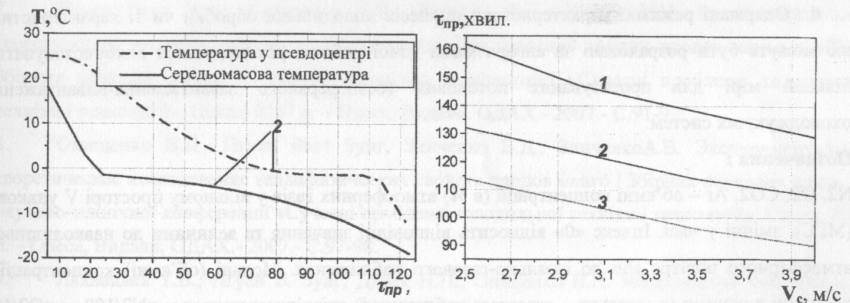


Рис.10. Розрахункові зміни температур в часі та тривалостей процесів заморожування для різних режимів (крива 1 - $T=-40^\circ\text{C}$, $V=3$ м/с; 2 - $T=-35^\circ\text{C}$, $V=3$ м/с; 3 - $T=-30^\circ\text{C}$, $V=4$ м/с)

ВИСНОВКИ ТА РЕЗУЛЬТАТИ

У дисертації розроблено базу даних, апробовані математичні моделі процесів респірації, транспірації плодів манго у МГС, процесів охолодження та заморожування плодів та м'якоти манго у контейнерах, розроблено комп'ютерні програми, одержано експериментальні дані та

таблиці теплофізичних властивостей манго, одержано характеристики режимів їх охолодження та заморожування, які рекомендуються для впровадження при реалізації розроблених технологій для збереження свіжозібраного урожаю. Конкретно можна виділити таке :

1. На прикладі процесів респірації та транспірації плодів манго у МГС одержала підтвердження гіпотеза про ізобарно-ізоентальпійне протікання процесів транспірації. Це дозволяє рекомендувати її для досліджень інших типів тепловологісних процесів, як формування втрат продуктів від усушки, процесів сушки та інших.
2. При збиранні нового урожаю плодів, ягід, овочів рекомендується проводити для них попередні хроматографічні дослідження, а розроблені в даній роботі математичні моделі використовувати для обробки хроматографічних даних з метою підбору пакувальних плівок, контейнерів з мембранами, маси абсорбенту, планування термінів зберігання, продажу.
3. Одержані експериментальні та розрахункові дані для частки вимороженої води можна використовувати і для процесів розморожування з „гістерезисною” поправкою в області від $T_{кр}$ до $0^{\circ}C$. Відповідно це відноситься і до даних щодо теплофізичних властивостей у процесах „заморожування” та „розморожування”.
4. Розроблена методика моделювання ТФС м'якшу манго в широкому діапазоні температур може бути використана для інших сортів манго чи інших плодів, овочів (з іншим початковим вологовмістом W_0).
5. Загальну тривалість процесів заморожування рекомендується визначати тільки як час досягнення наперед заданого значення середньомасової температури.
6. Одержані режимні характеристики процесів холодильної обробки чи ті характеристики, що можуть бути розраховані за алгоритмами даної роботи, рекомендується використовувати в більшій мірі для проектування потокових (безперервного завантаження-вивантаження) охолоджуючих систем.

Позначення :

N_2 , O_2 , CO_2 , Ar – об'ємні концентрації (в %) атмосферних газів у вільному просторі V упаковки (МГС), змінні у часі. Індекс «0» відносить відповідні значення та величини до навколишнього атмосферного повітря або до ідеально-газового наближення. Мольні (об'ємні) концентрації x_i пов'язані з даними (в ідеально – газовому наближенні) співвідношеннями $x_1=N_2/100$, $x_2=O_2/100$, $x_3=CO_2/100$, $x_4=Ar/100$; $q_R(\tau)$ – інтенсивність виділення теплоти дихання (респірації), Дж/(кг·час); K_1 , мл/(кг·час), K_2 , K_3 - константи Міхаеліса -Ментен в поглинанні O_2 (% O_2), виділенні CO_2 (% CO_2); C_{pr} – питома ізобарна теплоємність продукту; M_{pr} – маса продукту в упаковці; $P''(T)$ – тиск насиченої водяної пари, Па; μ_{H_2O} , μ_i , $i = \overline{1,4}$, μ_m - відповідно молекулярні маси водяної пари, неконденсуючих компонент, позірної молекулярна маса газової суміші; $H_{0i}(T)$, $C_{pi}^0(T)$ $i = \overline{1,4}$, $H_{H_2O}(T)$ – мольні ентальпії та ізобарні теплоємності компонент МГС; $m(\tau)$, $m_{cond}(\tau)$

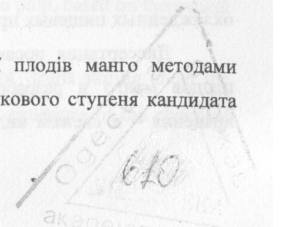
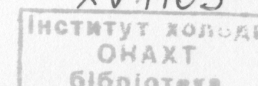
– маси МГС та зконденсованої водяної пари; $L(T)$ – питома теплота фазового перетворення „вода – водяна пара” або „вода – лід”; δ – товщина плівки; h – коефіцієнт теплопередачі через плівку.

Публікації за тематикою дисертації

1. Кочетов В.П., Нгуен Вьет Зунг. Особенности транспортировки тропических плодов из Вьетнама // Холодильная техника и технология - 2005.-№ 4.-С.35-40.
2. Балан Е.Ф., Кочетов В.П., Нгуен Вьет Зунг. Прогнозирование потерь и возможной продолжительности хранения бананов // Холодильная техника и технология-2005.- № 5.-С.75-81.
3. Балан Е.Ф., Чумак И.Г., Нгуен Вьет Зунг. Оценка влияния некоторых эндогенных и экзогенных факторов на убыль массы фруктов и овощей // Холодильная техника и технология.- 2005.- № 6.- С. 67-74.
4. Чумак И.Г., Онищенко В.П., Нгуен Вьет Зунг, Лагутин А.Е. Математическое моделирование тепловлажностных процессов при хранении плодоовощного сырья в модифицированной газовой среде // Холодильная техника и технология – 2007.- №4.- С.51-57.
5. Нгуен В. Зунг, Чумак И.Г. Холодильная технология транспортировки плодов из Вьетнама / Збірник наукових праць міжнародної науково-технічної конференції «Промисловий холод і аміак», Одеса, 2006 р. – Одеса, Видавн. ОДАХ.- 2006.- С.69-70.
6. Онищенко В.П., Чумак И.Г., Нгуен В. Зунг, Драгунов Н.А. Термодинамическое моделирование процессов дыхание – испарение – конденсация в модифицированных газовых средах с фруктами, ягодами, овощами / Збірник наукових праць міжнародної науково-технічної конференції «Промисловий холод і аміак», Одеса, 2006 р.–Одеса, Видав. ОДАХ.- 2006.- С.72-73.
7. Нгуен Вьет Зунг, Онищенко В.П., Лагутин А.Е., Дидык Н.Н. Экспериментально-теоретическое исследование процессов холодильного хранения свежих плодов манго в МГС / Збірник наукових праць VI науково-технічної конференції «Сучасні проблеми холодильної техніки і технології», Одеса, 2007 р. – Одеса, Видавн. ОДАХ.- 2007.- С.91-92.
8. Онищенко В.П., Нгуен Вьет Зунг, Зинченко В.Д., Зинченко А.В. Экспериментально-теоретическое исследование теплофизических свойств плодов манго / Збірник наукових праць VI науково-технічної конференції «Сучасні проблеми холодильної техніки і технології», Одеса, 2007 р. – Одеса, Видавн. ОДАХ.- 2007.- С.97-98.
9. Ляхвацька Т.В., Нгуен В. Зунг, Дідик Н.Н., Онищенко В.П. Математичне моделювання процесів респірації та транспірації ягід і листових овочів в модифікованому газовому середовищі / Збірник наукових праць VII міжвузівської студентської науково-технічної конференції «Еколого-енергетичні проблеми початку XXI століття», Одеса, 2007 р. – Одеса, Видавн. ОДАХ.- 2007.- С.42-43.

АНОТАЦІЯ

Нгуен В'єт Зунг. Розробка процесів холодильної технології плодів манго методами теплофізичного моделювання. – Рукопис. Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата



технічних наук за спеціальністю 05.18.13 „Технологія консервованих і охолоджених харчових продуктів”. Одеська державна академія холоду. – Одеса, 2008.

Дисертація присвячена експериментально-теоретичному дослідженню ряду властивостей плодів манго та розробці процесів двох альтернативних технологій їх холодильного зберігання – у свіжому вигляді, в умовах формування ними модифікованого газового середовища (МГС, індивідуальна упаковка), і процесу заморожування окремих плодів або м'якоти манго, розфасованої у контейнери.

Математична модель процесів респірації та транспірації, що протікають при зберіганні плодів, ягід, овочів в умовах МГС побудована у вигляді диференціальних рівнянь хімічної кінетики з використанням гіпотези про фермент-субстратний комплекс та гіпотези про ізобарно-ізоентальпійне протікання процесу випаровування води (транспірації) з поверхні продукту в МГС. Проведено експериментальне хроматографічне дослідження МГС при зберіганні плодів манго, що дозволило визначити ряд параметрів математичної моделі. Апробація моделі проведена на прикладі плодів манго і ягід чорниці з використанням як своїх, так і експериментальних даних інших авторів.

На лабораторному стенді методом ядерного магнітного резонансу одержано дані для масової частки вимороженої води в плодах манго при температурах до мінус 45 °С, а методами низькотемпературної скануючої калориметрії встановлено, що фазові перетворення «склована вода – рідина вода – кристалічний лід» при розморожуванні м'якоти манго протікають при температурах мінус 60 – 50 °С. Ці та експериментальні дані інших авторів з теплофізичних властивостей переохолодженої води використані для розробки термодинамічних властивостей манго у діапазоні температур мінус 40 °С – плюс 40 °С з аргументованою похибкою.

Математична модель процесів охолодження і заморожування плодів та м'якоти манго сформульована у вигляді нелінійної крайової задачі теплопровідності, алгоритм її розв'язку побудовано на базі її кінцево-різницевої апроксимації. Проведена апробація моделі та багатоваріантні розрахунки режимів охолодження і заморожування плодів манго та їх м'якоти.

Розроблені техніко-технологічні рекомендації для впровадження розроблених технологій у виробництво.

Ключові слова : Манго, Респірація, Транспірація, Охолодження, Заморожування, Теплофізичні властивості.

АННОТАЦИЯ

Нгуен Вьет Зунг. Разработка процессов холодильной технологии плодов манго методами теплофизического моделирования. – Рукопись. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.18.13 – «Технология консервированных и охлажденных пищевых продуктов». Одесская государственная академия холода. – Одесса, 2008.

Диссертация посвящена экспериментально-теоретическому исследованию ряда свойств плодов манго и разработке процессов двух альтернативных технологий их холодильного хранения – в свежем виде, в условиях формирования ими модифицированной газовой среды

(МГС, индивидуальная упаковка), и процесса замораживания отдельных плодов либо мякоти манго, расфасованной в контейнеры.

Математическая модель процессов респирации и транспирации, протекающих при хранении плодов, ягод, овощей в условиях МГС построена в виде дифференциальных уравнений химической кинетики с использованием гипотезы о фермент-субстратном комплексе и гипотезы об изобарно-изоэнтальпийном протекании процесса испарения воды (транспирации) с поверхности продукта в МГС. Проведено экспериментальное хроматографическое исследование дыхания плодов манго при хранении в МГС, позволившее определить ряд параметров математической модели. Апробация модели проведена на примере плодов манго и ягод черники с использованием как своих, так и экспериментальных данных других авторов.

На лабораторном стенде методом ядерного магнитного резонанса получены данные о массовой доле вымороженной воды в плодах манго при температурах до минус 45 °С, а методами низкотемпературной сканирующей калориметрии установлено, что фазовые превращения стеклованная вода – жидкая вода – кристаллический лед при размораживании мякоти манго протекают при температурах минус 60 – 50 °С. Эти и экспериментальные данные других авторов по теплофизическим свойствам переохлажденной воды использованы для разработки термодинамических свойств манго в диапазоне температур минус 40 °С – плюс 40 °С с аргументированной погрешностью.

Математическая модель процессов охлаждения и замораживания плодов и мякоти манго сформулирована в виде нелинейной краевой задачи теплопроводности, алгоритм ее решения построен на базе ее конечно-разностной аппроксимации. Проведена апробация модели и многовариантные расчеты режимов охлаждения и замораживания плодов манго и его мякоти.

Разработаны технико-технологические рекомендации для внедрения разработанных технологий в производство.

Ключевые слова: Манго, Респирация, Транспирация, Охлаждение, Замораживание, Теплофизические свойства.

SUMMARY

Nguyen Viet Dung. Development of technological refrigerating processes for mango fruits by thermo physical modeling methods. - Manuscript. Thesis submitted in fulfillment of the requirements for a candidate of science (engineering) degree by specialty 05.18.13 – «Technology of preserved and cooled foodstuffs». Odessa State Academy of Refrigeration. -Odessa, 2008.

The thesis is aimed to develop the theoretical bases for processes of mango fruit refrigerating storage by two alternative technologies: (1) fresh type under conditions of the modified atmosphere packaging (MAP), and (2) freezing process of separate fruits or canned mango pulp, based on theoretical and experimental study of various properties of the fruit.

The mathematical model of respiration and transpiration processes of fruits storing under the MAP conditions has been composed as set of the simultaneous differential equations of the chemical

kinetics based on assumptions of hypothesis about enzyme-and-substrate reaction complex (a Michaelis-Menten type equation) as well as isobaric-and-isenthalpic proceed of water evaporation process (transpiration) from a product surface under MAP. Parameters applied for modeling actual respiration process in the mango storing under MAP condition have been experimentally determined by the GC (gas chromatograph). The verification of model of respiration-transpiration processes under MAP has been carried out for mangos and blueberries by using own obtained experimental database, as well as referred from other researches.

Experimental data on temperature dependence of the frozen water mass fraction in mango fruits during freezing processes under different temperatures up to a minus 45°C had been received by the nuclear magnetic resonance method carried out in the laboratory of the Institute for Cryobiology and Cryomedicine, Ukraine National Academy of Science, Kharcov, Ukraine. The experimental results showed that there were no significant difference in temperature dependence of the frozen water mass fraction in mango fruits during defrosting processes in 3 cases: (1) fresh fruit defrosted right after freezing, (2) fruit frozen and stored for 1 month in freezer before defrosting, and (3) fruit frozen and stored for 1 month by liquid nitrogen before defrosting. The phase transformations of the system: glass water – supercooled water – crystal ice during defrosting of mango pulp under temperatures of minus 60 - 50°C has been determined using low-temperature scanning differential calorimetric methods. The results showed that the continuation of crystallization as not significant in both cases of storing the fruit in freezers and by liquid nitrogen. These and other experimental data referred from other authors on thermal properties of the supercooled water have been used for developing models of thermodynamic properties of mango within a range of temperatures between minus 40°C - plus 40°C with the argued error. (The errors of prognostication are appraised as $\pm 8\%$ for C_p -Effective thermal specific heat, $\pm 10\%$ for λ -Thermal Conductivity, $\pm 5\%$ for ρ -density).

The mathematical model of cooling and freezing processes of mango fruits and pulp had been developed in the form of a heat conductivity problem with nonlinear boundary condition. The algorithm of the solution is designed on the basis of numerical method with finite-differential approximation. The model verification had been carried out by a multivariable calculation of cooling and freezing conditions of mango fruits and its pulp (Error of temperature field during the mango cooling by air was $\pm 0,5-1,5^\circ\text{C}$, calculation error for freezing time of mango pulp was nearly 7%).

Technological recommendations based on research outcomes for application in food processing industry have been proposed.

Keywords: Mango, Respiration, Transpiration, Cooling, Freezing, Thermal properties.