

Автореферат М  
Р-15

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ОДЕСЬКА ДЕРЖАВНА АКАДЕМІЯ ХОЛОДУ

**РАДІОНЕНКО ВІТАЛІЙ МИКОЛАЙОВИЧ**



УДК 332.66:65.012.27

**УДОСКОНАЛЕННЯ ХОЛОДИЛЬНОГО ЗБЕРІГАННЯ  
ПРОДУКЦІЇ РОСЛИННОГО ПОХОДЖЕННЯ В МОДУЛЯХ З  
МОДИФІКОВАНИМ ГАЗОВИМ СЕРЕДОВИЩЕМ**

Спеціальність 05.18.13 - "Технологія консервованих і охолоджених харчових  
продуктів"

**АВТОРЕФЕРАТ**

дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

Одеса – 2011

Дисертацією є рукопис

Робота виконана в Одеській державній академії холоду Міністерства освіти і науки України

Науковий консультант: доктор технічних наук, професор  
**Мазур Віктор Олександрович**,  
завідувач кафедри технічної термодинаміки  
Одеської державної академії холоду МОН  
України

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор  
**Тележенко Любов Миколаївна**,  
завідувач кафедри технологій харчування та  
ресторанного сервісу Одеської національної  
академії харчових технологій МОН України

кандидат технічних наук, доцент  
**Семенюк Дмитро Павлович**,  
доцент кафедри холодильної та торговельної  
техніки Харківського державного  
університету харчування та торгівлі МОН  
України

xv1317  
ІНСТИТУТ ХОЛОДА  
ОНАХТ  
бібліотека

1

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** Якість і збільшення тривалості термінів зберігання харчової продукції є одними з ключових компонентів продовольчої безпеки. Міжнародні дослідницькі програми, що проводяться Європейським Союзом FP6, FP7, "Eurocoldchain" свідчать про все більш зростаючий інтерес по створенню безперервного холодильного ланцюга для економічно нестабільних країн. Відмітними особливостями рослинної продукції є процеси дихання і прояву характерних змін при зберіганні, починаючи від процесів дозрівання і закінчуючи процесами старіння і псування. В даний час проведено достатньо велике число досліджень, присвячених різним аспектам холодильного зберігання харчових продуктів в контрольованому середовищі, які підтвердили перспективність даної технології для збільшення тривалості термінів зберігання. На відміну від контрольованого середовища (КС), в якій концентрації газів підтримуються постійними впродовж всього терміну зберігання, технології модифікованого середовища (МС) не є такими жорсткими і допускають варіювання концентрацій кисню і вуглекислого газу в самопідтримному режимі. Практичне застосування вказаної технології обмежене великими об'ємами сховищ і необхідністю використання додаткового устаткування для створення відповідного газового середовища. В той же час питанням управління складом газового середовища в камерах холодильного і торговельного обладнання (ХТО), що збільшує терміни зберігання рослинної продукції, не приділяється належної уваги.

В дисертаційній роботі відображені результати вирішення ряду науково-технічних завдань, направлених на підвищення ефективності зберігання рослинної продукції в камерах ХТО на основі модулів з модифікованим газовим середовищем. Серед великого числа вчених, які плідно працювали над науковими проблемами збільшення термінів зберігання рослинної продукції, необхідно виділити фундаментальні роботи Алямовського І.Г., Головкина М.А., Дятлова В.В., Жадана В.З., Загоруйка В.А., Оніщенко В.П., Чумака І.Г., Bentham G., Nikolai B., Cameron A., Cleland D., Kader A., van Lewen J., Evans J. та ін.

Таким чином, тема дисертаційної роботи, в якій важливе місце займають питання розвитку і удосконалення різних підходів до збільшення термінів холодильного зберігання рослинної продукції, є актуальною.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Дисертаційна робота виконувалася відповідно до наукової тематики Донецького національного університету економіки і торгівлі імені Михайла Туган-Барановського і Одеської державної академії холоду МОН України. Її результати були отримані при виконанні науково-дослідних робіт по темах: «Розробка методики і програмного забезпечення для визначення теплопритоку в шафу однокамерних і двокамерних, з верхнім розташуванням низькотемпературного відділення, побутових холодильних приладів виробництва групи «Норд» (0107U001515); «Розробка методики і

Захист дисертації відбудеться « 24 » січня 2011 р. о 14.30 годині в ауд. на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 41.087.01 при Одеській державній академії холоду, за адресою: вул. Дворянська, 1/3, м. Одеса, 65082.

Подача рукопису повинна ознайомитись у бібліотеці ОДАХ за адресою: вул. Одеса, Україна, 65082.

2010 р.

В.І. Мілованов

ОДЕСЬКА ДЕРЖАВНА  
БІБЛІОТЕКА  
АКАДЕМІЯ ХОЛОДУ

програмного забезпечення для визначення теплоприпливів у шафу однокамерних і двокамерних, з нижнім розташуванням низькотемпературного відділення, побутових холодильних приладів виробництва групи «Норд» (0108U00699). У перерахованих наукових дослідженнях автор дисертаційної роботи брав участь як відповідальний виконавець.

**Мета і завдання досліджень.** Мета дослідження полягає в збільшенні термінів зберігання продукції рослинного походження в модулях з модифікованим газовим середовищем в умовах холодильної обробки за рахунок оптимального вибору експлуатаційних характеристик мембран, що забезпечують необхідний склад атмосфери усередині локальних об'ємів.

Для досягнення наміченої мети необхідно було поставити і вирішити наступні основні завдання:

- розробити компактний модуль з модифікованим середовищем, в якому процеси газообміну здійснюються за допомогою полімерних напівпроникних мембран, і встановити їх оптимальні експлуатаційні характеристики, що забезпечують збільшення термінів зберігання рослинної продукції;
- побудувати математичні моделі кінетики процесів деградації показників якості рослинної продукції при холодильному зберіганні в модулях з модифікованим середовищем залежно від часу зберігання і умов навколишнього середовища.
- провести експериментальні дослідження динаміки зміни температурних полів і показників якості рослинної продукції (газового складу  $O_2$ ,  $CO_2$ ,  $N_2$ ; вміст вітаміну С; твердості; вміст етилену в модулі; втрати маси продуктів) в модулях з модифікованим середовищем;
- експериментально дослідити експлуатаційні характеристики мембран, при яких збільшуються терміни зберігання при заданих швидкостях газообміну за рахунок варіювання площі робочої зони, вибору матеріалу і ступеня перфорації;
- побудувати прогностичну модель визначення термінів зберігання рослинної продукції в компактних модулях на основі методу штучних нейронних мереж і встановити взаємозв'язок між цільовою функцією – часом збереження продукту і змінними управління: умовами зберігання і властивостями мембрани;
- розробити підхід до побудови нечіткого узагальненого критерію якості рослинної продукції за наявності багатьох суперечливих показників різного фізичного змісту та різної розмірності, який може служити мірою деградації продуктів при холодильному зберіганні;
- розробити технічні рекомендації по проектуванню компактних модулів для пролонгованого зберігання рослинної продукції в камерах ХТО.

**Об'єктами дослідження** є зразки рослинної продукції - яблука і листя салату, які знаходяться в компактних модулях з модифікованим середовищем в умовах холодильного зберігання.

**Предмет дослідження** – процеси деградації показників якості рослинної продукції при холодильному зберіганні в компактних модулях з модифікованим середовищем.

**Методи досліджень** – комп'ютерне моделювання штучних нейронних мереж для прогнозу експлуатаційних характеристик мембран, методи нечіткої логіки для ухвалення рішень в умовах невизначеності, лабораторні експерименти, порівняння даних чисельного моделювання з результатами експериментальних досліджень.

**Наукова новизна отриманих результатів.** У роботі вперше отримані наступні наукові результати:

- представлено концептуальний дизайн компактного модуля і модифікованим середовищем для ХТО і експлуатаційні характеристики мембран, які забезпечили збільшення термінів зберігання яблук і листя салату в 2 - 3 рази в порівнянні з традиційними засобами зберігання;
- розроблена модель динаміки популяції для опису процесів деградації показників якості рослинної продукції при холодильному зберіганні в компактних модулях з модифікованим середовищем;
- отримані експериментальні дані про динаміку зміни температурних полів і показників якості рослинної продукції в модулях з модифікованим середовищем для різних конфігурацій мембран, які використані при ідентифікації моделей прогнозування термінів зберігання яблук сорту «Ранет Симиренко» і листя салату;
- побудована модель для прогнозу термінів зберігання рослинної продукції в компактних модулях на основі методу штучних нейронних мереж. Як навчальна вибірка використані експериментальні дані про експлуатаційні характеристики мембран із заданою селективною проникністю, що забезпечують задані терміни зберігання для різних площ робочої зони;
- запропоновано нечіткий узагальнений критерій якості рослинної продукції, який єдиним чином об'єднує показники різної природи і служить мірою деградації продуктів при холодильному зберіганні. Для множини локальних показників – узагальнений критерій, що характеризує деградацію продукту за період зберігання, є спадною функцією, яка в кожен момент визначається пересіченням функцій приналежності кожного з показників якості;
- розроблені технічні рекомендації по проектуванню компактних модулів, в яких селективна проникність мембран (відношення коефіцієнтів проникності кисню і вуглекислого газу), вибирається так, щоб забезпечити технологічно допустимі рівні  $CO_2$  і  $O_2$ , збільшуючи терміни зберігання рослинної продукції за рахунок зменшення швидкості респірації, біологічної деградації і росту мікроорганізмів.

**Обґрунтованість і достовірність** наукових положень і результатів визначаються:

- коректною постановкою і перевіркою адекватності теоретичних моделей і експериментальних даних;
- використанням сучасних математичних методів і програмних засобів ідентифікації моделей.

**Практична цінність отриманих результатів.** Запропоновані в дисертаційній роботі моделі і отримані експериментальні дані служать інформаційною базою для проектування компактних модулів для збільшення термінів зберігання рослинної продукції в камерах ХТО і дозволяють:

- на основі штучних нейронних мереж оцінити пролонговані терміни зберігання рослинної продукції;
- рекомендувати проектні рішення по створенню т.з. інтелектуальних модулів для зберігання різних видів продукції.

Розроблені підходи скорочують терміни дорогих експериментальних досліджень, розширюють функціональні можливості нових моделей ХТО та підвищують їх конкурентоспроможність на ринках.

**Особистий внесок здобувача.** У спільних наукових роботах здобувачеві належить постановка завдань чисельного моделювання, аналіз літературних даних, розробка алгоритмів і програм для відновлення параметрів нелінійних моделей з експериментальних даних. Здобувачем обґрунтовано вибір об'єктів дослідження, проведений збір і аналіз експериментальної інформації про фізико-хімічні характеристики об'єктів дослідження; виконані розрахунки збереження рослинної продукції залежно від експлуатаційних характеристик мембран, кінетики деградації якості продуктів в процесі холодильного зберігання і ін.

**Апробація результатів дисертації.** Основні результати досліджень були представлені і обговорювалися: на IV Всеукраїнському науково-технічному семінарі «Вдосконалення малої холодоплетехніки і забезпечення нею технологічних процесів» (Донецьк, 2009); міжнародних науково-технічних конференціях «Сучасні проблеми холодильної техніки і технології» (Одеса, 2006 – 2009); науково-технічній конференції з міжнародною участю «Холодильні агенти на всі часи – Євроочікування і російський досвід» (Санкт Петербург, 2010); 1-й міжнародній науково-технічній конференції, присвяченій 90-річчю національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова (Миколаїв, 2010); Всеукраїнській науково-практичній конференції «Сучасні проблеми техніки та технології харчових виробництв, ресторанного бізнесу та торгівлі», присвяченій 20-річчю з дня заснування факультету обладнання та технічного сервісу Харківського державного університету харчування та торгівлі (Харків, 2010)

**Публікації.** Основний зміст дисертації представлений у 4 статтях, опублікованих в фахових періодичних журналах, що відповідають вимогам ВАК України; 7 робіт представлено у вигляді доповідей і тез доповідей у збірках наукових робіт регіональних і міжнародних конференцій.

**Об'єм і структура дисертації.** Дисертація складається із вступу, чотирьох розділів, основних висновків, списку використаної літератури, що включає 156 джерел, і додатків. У ній міститься 137 сторінок основного тексту, 25 таблиць і 45 рисунків.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтована актуальність теми дисертації, сформульовані мета і завдання дослідження. Визначені наукова новизна і практичне значення отриманих результатів, конкретний особистий внесок автора, відомості про апробацію результатів дисертації та публікації.

**Перший розділ** дисертації присвячений аналізу шляхів збільшення термінів зберігання рослинної продукції в камерах ХТО. У даному розділі обговорюються основні проблеми продовольчої безпеки з погляду холодильних технологій, розглянуті загальні принципи збільшення термінів зберігання рослинної продукції в камерах ХТО, аналізуються основні фактори, що впливають на збереження продукції. Збільшення термінів зберігання вимагає обліку багатьох факторів і не існує універсального вирішення проблеми.

На основі аналізу біохімічних процесів зберігання рослинної продукції за рахунок управління складом газової атмосфери для подальших досліджень вибрана технологія модифікованого газового середовища. Застосування контрольованого газового середовища – спроба уповільнити фізіологічні процеси і мінімізувати мікробну інфекцію для досягнення оптимальної якості і збільшення термінів зберігання фруктів і овочів. Комбінація холодильної технології і технології контрольованого середовища значно розширює терміни зберігання свіжих овочів і фруктів. Сформульована мета дисертаційної роботи, що спрямована на збільшення термінів зберігання рослинної продукції в модулях з модифікованим середовищем у камерах ХТО за рахунок оптимального вибору експлуатаційних характеристик мембран для підтримання необхідного складу газового середовища. Запропоновано концептуальний дизайн модулів з модифікованим середовищем для збільшення термінів зберігання рослинної продукції у камерах ХТО.

Підвищення термінів зберігання рослинної продукції в камерах ХТО є одним з найбільш простих і екологічно безпечних підходів до енергозбереження в елементах холодильного ланцюга. Технологія рівноважного модифікованого середовища для збільшення термінів зберігання вибрана як найкраще рішення, що поєднує економічну ефективність, екологічну безпеку і мінімальні витрати енергії. Розроблено концептуальний дизайн і створені лабораторні зразки модулів з рівноважним модифікованим середовищем для збільшення термінів зберігання яблук і листя салату – характерних представників основних груп рослинної продукції.

Другий розділ присвячений моделюванню процесів холодильного зберігання рослинної продукції в рівноважному модифікованому газовому середовищі. Для глибшого розуміння механізмів метаболічних реакцій і аналізу транспортних процесів, які викликають фізіологічні зміни і деградацію продуктів, аналізуються моделі перенесення газу і вологи в досліджуваних об'єктах. Газовий склад компонентів повітря в модулі з рівноважним модифікованим середовищем (РМС) визначається як баланс між вхідними потоками кисню і двоокису вуглецю, що виходять через мембрану, для даного модуля (рис. 1). Для формулювання математичної моделі розглянутий деякий гомогенний і ізотропний об'єм продукту (м'якоть) –  $V$ , обмежений в просторі поверхнею (шкіркою) нескінченно малої товщини. Процес дифузії кисню, обумовлений градієнтом концентрацій усередині м'якоти, описується класичним рівнянням реакційної дифузії:

$$\frac{\partial}{\partial t} [O_2] = D_{O_2} \nabla^2 [O_2] - V_{O_2}, \quad (1)$$

$$V_{O_2} = \frac{V_{m,O_2,cell}}{(K_{m,O_2,cell} + [O_2]) \left( 1 + \frac{[CO_2]}{K_{m,n,O_2,cell}} \right)}$$

де  $D_{O_2}$  – коефіцієнт дифузії кисню в тканинах продукту,  $V_{O_2}$  – інтенсивність споживання кисню,  $V_{m,O_2,cell}$  – максимальна клітинна інтенсивність споживання кисню,  $K_{m,O_2,cell}$  – константа Міхаеліса – Ментен для заданого продукту,  $K_{m,n,O_2,cell}$  – константа Міхаеліса – Ментен, що оцінює вплив  $CO_2$  на споживання кисню,  $[O_2]$ ,  $[CO_2]$  – концентрації кисню і двоокису вуглецю, відповідно.

Рівняння (1) з заданими початковими і граничними умовами, визначає математичну модель кисневого обміну.

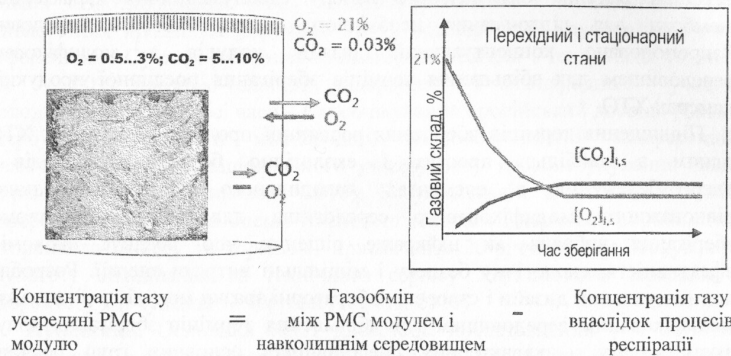


Рис. 1. Баланс газових потоків у модулі РМС

Для моделювання процесів газообміну для двоокису вуглецю приймали аналогічний підхід:

$$\frac{\partial}{\partial t} [CO_2] = D_{CO_2} \nabla^2 [CO_2] + R_{Q_{cell}} V_{O_2} + V_{CO_2}, \quad (2)$$

$$V_{CO_2} = \frac{V_{m,f,CO_2,cell}}{1 + \frac{[O_2]}{K_{m,f,O_2,cell}}}$$

де  $D_{CO_2}$  – коефіцієнт дифузії вуглекислого газу в тканинах продукту,  $R_{Q_{cell}}$  – частка збільшення концентрації  $CO_2$  за рахунок поглинання  $O_2$  тканинами,  $V_{CO_2}$  – інтенсивність виділення вуглекислого газу,  $V_{m,f,CO_2,cell}$  – максимальна клітинна інтенсивність виробництва  $CO_2$ ,  $K_{m,f,CO_2,cell}$  – константа Міхаеліса – Ментен для заданого продукту, що інгібує виробництво вуглекислого газу.

Рівняння (2) сумісне з початковими і граничними умовами визначає математичну модель газообміну вуглекислого газу. Система рівнянь (1) і (2) з відповідними початковими і граничними умовами повністю описує газообмінні процеси в дихаючому продукті. Параметри  $R_{Q_{cell}}$  і коефіцієнти дифузії теоретично важко піддаються визначенню і їх знаходження пов'язане з експериментальними дослідженнями для перевірки адекватності моделі.

Моделювання умов газообміну в модулях з мембранами дозволяє оцінити вплив різних факторів, наприклад, зміни температури, на газовий склад. Докладні моделі, що враховують процеси дифузії, виявляються значно ускладненими і вимагають значного часу обчислень. У роботі розглянуті простіші моделі газообміну без урахування дифузійних процесів. Калібрування параметрів моделей дозволяє виконати оцінку стану середовища в модулі при зміні параметрів мембрани. Значення параметрів, що описують інтенсивність респірації залежать від температури і концентрації складових газового середовища, для модельних розрахунків узяті за даними робіт Iammertyn et al (2003, 2005).

Не дивлячись на те, що розглянуті вище моделі правильно описують процеси газообміну, проектування РМС модулів вимагає розробки підходів, які би базувалися на експериментальній інформації і враховували різноманіття факторів, що впливають на збільшення термінів зберігання. Для досягнення вказаної мети в роботі розроблена нейромережева модель прогнозу термінів зберігання, де вхідними змінними служать умови зберігання і технологічні властивості мембрани. Для оптимального вибору мембран для РМС розглянуто дві категорії продуктів (А і В), які розрізняються наявністю/відсутністю респіраційних властивостей. Перша група ділиться на 4 підгрупи залежно від складу кисню і вуглекислого газу, необхідних для збільшення тривалості термінів зберігання. Підгрупа А1 не

вимагає певного змісту  $\text{CO}_2$  і  $\text{O}_2$ ; підгрупа А2, в яку входять, в основному, овочі, вимагає невеликий зміст кисню (1-5%) за відсутності  $\text{CO}_2$ . Підгрупа А3 (в основному фрукти і деякі овочі) вимагає збалансованої кількості обох газів (1-5%  $\text{O}_2$  і 0-5  $\text{CO}_2$ ); підгрупа А4 вимагає відносно високі концентрації  $\text{CO}_2 > 5\%$ . До групи В відносяться такі продукти, як м'ясо, риба і тому подібні.

У роботі запропонована математична модель, що використовує штучні нейронні мережі, для прогнозування термінів зберігання залежно від характеристик мембрани, типу продукції і умов зберігання для групи А. Час зберігання рослинної продукції (Shelf life) (SL) представлено у вигляді функції від змінних, що характеризують умови зберігання і специфікацію мембран:

$$SL = SL(X_1, X_2, \dots, X_8) \quad (3)$$

де  $X_1$  – інтенсивність дихання,  $X_2$  – об'єм модуля,  $X_3$  – температура,  $X_4$  – відносна вологість,  $X_5$  – інтенсивність перенесення кисню,  $X_6$  – селективна проникність мембрани,  $X_7$  – товщина мембрани,  $X_8$  – робочий діаметр мембрани.

Як навчальну вибірку вибрано результати експериментальних досліджень по збільшенню термінів зберігання рослинної продукції (яблука, листовий салат). Програма розрахунку SL реалізована в середовищі МАТЛАБ для продуктів групи А і може бути рекомендована для практичного застосування. Області застосовності моделі при виборі необхідної мембрани, що забезпечує задані терміни зберігання яблук в РМС, обмежені наступними значеннями параметрів.

Умови зберігання

- Інтенсивність дихання = 5...20 міліграм  $\text{CO}_2$ /кг/год
- Температура = 0...7 °C
- Відносна вологість = 30...95 %
- Об'єм модуля = 10...30 л

Специфікація мембрани

- Інтенсивність перенесення кисню =  $5.10 \times 10^3 \text{ см}^3/\text{м}^2 \text{ доба}$
- Селективна проникальність = 0...2.5
- Товщина мембрани = 0,02...0,15 мм
- Робочий діаметр мембрани = 20...50 мм

Основні показники полімерних мембран, які були використані в експериментах (напівпроникна мембрана марки СИМА – фірми НВО «ТЕХНОФІЛЬТР»: діаметр робочої зони –  $23,0 \pm 0,5$  мм; товщина мембрани –  $0,120 \pm 0,02$  мм; площа мембрани –  $4,15 \text{ см}^2$ . Визначення термінів зберігання яблук при холодильному зберіганні проводили для трьох альтернативних варіантів:

- ізолюваний модуль: розміщення яблук в герметичному модулі з пластмаси (із закритою кришкою);
- модуль з мембраною: розміщення яблук в герметичній місткості з селективною вставкою;
- відкритий модуль - розміщення яблук в модулі з пластмаси з відкритою кришкою.

Оцінка впливу різних факторів на терміни зберігання показує, що підтримка температурного режиму є більш істотною в порівнянні з регулюванням середовища усередині модуля. Збільшення термінів зберігання рослинної продукції в 2 рази вимагає, щоб концентрації кисню і двооксиду вуглецю знаходилися в межах, приведених в таблиці. 1. Розроблена модель прогнозу термінів зберігання рослинної продукції базується на методі штучних нейронних мереж, за допомогою якого встановлений взаємозв'язок між цільовою функцією – часом збереження продукту і змінними управління: умовами зберігання і властивостями мембрани. На рис. 2 показано результати нейромережевого прогнозу терміну зберігання яблук.



Рис. 2. Термін зберігання яблук в РМС модулі в залежності від температури та відносної вологості ( $\phi$ )

Різноманіття суперечливих умов, які пред'являються до оптимальних концентрацій кисню і двооксиду вуглецю для збільшення термінів зберігання різних видів продукції у камерах ХТО, дозволяє зробити висновок про відсутність універсального матеріалу мембрани. Тому для кожного з продуктів вибір мембрани має бути зроблений індивідуально. Вирішення

вказаної проблеми відкриває можливість створення т.з. «інтелектуальних» модулів для зберігання різних видів продукції.

Таблиця 1  
Бажані і реальні концентрації  $O_2$  і  $CO_2$  в РМС

Рослинна продукція	$O_2$ %	$CO_2$ %
Яблука - Мета	2 – 3	1 -2
Реальна мембрана	3.2	1.6
Листовий салат – Мета	0.5 – 3	10 – 15
Реальна мембрана	2.9	11

У **третьому розділі** приведені результати експериментальних досліджень показників якості рослинної продукції в модулях з модифікованим середовищем, що створюється за рахунок селективної проникальності полімерних мембран. Розглянутий компактний модуль з напівпроникальними мембранами, в якому відбувається саморегульований газообмін між модифікованим газовим середовищем усередині обмеженого об'єму і повітряним середовищем камери ХТО. Оцінка ефективності роботи модуля аналізується на основі експериментальних даних про динаміку змін показників якості яблук і листя салату (зміст вітаміну С, твердість) і складу газового середовища (вміст етилену,  $CO_2$ ,  $O_2$  і  $N_2$ ) в процесі зберігання.

Зберігання яблук в модулях з модифікованим середовищем дає можливість уповільнити процеси дозрівання і продовжити терміни зберігання без зниження товарних якостей. Підвищення вмісту  $CO_2$  і зниження  $O_2$  уповільнює процеси життєдіяльності, запобігаючи фізіологічним розладам (потемніння м'якоти і ін.). При зберіганні яблук виділяється певна кількість етилену, накопичення якого негативно впливає на збереження. Як початкову продукцію вибирали яблука сорту «Ранет Симиренко», сертифіковані після збирання врожаю. Первинна якість продукту і докладна динаміка візуального моніторингу надані в Додатку до дисертації.

Температуру рослинної продукції підтримували постійною впродовж всього періоду зберігання. Для деяких видів рослинної продукції коливання  $\pm 1^\circ C$  можуть привести до серйозних зрушень у термінах зберігання. З цієї причини плановані умови не допускали температурні відхилення більш одного градуса при можливих флуктуаціях не більш  $0.5^\circ C$ . Температурні вимірювання проводили у різних місцях холодильної камери для отримання репрезентативної середньої температури зберігання. На рис. 3 приведені

типові температурні коливання для моделі холодильника LG R – K182SR при температурі зовнішнього середовища  $21^\circ C$ .

Концентрацію кисню і вуглекислого газу визначали на газовому хроматографі ЦВЕТ 5000 фірми Iceblick. Точність визначення складу не перевищувала  $\pm 0,5\%$ . Оптимальний режим для збереження товарної якості яблук «Ранет Симиренко»:

- температура повітря  $t = (0 \dots -1)^\circ C$  ;
- відносна вологість повітря  $\phi = (90 \dots 95)\%$ .



Рис. 3. Коливання температури незавантаженого модуля РМС у верхній частині холодильної камери  
(1, 2, 3, 4 – результати вимірювання температури в різних точках простору камери)

У роботі розглядали три альтернативні методи зберігання, для яких досліджували динаміку різних показників.

*Зберігання у відкритому модулі.*

Газове середовище – атмосферне повітря. Теплота видаляється за рахунок охолодження і вентиляції.

*Зберігання в модулі РМС.*

Газове середовище – рівноважне модифіковане середовище з саморегульованим газовим середовищем  $O_2 + CO_2 + N_2$ , де теплота відводиться за рахунок охолодження і вентиляції. Газообмін здійснюється за допомогою мембрани СИМА, розробленою компанією Технофільтр (м. Владимир, Росія). Основні показники полімерних мембран, які були використані в експериментах: діаметр робочої зони -  $23.0 \pm 0.5$  мм; товщина

мембрани –  $0.120 \pm 0.020$  мм; площа мембрани –  $4.15 \text{ см}^2$ ; капілярний діаметр мембрани – 5.25 мм.

*Зберігання в ізолюваному модулі.*

Газове середовище – суміш  $\text{O}_2 + \text{CO}_2 + \text{N}_2$ .

Результати вимірювань газового складу приведені на рис. 4, 5.

Характерна картина зміни концентрації етилену при різних варіантах зберігання яблук приведена на рис. 4. Динаміка зміни газового складу модифікованого середовища показана на рис. 5.

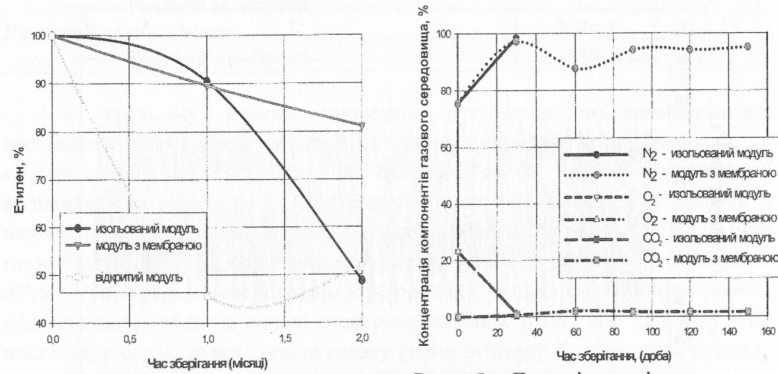


Рис. 4. Зниження концентрації етилену в різних конфігураціях модулів

Типове зниження вмісту вітаміну С в процесі зберігання яблук в модулі модифікованого середовища показує наступну картину. Різне падіння вмісту вітаміну С спостерігалось в перші два місяці практично незалежно від технології зберігання. Надалі темпи зменшення даного показника якості для модуля з мембраною сповільнюються і залишаються практично незмінними до закінчення термінів зберігання.

Визначення такого показника як твердість багату в чому є суб'єктивною і залежить від кваліфікації персоналу, що проводить вимірювання. Даний показник характеризує опір пластичної деформації. Результати вимірювань твердості показують, що зберігання яблук в модулях із мембраною є ефективнішим в порівнянні з іншими методами при однакових умовах зберігання.

Отримані дані відповідають загальній картині зменшення вмісту вітаміну С в яблуках і практично ідентичні для всіх умов зберігання. На пізніших

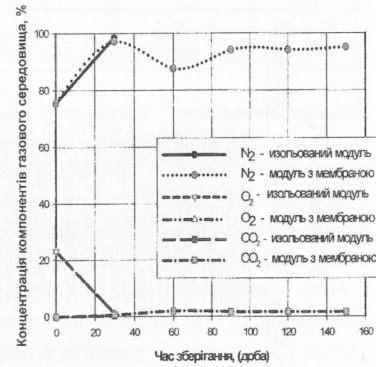


Рис. 5. Динаміка зміни газового складу рівноважної модифікованого середовища

стадіях зберігання перевага застосування мембран виражається наступними величинами: відкритий модуль гірше за модуль з мембраною на 20%, ізолюваний модуль в порівнянні з мембраною гірше на 9%.

У таблиці 2 представлені дані вимірювань динаміки втрат маси за період зберігання. Для додаткової перевірки якості яблук були проведені вимірювання сухих речовин.

Таблиця 2

Втрати маси при зберіганні яблук за різних умов

Період зберігання, місяці (Холодильне зберігання + час після збору урожаю)	Втрати маси, %		
	I Відкр. модуль	II Мембрана	III Ізолюв. модуль
лютий + 4	0	0	0
березень + 5	0,67	<b>0.08</b>	0,2
квітень + 6	1,34	<b>0.18</b>	0,5
травень + 7	-	<b>0.23</b>	-

Експериментальне дослідження процесів зберігання листя салату в камерах ХТО проводили за аналогічною схемою. Листя салату – продукт, що швидко псується і терміни зберігання визначаються процесами дегідратації. Тому втрати води є критичними для гальмування процесів деградації.

У роботі досліджували різні конфігурації модулів РМС з різними діаметрами мембран. Розглянуто 4 варіанти діаметру мембрани: ізолюваний модуль (нульовий діаметр мембрани); одна мембрана; 2 мембрани і  $\frac{1}{2}$  мембрани. Вимірювання проводили через 0, 3, 5, 10, 20, 30 днів (аж до псування)

Візуалізація початкового стану листя салату і подальша еволюція якості представлені у Додатку до дисертації. Середня вага закладки дорівнювала  $811 \pm 5$  г. Органолептичні показники після 4-х тижнів показали, що найгірші показники (зокрема, повне в'янення) спостерігаються в ізолюваному модулі. Рейтинг якості листя салату після одного місяця зберігання виглядає таким чином.

$D = \text{число поживного листя} / \text{загальне число листя}, \%$

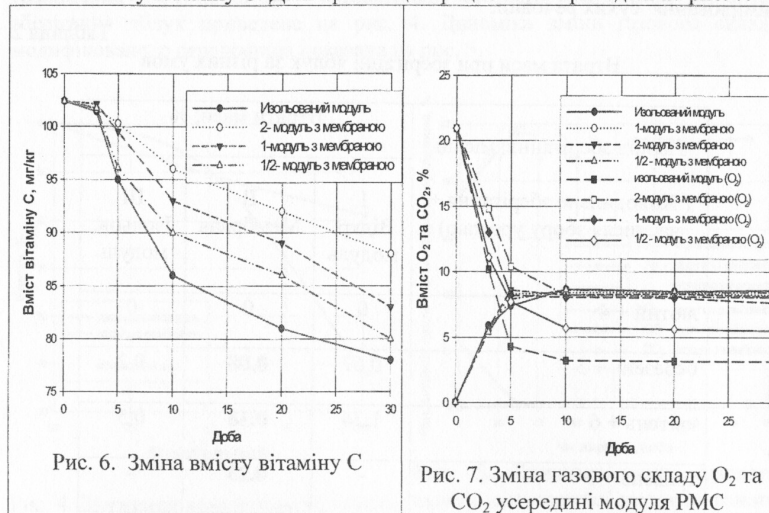
$D = 95\%$  – ізолюваний модуль

$D = 90\%$  – модуль РМС з  $\frac{1}{2}$  мембрани

$D = 85\%$  – модуль РМС з 1 мембраною

$D = 60 \dots 70\%$  – модуль РМС з 2 мембранами

Визначення кольору листя салату проводили по методу Хантера. Вимірювання температури проводили по тій же схемі, що й для яблук. Початковий вміст вітаміну С = 102,4 міліграм/кг. На рис. 6 показана динаміка зміни вмісту вітаміну С. Дані про концентрацію газів приведені на рис. 7.



Отримані експериментальні дані дозволили ідентифікувати математичні моделі газообміну. Уточнені параметри моделі дорівнюють:

$$Km = 8.3 \cdot 10^{-6} \text{ c}^{-1}, D_{O_2} = 2.9 \cdot 10^{-9} \text{ м}^2/\text{c}, D_{CO_2} = 3.2 \cdot 10^{-9} \text{ м}^2/\text{c}$$

$$\alpha = 2.9 \cdot 10^{-10} \text{ м/с}, \beta = 2.2 \cdot 10^{-10} \text{ м/с}.$$

Програма ідентифікації моделі реалізована в програмному середовищі МАТЛАБ. На рис. 8 представлені результати зіставлення експериментальних даних і моделі газообміну. Спостереження, які проводили протягом 150 днів виявили, що якість яблук зберігається при використанні як засіб управління складом середовища напівпроникних мембран, які збільшують тривалість терміну зберігання у 2 – 3 рази.

Для збільшення тривалості термінів зберігання рослинної продукції за рахунок зменшення швидкості респірації, біологічної деградації і зростання багатьох мікроорганізмів селективна проникність мембран (відношення коефіцієнтів проникності кисню і вуглекислого газу) в модулях з

модифікованим середовищем, має бути вибрана так, щоб забезпечити технологічно допустимі рівні  $CO_2$  і  $O_2$ . Управління експлуатаційними характеристиками мембран з метою збільшення швидкостей газообміну може

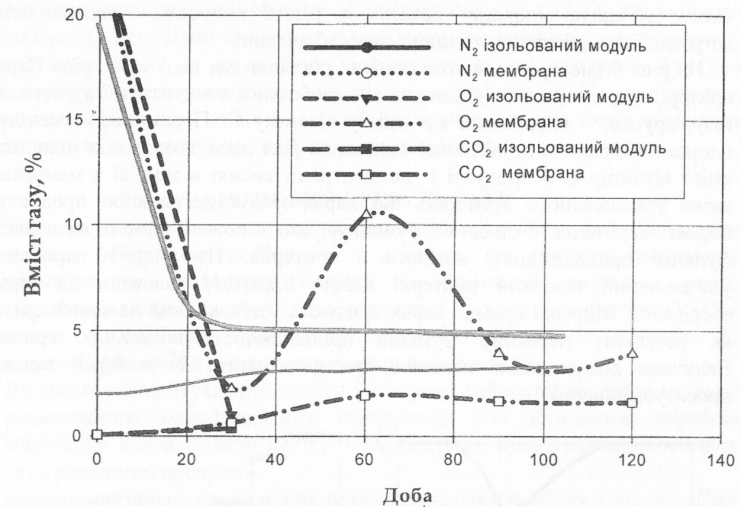


Рис. 8. Зіставлення моделі газообміну з експериментальними даними (суцільні лінії – модель)

бути досягнуте за рахунок варіювання площі робочої зони, вибору матеріалу і ступеня перфорації.

**Четвертий розділ** присвячений розробці нечітких узагальнених критеріїв якості рослинної продукції. Для узагальненої характеристики якості продукції необхідно враховувати множину показників  $K_i$  якості продукції, які мають різні розмірності, фізичний зміст і діапазон зміни параметрів. Просте усереднювання таких показників не має сенсу і необхідно використовувати методи багатокритеріального аналізу для побудови узагальнених критеріїв. У даній роботі пропонується наступна послідовність кроків прийняття рішення.

- Визначення області компромісу –  $X_p$ , в якій досягається узгоджене вирішення конфлікту між критеріями з протилежними інтересами;
- Представлення критеріїв і обмежень у формі нечітких множин для відображення неструктурованих ситуацій (т.з. процедура «розмивання» критеріїв);

- Неформальний вибір схеми згортки для переходу від векторного критерію  $K[K_1(X), K_2(X), \dots, K_M(X)]$  до скалярного узагальненого критерію якості  $K_Q(X)$ ;
- Оцінка остаточного вектора  $X_{Qopt}$  що мінімізує нечіткі джерела невизначеності.

Нечіткий узагальнений критерій якості рослинної продукції, який єдиним чином об'єднує множини показників різної природи і служить мірою деградації продуктів при холодильному зберіганні.

На рис. 9 ілюструється компромісне рішення для двох критеріїв. Перший критерій характеризує відхилення від необхідної концентрації вуглекислого газу, другий, – відхилення від вмісту вітаміну С. Перемінна управління – площа мембрани в приведених одиницях. Для двох показників (наприклад, вміст вітаміну С в продукті і концентрації кисню в модулі з мембраною) зміна узагальненого критерію, що характеризує деградацію продукту за період зберігання, є спадною функцією, яка в кожен момент визначається функцій приналежності кожного з критеріїв. На рис. 10 приведений узагальнений нечіткий критерій якості  $R(t) \in [0, 1]$  залежно від терміну зберігання. Відрізки прямих характеризують узагальнений нечіткий критерій як результат перетину функцій приналежності локальних критеріїв. Величина допустимого значення критерію якості  $R^* = R(\tau_0, t)$  задається проектувальником.

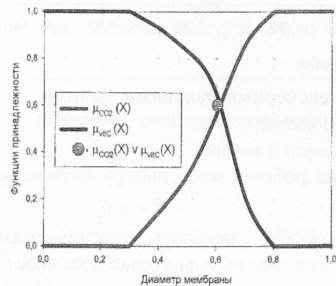


Рис 9. Компромісне рішення для нечітких функцій приналежності

Поєднання методів рівноважного модифікованого середовища і холодильного зберігання істотно уповільнює такі фізіологічні процеси, як респірація, дозрівання і псування, а також знижує мікробіологічне забруднення. Модулі РМС не є універсальними і повинні задовольняти специфічним вимогам для кожного виду продукції. Для вибору оптимальної

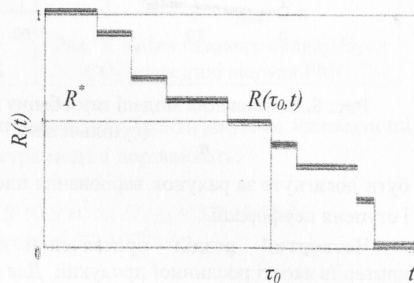


Рис. 10. Поведінка узагальненого критерію якості для нечітких критеріїв впродовж терміну зберігання  $t$ . ( $R(\tau_0, t)$  – допустима якість продукції)

xv1317

ІНСТИТУТ ХОЛОДА  
ОНАХТ  
БІБЛІОТЕКА

мембрани виділено дві групи продуктів, які, у свою чергу, розбито на підгрупи.

Для збільшення термінів зберігання рослинної продукції при холодильній обробці в умовах модифікованого середовища дані наступні рекомендації. Оскільки досягнення рівноважного модифікованого середовища залежить від інтенсивності дихання, маси продукту, площі поверхні мембран, їх товщини, виборчій проникності (співвідношення  $\text{CO}_2/\text{O}_2$  коефіцієнтів проникності), необхідно проектувати мембрану для кожного виду продукції. Застосування РМС не може бути узагальнене на всі продукти. Так для томатів, лука, часнику контрольоване газове середовище не збільшує терміни зберігання. Для інших видів продукції, ця технологія теж може виявитися непридатною із-за дуже коротких термінів зберігання.

### ВИСНОВКИ І РЕЗУЛЬТАТИ

1. Технологія рівноважного модифікованого середовища для збільшення термінів зберігання вибрана як рішення, що поєднує економічну ефективність, екологічну безпеку і мінімальні витрати енергії. Підвищення термінів зберігання рослинної продукції в камерах ХТО є одним з найбільш простих і екологічно безпечних підходів до енергозбереження в елементах холодильного ланцюга.
2. Виконано концептуальний дизайн і створено лабораторні зразки модулів рівноважного модифікованого середовища для збільшення термінів зберігання яблук і листя салату – характерних представників основних груп рослинної продукції.
3. Експериментальні дослідження показали, що якість яблук і листя салату зберігається поряд із збільшенням тривалості терміну зберігання в 2 – 3 рази при використанні напівпроникних мембран як засобу управління складом газового середовища в компактних модулях.
4. Побудована модель газообміну для кисню і вуглекислого газу в продуктах на основі рівнянь реакційної дифузії. Як початкова інформація для визначення параметрів моделі за експериментальними даними використано стаціонарне рішення, що дозволяє провести первинну оцінку. Моделі реакційної дифузії якісно правильно описують процеси транспорту газів усередині плодоовочевої продукції, але точні кількісні результати із-за великого числа невизначених параметрів і невисокої експериментальної точності вимагають підгонки параметрів для кожного виду продукції.
5. На основі обмежених експериментальних даних про кінетику псування яблук залежно від різних факторів побудовано штучні нейронні мережі для прогнозу термінів зберігання. Розроблена прогностична модель визначення термінів зберігання рослинної продукції в компактних модулях на основі штучних нейронних мереж і встановлений взаємозв'язок між цільовою функцією – часом збереження продукту і змінними управління: умовами зберігання і властивостями мембрани;

ІНСТИТУТ ХОЛОДА  
ОНАХТ  
БІБЛІОТЕКА  
АКАДЕМІЯ ХОЛОДУ

6. Для збільшення тривалості термінів зберігання рослинної продукції за рахунок зменшення швидкості респірації, біологічної деградації і зростання багатьох мікроорганізмів, селективна проникність мембран (відношення коефіцієнтів проникності кисню і вуглекислого газу) в РМС модулях має бути вибрана так, щоб забезпечити технологічно допустимі рівні  $\text{CO}_2$  і  $\text{O}_2$ . Управління експлуатаційними характеристиками мембран з метою збільшення швидкостей газообміну досягається за рахунок варіювання площі робочої зони, вибору матеріалу і ступеня перфорації.
7. Вперше запропонований нечіткий узагальнений критерій якості рослинної продукції, який єдиним чином об'єднує множину показників різної природи і служить мірою деградації продуктів при холодильному зберіганні.

#### СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ РОБІТ

1. Чепурненко В.П. Состояние системы холодильного хранения продовольственных запасов – индикатор продовольственной безопасности / В.П. Чепурненко, В.П. Кочетов, Е.М. Тойчик, В.Н. Радионенко // Холодильна техніка і технологія. – 2008. – № 3 (133). – С. 75-77. *Автору належить аналіз літературних джерел щодо стану продовольчої безпеки в Україні.*
2. Радіоненко В.М. Динаміка показників якості рослинної продукції за холодильного зберігання в модулях із модифікованою атмосферою / В.М. Радіоненко В.М. Кочетов, В.О. Мазур // Обладнання та технології харчових виробництв: темат. зб. наук. пр. ; Донец. нац. ун-т економіки і торгівлі ім. М. Туган-Барановського. – 2009. – Вип. 21. – С. 274-280. *Автору належить формування мети та завдань досліджень, комп'ютерні розрахунки процесів кінетики деградації.*
3. Радіоненко В.Н. Кинетика процессов деградации качества растительной продукции при холодильном хранении в модулях с модифицированной атмосферой / В.Н. Радионенко, В.А. Мазур // Холодильна техніка і технологія. – 2009. – № 3 (119). – С. 52-55. *Автору належать комп'ютерні розрахунки якості продукції, аналіз результатів*
4. Радіоненко В.Н. Нейросетевое прогнозирование сроков хранения растительного сырья в модулях с модифицированной атмосферой / В.Н. Радионенко // Восточно-европейский журнал передовых технологий. – 2010. – № 2/7(44). – С. 48-51.

#### АНОТАЦІЯ

Радіоненко В.М. Підвищення ефективності холодильної обробки продукції рослинного походження в модулях з модифікованим газовим середовищем. – 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. 2011.

Дисертаційна робота присвячена підвищенню термінів зберігання рослинної продукції в камерах ХТО, що є одним з найбільш простих і екологічно безпечних підходів до енергозбереження в елементах холодильного ланцюга. На основі експериментальних досліджень показано, що якість яблук зберігається при використанні напівпроникних мембран як засобу управління складом середовища в компактних модулях. На основі рівнянь реакційної дифузії побудована модель газообміну для кисню і вуглекислого газу в продуктах. Як початкова інформація для визначення параметрів моделі за експериментальними даними використано стаціонарне рішення, що дозволяє провести первинну оцінку параметрів. Розроблена прогностична модель визначення термінів зберігання рослинної продукції в компактних модулях на основі методу штучних нейронних мереж і встановлений взаємозв'язок між цільовою функцією – часом збереження продукту і змінними управління: умовами зберігання і властивостями мембрани. Вперше запропонований нечіткий узагальнений критерій якості рослинної продукції, який єдиним чином об'єднує множину показників різної природи і служить мірою деградації продуктів при холодильному зберіганні.

**Ключові слова:** холодильна обробка, рослинна продукція, модифіковане газове середовище, компактні модулі, напівпроникні мембрани

#### АННОТАЦИЯ

Радионенко В.Н. Совершенствование холодильного хранения продукции растительного происхождения в модулях с модифицированной газовой средой. – 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. 2011.

Диссертационная работа посвящена увеличению сроков хранения растительной продукции в камерах холодильного и торгового оборудования при помощи модулей с модифицированной газовой средой, что является одним из наиболее простых и экологически безопасных подходов к энергосбережению в элементах холодильной цепи. Построена модель газообмена для кислорода и углекислого газа в продуктах на основе уравнений реакционной диффузии. В качестве исходной информации для определения параметров модели по экспериментальным данным использовано стационарное решение, позволяющее провести их предварительную оценку. Выполнен концептуальный дизайн и разработаны образцы модулей с равновесной модифицированной средой для увеличения сроков хранения яблок и листьев салата – характерных представителей

основных групп растительной продукции. Экспериментально показано, что качество яблок сохраняется при использовании в качестве средства управления составом среды полупроницаемых мембран, которые увеличивают продолжительность срока хранения в 2 – 3 раза. Разработана прогностическая модель определения сроков хранения растительной продукции в компактных модулях на основе метода искусственных нейронных сетей и установлена взаимосвязь между целевой функцией – временем сохранности продукта и переменными управления: условиями хранения и свойствами мембраны. На основе ограниченных экспериментальных данных о кинетике порчи яблок в зависимости от различных факторов построены искусственные нейронные сети для предсказания сроков хранения. Впервые предложен нечеткий обобщенный критерий качества растительной продукции, который единым образом объединяет множество показателей различной природы и служит мерой деградации продуктов при холодильном хранении.

**Ключевые слова:** холодильная обработка, растительная продукция, модифицированная газовая среда, компактные модули, полупроницаемые мембраны

#### THE SUMMARY

Radionenko V.N. Cold storage enhancement of phytogenous products via modified gas atmosphere modules. – Manuscript.

Thesis for a candidate of science (engineering) degree by specialty 05.18.13 – “Technology of preserved and cooled foodstuffs”. – Odessa State Academy of Refrigeration. Odessa. 2011.

The dissertation is devoted the shelf life enhancement of phytogenous products in the refrigerating and vending facilities as one of simple and ecologically safe approaches to energy saving within cold chain. It was proven experimentally that apple quality is conserved at semipermeable membrane use as a tool to control the atmosphere composition. The mathematical model of gas exchange between oxygen (carbon dioxide) and products is based on the reaction diffusion equations. The initial information to define the model parameters from experimental data is chosen from stationary solution of reaction diffusion model. The shelf life prognosis for phytogenous products in compact modules under modified gas atmosphere was developed via artificial neural network approach. Relationships between goal function (shelf life) and control variables (membrane characteristics and storage conditions) was established. A generalized fuzzy criterion of phytogenous production quality that aggregates the set of different indices was proposed the first time and interpreted as a product degradation measure at refrigeration storage.

**Keywords:** refrigeration treatment, phytogenous products, modified gas atmosphere, compact module, semipermeable membrane

Підписано до друку 08.12.2010. Папір офсетний.

Друк – ризографія. Ум.-друк. арк. 0,9. Тираж 120 прим. Замовлення № 410

Донецький національний університет економіки і торгівлі імені Михайла Туган-Барановського

Редакційно-видавничий відділ ДонНУЕТ

83023, м. Донецьк, вул. Харитонова, 10. Тел.: (062) 297-60-50

Свідоцтво про внесення до Державного реєстру видавців, виготівників і розповсюджувачів видавничої продукції ДК № 3470 від 28.04.2009 р.