

Авторефер.  
ГБ7

ОДЕССКИЙ ИНСТИТУТ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ТЕХНИКИ И ЭНЕРГЕТИКИ

На правах рукописи

ГОРГ МУРАД

МОДЕЛИРОВАНИЕ И ОПТИМАЛЬНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ПРОЦЕССАМИ  
ХОЛОДИЛЬНОГО ХРАНЕНИЯ РАСТИТЕЛЬНОГО СЫРЬЯ

Специальность 05.04.03 – Машины и аппараты холодильной и  
криогенной техники и систем кондиционирования

А в т о р е ф е р а т  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук



Одесса - 1992

xv 968  
Институт холода  
ОНАХТ  
бібліотека

Работа выполнена в Одесском институте  
низкотемпературной техники и энергетики

Научный руководитель: доктор технических наук,  
профессор МАЗУР В.А.

Официальные оппоненты: доктор технических наук,  
профессор ЧЕРНУШЕНКО В.П.

кандидат технических наук,  
ст.н.сотр. ЧЕРНОЗУБОВ А.М.

Ведущая организация: Биотехнический институт  
Украинской Академии аграрных  
наук

Защита диссертации состоится " " \_\_\_\_\_ 1992 г.  
в \_\_\_\_\_ часов \_\_\_\_\_ мин. на заседании специализированного совета  
К 088.27.01 в Одесском институте низкотемпературной техники и  
энергетики по адресу: 270100, Одесса, ул. Петра Великого, 1/3

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке института.

Автореферат разослан " " \_\_\_\_\_ 1992 г.

Ученый секретарь  
специализированного совета,  
доцент

Р.К. НАКУЛЬНИК

# ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы. Использование холодильной технологии — один из важнейших путей решения продовольственной проблемы в мировом масштабе. Для развития новых способов сохранения плодов и овощей необходима разработка моделей процессов, происходящих как внутри камеры в целом, так и в конкретных плодах. Основу таких моделей составляют представления о механизме и путях регулирования естественной убыли сырья в результате физиологических процессов, с одной стороны, и анализ причин, приводящих к поражению фруктов и овощей микроорганизмами и физиологическими заболеваниями, и методов снижения потерь, вызванных порчей продукции.

Наиболее надежный способ получения таких данных — экспериментальный. Но этот способ сопряжен с большими затратами материальных и трудовых ресурсов, что вызывается значительным разнообразием плодов и овощей, подвергавшихся холодильной обработке, и значительными отличиями применяемых технологий. Вследствие этого во многих случаях предпочтительнее моделирование процессов хранения с использованием теоретических моделей и имеющихся ограниченных экспериментальных данных.

Для анализа процессов естественной убыли разработаны подходы, базирующиеся на термодинамической теории и теплофизических свойствах плодов и овощей, которые позволяют с высокой точностью оценивать влияние таких факторов хранения, как температура, внешние теплопотоки и коэффициент загрузки камеры. Для моделирования процессов порчи продукции существует только эмпирические обобщения, характеризующие основные причины повреждения для конкретных плодов и овощей. Однако количественная характеристика процессов на основе имеющихся представлений затруднительна. Отсутствие моделей процессов порчи в настоящее время сдерживает использование и совершенствование методов моделирования процессов холодильного хранения.

Наличие моделей процессов холодильного хранения является важной предпосылкой для выработки методов эффективной стратегии эксплуатации холодильников, так как на их основе могут быть построены экспертные системы, позволяющие прогнозировать результаты деятельности за определенный срок и вырабатывать оптимальные режимы.

В данной работе рассмотрен один из подходов к решению перечисленных проблем, связанный с разработкой дифференциальной модели холодильного хранения плодовоовощной продукции с решением на ее основе задач поиска функций оптимального управления, обеспечивающих наилучшие экономические результаты функционирования холодильной системы.

В соответствии с изложенным, актуальность темы исследования определяется ее непосредственной связью с проблемами и потребностями, порожденными научно-техническим прогрессом, в области холодильной техники и технологии на современном этапе.

Цель работы состояла в исследовании теоретических представлений о процессах естественной убыли и порчи, происходящих при холодильном хранении плодовоовощной продукции, разработке дифференциальной модели этих процессов и решении на ее основе задачи поиска оптимальных технологий хранения конкретных продуктов.

Для достижения поставленной цели должны быть решены следующие основные задачи:

поиск математических зависимостей, позволяющих описать процессы естественной убыли и порчи фруктов и овощей при их холодильном хранении;

создание комплекса программ для моделирования и прогнозирования процессов хранения и решения задач оптимального управления;

разработка методов параметризации дифференциальной модели хранения и решение обратной задачи поиска параметров модели для конкретных плодов;

формирование критерия оптимальности для холодильного хранения плодовоовощной продукции и решение задачи оптимального управления на основе разработанных моделей хранения и комплекса программ.

Научная новизна работы заключается в том, что впервые предложена и применена для конкретных расчетов дифференциальная модель холодильного хранения плодов и овощей, учитывающая убыль продукта вследствие жизнедеятельности и дыхания, и убыль, вызванную микробиологическими и физиологическими поражениями.

На защиту выносятся научные положения и основные результаты диссертации.

## II Научные положения:

1. Корректное количественное описание динамики холодильного хранения плодов и овощей достигается в дифференциальной модели, учитывающей конкуренцию вкладов естественной убыли и усадки за счет различных механизмов порчи, возникающей по достижении определенного процента усушки.

2. Для каждого продукта существует область значений соотношения удельных затрат труда к стоимости единицы продукта, в которой оптимальный срок проведения работ по переборке продукции меньше максимального срока хранения.

### Основные результаты:

1. Разработан комплекс программ для расчета динамики хранения плодов и овощей с учетом естественной убыли и порчи и решения задач оптимального управления. Предложена рациональная структура комплекса, методы тестирования специализированных программ, разработаны универсальные программы для решения систем обыкновенных дифференциальных уравнений и задач оптимизации на персональных компьютерах.

2. Построена дифференциальная модель динамики холодильного хранения сочного растительного сырья, учитывающая естественную убыль и порчу продукции. Проведена апробация модели на примере расчета динамики хранения лимонов, апельсинов и абрикосов при различных температурах и сроках хранения.

3. Проведено решение задач оптимального управления для различных соотношений между стоимостью единицы продукта и удельных затрат труда на переборку продукта. Определены оптимальные сроки окончания работ по переборке, условия, при которых проведение переборки неэффективно.

Практическая ценность работы. Разработанные динамические модели процессов холодильного хранения сочного растительного сырья с учетом усадки продукта в результате порчи позволяют разработать компьютерные информационные технологии, на основе которых можно определить оптимальные режимы хранения и перемещения продукта в автоматизированных рефрижераторных системах загрузки и распределения.

Апробация работы. Основные результаты работы докладывались на ежегодных научно-технических конференциях Одесского института низкотемпературной техники и энергетики, на VI Международной неделе науки (Латвия, 1991).

Публикации. Основные материалы работы опубликованы в 2 пе-



чатных работах.

Структура и объем диссертации. Работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы, включающего 44 наименования, и приложения, содержащего тексты основных программ. Диссертация изложена на 94 страницах машинописного текста, включает 10 таблиц и 27 рисунков.

#### СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В первой главе рассмотрены имеющиеся в литературе результаты исследований, посвященных вопросам определения лежкоспособности растительного сырья, выбору оптимальных параметров холодильной обработки, применению технологических приемов, повышающих устойчивость плодов и овощей к микробиологическим и физиологическим поразениям, математическим моделям процессов хранения портящейся продукции и убыли растительного сырья.

Показано, что качество хранения характеризуется множеством инструментально контролируемых показателей, таких как pH, содержание витаминов, общая кислотность, текстура, цвет, весовые потери и др. В реальных производственных условиях измерение всех показателей невозможно, что приводит к неопределенности гарантии качества продукции для потребителя. Возможный методологический путь решения проблемы состоит в объединении лабораторных исследований локальных объективных показателей качества хранения продукции с одновременной идентификацией математических моделей, описывающих эволюцию экспериментально определяемых показателей качества, с последующим формированием глобального критерия, содержащего в качестве независимых переменных параметры управления процессом холодильного хранения. Задача оптимального управления процессом хранения плодов и овощей заключается не только в подавлении биохимических процессов обмена веществ за счет факторов внешней среды, но и в сохранении количественных характеристик этих факторов в определенных границах и соотношениях друг к другу, что позволит достичь сбалансированного обмена веществ, отвечающего состоянию гомеостаза. Теоретический подход к решению данной проблемы, опирающийся на ограниченный экспериментальный материал, реализован в диссертации и в дальнейшем может быть использован в системах автома-

тизированного рефрижераторного хранения скоропортящейся продукции.

Во второй главе показано, что математическое моделирование процессов хранения сочного растительного сырья в холодильниках и процессов управления запасами сводится к формированию и решению систем дифференциальных уравнений и решению задач оптимизации. В общем случае, решение систем обыкновенных дифференциальных уравнений и поиск оптимальных значений функций одной или нескольких переменных возможны только с использованием численных методов, ориентированных на применение ЭВМ. Аналитическое решение подобных задач, как правило, получить не удается. Следствием этого является необходимость тщательного выбора численных методов и разработки их программной реализации.

Динамика хранения растительного сырья в холодильниках в общем виде описана системой двух дифференциальных уравнений, одно из которых представляет зависимость скорости убывания массы продукта хорошего качества  $x$  от времени хранения  $t$ , второе — скорость роста количества испортившегося продукта  $y$  :

$$\begin{aligned} \frac{dx}{dt} &= - \sum_i \varphi_i(y/x), \\ \frac{dy}{dt} &= \sum_i \varphi_i(y/x) - u, \end{aligned} \quad (I)$$

где  $\varphi_i(y/x)$  — скорость убыли продукта хорошего качества, вызванная действием фактора  $i$ ;  $u$  — управляющее воздействие, связанное с удалением испорченного продукта из хранилища.

Количество факторов, учитываемых в правых частях системы (I), зависит от типа хранилища и условий хранения в нем, способа циркуляции воздуха в штабеле, рода продукта, степени детализации описания динамики хранения и других причин. В частности, усложнению модели (I) препятствует отсутствие необходимых экспериментальных данных, на основе которых можно идентифицировать модели. В таких случаях обычно рассматривают одну обобщенную функцию скорости порчи, включающую ряд самых важных факторов.

Количество дифференциальных уравнений в модели динамики хранения может быть больше двух. Два уравнения представляют минимальную модель, которая учитывает количество продукта, характеризующегося комплексом обобщенных показателей, позволяющих говорить о качественном и некачественном продукте.

Для определенных целей возможно введение дополнительных



уравнений, характеризующих количество продукта с определенным качеством: например, при хранении фруктов можно рассматривать несколько урогов качества в зависимости от количества сохранившихся витаминов, сахаров или органических кислот. В качестве отдельной контролируемой величины при описании динамики хранения растительного сырья может служить количество углекислого газа, выделяемого продуктом в процессе жизнедеятельности, или количество испарившейся при этом влаги.

Для решения задачи (I) выбран метод Рунге-Кутты фиксированного порядка, вытекающий из характера рассматриваемого процесса хранения.

Другой важной процедурой численного анализа, которая необходима для решения задач управления запасами портящегося растительного сырья в общем случае, не допускающем аналитического решения, являются методы оптимизации. Использование программ оптимизации при моделировании процессов холодильного хранения фруктов и овощей предполагает решение, по крайней мере, двух типов задач: это обратные задачи поиска параметров дифференциальной модели, описывающей процесс хранения по экспериментальным данным, и задачи минимизации затрат на хранение и переборку продукции.

В настоящей работе за основу алгоритма программы оптимизации был принят метод Пауэлла-ДСК. Этот метод включает многомерную процедуру выбора направления поиска Пауэлла с методом одномерного поиска ДСК-Пауэлла, состоящем в комбинации алгоритма Довиса-Свена-Кемпи (ДСК) с алгоритмом Пауэлла.

Алгоритм Пауэлла-ДСК осуществляет поиск на неограниченном пространстве по всем переменным. В практических задачах моделирования хранения растительного сырья, обычно диапазон возможного изменения параметров ограничен их физическим смыслом, причем границы этих изменений могут быть зафиксированы по определенным соображениям. Учет таких границ позволит избежать получения нефизических решений и сократить количество вычислений.

Рассмотрены математические аспекты моделирования холодильного хранения сочного растительного сырья и решения задач оптимального управления запасами. Разработанные в диссертации программные средства, предназначенные для решения систем обыкновенных дифференциальных уравнений, поиска оптимальных значений функций многих переменных и решения задач оптимального

управления на известном классе функций управления, представляют основу для решения конкретных практических задач, связанных с хранением того или иного продукта. Следует отметить, что разработанные программные средства носят универсальный характер, отличаются простотой структуры и надежностью итерационных процедур, что делает возможным их применение вне рамок проблем, исследуемых в настоящей диссертации.

В третьей главе изложен подход, который позволяет построить функцию скорости порчи продукта, учитывающую также убыль в результате процессов жизнедеятельности плода (естественную убыль). Рассмотрены методы параметризации дифференциальной модели динамики хранения по ограниченной экспериментальной информации. Описанные алгоритмы и программные средства, позволяющие найти значения параметров модели, обеспечивающих оптимальное описание экспериментальных данных по хранению конкретных фруктов. Проведены результаты расчета динамики хранения по полученным моделям для различных температур хранения.

Существующие в настоящее время модели хранения сочного растительного сырья (В.З.Хадан, 1989; 1976) позволяют с высокой точностью описать естественную убыль продукта, возникающую в результате жизнедеятельности плодов в процессе их дыхания. Известно, однако, что со временем часть хранящейся в холодильнике растительной продукции оказывается пораженной каким-либо видом микроорганизмов, которые приводят к необратимой утрате первоначального качества продукта. Такая убыль не может быть учтена в рамках термодинамической модели естественной убыли и требует разработки нового подхода к построению функции убыли продукта.

Известно, что растительное сырье обладает определенным иммунитетом к микроорганизмам, вызывающим порчу. Будем исходить также из того, что на хранение закладывается высококачественная неповрежденная продукция, поэтому на начальном этапе хранения количество испортившегося продукта пренебрежимо мало. На этом этапе сокращение количества качественной продукции полностью определяется естественной убылью и может быть описано в рамках подхода В.З.Хадана.

Для адекватного описания физического процесса холодильного хранения сочного сырья в модели учтена как естественная убыль продукта на начальном этапе хранения (до заметной потери тургора или ослабления иммунитета), так и за счет порчи.

В дальнейшем не рассматриваются потери, вызванные, например, гигроскопичностью тары, и потери, связанные с начальной фазой хранения — охлаждением продукции. Для корректного описания процесса хранения и порчи такое допущение является правомерным, так как учет названных потерь может быть произведен в форме начальных условий в дифференциальной модели динамики хранения. Сама же величина этих потерь может быть рассчитана по известным методикам.

Рассмотрим динамику хранения растительной продукции в холодильной камере. Предположим, что в холодильнике находится одноименный продукт (т.е. фрукты или овощи одного вида и одинакового исходного качества), который с течением времени утрачивает часть массы в результате физиологических процессов и процессов порчи.

Для удаления испортившегося продукта необходимы определенные затраты труда, которые описаны некоторой функцией времени  $U(z)$ . Предположим, что испортившийся продукт распределен равномерно во всем объеме хранилища, так что одинаковые затраты труда приводят к удалению одинакового количества продукта плохого качества. Таким образом, скорость удаления испорченного продукта можно считать функцией затрат труда и записать в простейшем случае:  $U(z) = K \cdot V(z)$ .

При таких условиях изменение количества хорошего продукта во времени отрицательно и зависит только от его наличного количества и скорости порчи единицы продукта в данный момент времени. Изменение количества испорченного продукта, находящегося в холодильнике, от времени определяется вкладом части хорошего продукта, которая испортилась к данному моменту, и количеством удаленного в единицу времени продукта.

В соответствии с принятыми выше обозначениями данное обстоятельство приводит к следующей системе обыкновенных дифференциальных уравнений, описывающих динамику изменения количества хорошего и испортившегося продукта:

$$dx/dz = -x \cdot \varphi(y/x), \quad (2)$$

$$dy/dz = x \cdot \varphi(y/x) - U. \quad (3)$$

Уравнение (2) задает скорость изменений (уменьшения) количества качественного продукта. Уравнение (3) определяет изме-

нение во времени количества испорченного продукта, находящегося в холодильнике. Условия однозначности, позволяющие определить частное решение системы (2) — (3), включают начальные условия и ограничения на возможные значения количества хорошего и некачественного продукта.

Таким образом, система дифференциальных уравнений (2) и (3) позволяет вычислить количество сохраненного качественного продукта в конце периода хранения  $x(z_{\max})$  в зависимости от его начального количества  $x_0$ , скорости порчи при заданных условиях  $\varphi$  и производимых на холодильнике работ по удалению испорченной продукции  $U$ . Зная результат хранения по заданной технологии  $x(z_{\max})$ , можно вычислить денежные затраты на единицу продукции и сформулировать задачу их минимизации, т.е. задачу поиска оптимального сочетания режима хранения и производимых работ.

Для функции скорости порчи предложены различные зависимости, определяемые видом продукции, сортом, условиями выращивания и сбора, и т.д. В настоящее время в литературе отсутствуют какие-либо сведения о возможной функциональной зависимости функции скорости порчи от соотношения количества хорошего и испорченного продукта. Для ее построения воспользуемся простой формой, в которой скорость естественной убыли играет роль масштабирующего множителя. Этот подход правдоносен, так как известно, что ускорение процессов порчи всегда сопровождается увеличением выделения углекислого газа и увеличением интенсивности дыхания.

Кроме этого предполагаем, что до тех пор, пока усушка продукта не превышает некоторой фиксированной доли, которая может ассоциироваться с потерей тургора или ослаблением иммунитета, заметной порчи продукции не происходит. Это означает, что функция скорости порчи имеет в рассматриваемом процессе точку излома, которая соответствует моменту достижения предельной усушки, после которой развиваются физиологические нарушения в плодах и нарушения микробами и грибами.

Таким образом, по достижении  $\alpha_{\text{lim}}$  в системе возникает дополнительный механизм убыли и изменяется характер скорости порчи.

Изложенные выше соображения математически выражаются следующей дифференциальной моделью динамики хранения сочного растительного сырья:



$$dx/dz = -n'_y \cdot x(1 + b_1(y/x + a_0)), \quad (4)$$

$$dy/dz = n'_y \cdot x \cdot b_1(y/x + a_0) - U, \quad (5)$$

$$\text{где } b_1 = \begin{cases} 0, & \frac{x - x_0}{x_0} \cdot 100\% \leq \angle \text{lim}, \\ a_1, & \frac{x - x_0}{x_0} \cdot 100\% > \angle \text{lim}. \end{cases} \quad (6)$$

При построении адекватной модели динамики хранения использованы различные категории экспериментальных данных по хранению конкретного продукта, такие как зависимость количества испортившегося продукта от времени, данные о количестве сохранного продукта за определенный период при заданных условиях, зависимость количества сохранившегося продукта от температуры или внешних теплопритоков, и т.п. Следствием этого является требование одновременного удовлетворения условиям оптимальности при решении обратной задачи по нескольким независимым критериям.

В общем случае задача поиска оптимальных значений параметров дифференциальной модели хранения сформулирована следующим образом: найти такие значения параметров, характеризующих продукт и режим хранения, которые дают оптимальное (в определенном смысле) приближение к множеству разнородных экспериментальных данных.

Из всего множества данных при решении задачи восстановления параметров дифференциальной модели хранения лимонов использованы только данные контрольных опытов, приведенных с необработанными лимонами, при 4–5 °C на протяжении нескольких месяцев, причем только тех опытов, где температура была контролируемой и приведена в результатах исследования /А. Колесник, 1969/. Для случая хранения лимонов неизвестными являются предельный процент усушки, после которого начинается быстрая порча из-за снижения иммунитета,  $\angle \text{lim}$ , параметры скорости порчи  $a_0$  и  $a_1$ , а также коэффициент внешних теплопритоков  $\epsilon_{\text{en}}$ .

Поскольку экспериментальные данные, которые могут быть использованы для решения обратной задачи, относятся к одной из величин — количеству испортившейся продукции при одних и тех же условиях хранения, то многокритериальную задачу оптимизации сводили к сверке по схеме предпочтительного критерия. Сопоставление результатов расчета с экспериментом позволяет говорить с хорошей

точности описания экспериментальных данных в соответствии с принятыми критериями адекватности.

Проведены специальные модельные расчеты динамики хранения лимонов по предложенной модели с параметрами (см. табл. 1) при варьировании температуры хранения от 0 до 18 °C с выводом результатов расчета для каждого дня хранения и предельным сроком хранения 300 суток.

Полученные результаты обработаны графическим пакетом GRAFEX и представлены на диаграммах, позволяющих прогнозировать лежкоспособность лимонов в зависимости от температуры и срока хранения. Вычисления показывают, что в начальный период хранения температура оказывает решающее воздействие на результаты сохранности лимонов. Так, при сроке до 40 суток и температуре 0 °C качество лимонов практически не зависит от процессов порчи; идет процесс обычной усушки вследствие жизнедеятельности плода. В то же время к 40-м суткам хранения при 18 °C количество доброкачественной продукции составляет всего 70 % и продолжает стремительно уменьшаться. Сохранить хоть какое-то количество лимонов в течение 300 суток можно только при температурах 8 °C и ниже.

При использовании диаграмм для прогнозирования лежкоспособности и потерь следует учитывать, что они построены для фиксированных значений коэффициента загрузки камеры и коэффициента внешних теплопритоков. Для более точных результатов прогнозирования следует использовать программу (LINDEQSO), разработанную в данной диссертации, которая позволяет произвести расчет динамики хранения для любых сочетаний температуры и характеристик камеры.

Методология построения дифференциальной модели холодильного хранения апельсинов в основном повторяет подход, использованный нами для изучения лежкоспособности лимонов. Этот подход базируется на описании динамики хранения двумя дифференциальными уравнениями, характеризующими изменение во времени количества доброкачественного продукта и количества испортившегося продукта в холодильнике, и параметризации этой модели путем решения обратной задачи для неизвестных параметров хранения или самого продукта.

Анализ характеристик процесса дыхания апельсинов и их сравнение с аналогичными данными для лимонов позволили предположить, что лежкоспособность этих фруктов будет характеризоваться в целом близкими зависимостями.



Полученные в результате решения обратной задачи значения параметров модели приведены в табл. I. Сравнивая эти данные с результатами для лимонов, можно увидеть, что функция скорости порчи носит у апельсинов более контрастный характер. Интенсивная порча наблюдается после усыхания на 4,3 %, т.е. почти в 2 раза больше, чем у лимонов. Этот факт подтверждается и экспериментальными данными Sastgy, где утверждается, что для цитрусовых некоторая подвяленность полезна для лежкоспособности. Однако до достижения предельной усушки апельсины портятся гораздо быстрее и в большем количестве, чем лимоны. Об этом говорят величины параметров  $Q_0$  и  $Q_1$ . Показано, что усушка (естественная убыль) лимонов и апельсинов происходит примерно одинаково. Вместе с тем, значительно интенсивнее происходит порча апельсинов, которая за 100 суток достигает величин, близких к порче лимонов за 150 суток.

Этот вывод подтверждают и расчеты динамики хранения апельсинов при различных температурах от 0 до 18 °C. Сохранить какое-то количество апельсинов в течение 300 суток возможно только при температурах ниже 3 °C. Особенно характерно сопоставление изотерм 0 °C для лимонов и апельсинов: у лимонов при такой температуре к концу 300 суток сохраняется около 60 % первоначального количества, в то время, как у апельсинов только около 25 %.

Абрикосы являются менее лежкоспособными фруктами, чем апельсины или лимоны. Об этом говорит высокое значение удельной теплоты дыхания абрикосов:  $Q_0 = 23,4$  Вт/т.

Экспериментальные данные по хранению абрикосов, которые могли бы быть использованы для решения задачи параметризации дифференциальной модели динамики хранения, практически отсутствуют. Единственная серия опытов проведена А.А. Кудряшовой (1986) в качестве контрольной для оценки влияния радиоактивного облучения на сохраняемость абрикосов. Эти данные были использованы для решения обратной задачи и определения коэффициента внешних теплопритоков, предельной усушки, доли ослабленных плодов и линейного коэффициента скорости порчи для абрикосов.

Значения параметров модели подтверждают, что косточковые, каковыми являются абрикосы, качественно отличаются от цитрусовых, т.е. лимонов и апельсинов, не только по теплоте дыхания, но и по характеристикам скорости порчи.

Анализ результатов расчетов позволяет отметить особенно

заметное влияние снижения температуры на сохранность абрикосов. Отличия в результатах хранения по сравнению с лимонами и апельсинами, наблюдаемые при сравнении различных изотерм, значительно более выражены. Кроме того, следует отметить и выраженный нелинейный характер функции порчи для абрикосов. Показано, что для абрикосов возможно прогнозирование значений некоторых параметров модели, исходя из аналогичных характеристик близких по природе плодов или овощей. В целом простота и ясный физический смысл дифференциальной модели динамики холодильного хранения плодово-овощной продукции позволяют рассчитывать на ее широкое использование для прогнозирования лежкоспособности продукции в зависимости от условий хранения и других факторов в практических расчетах в составе систем автоматизированного управления холодильниками и овощехранилищами и в других приложениях.

В четвертой главе на основе модели динамики хранения сочного растительного сырья сделан переход к решению более сложной задачи — исследованию влияния условий хранения и процессов удаления испорченной продукции на результаты хранения за определенный период. Такое исследование позволяет выявить оптимальное сочетание технологических параметров хранения, позволяющих добиться максимальной сохранности при минимальных затратах. Задача оптимизации режимов хранения неразрывно связана с критерием оптимальности, разработка которого также представляет собой достаточно сложную и пока еще недостаточно исследованную задачу.

В основу используемого здесь критерия, выражающего влияние затрат по достижении заданной температуры на получаемую прибыль от холодильного хранения плодово-овощной продукции, положен обобщенный термодинамический подход.

Исследование структуры критерия оптимальности — сложная термодинамическая задача, которая имеет различные решения в зависимости от используемого хладагента, теплообменного оборудования, схемы воздухообмена в холодильнике и многих других факторов. Показано, что содержательные результаты могут быть получены при использовании идеальных оценок для эксергетического к.п.д. Поэтому локальный энергетический критерий оптимальности записывали в форме:

$$R_x = S_x \cdot T_0 / T_x \quad (7)$$

Второй фактор, накладывающий в рамках рассматриваемой мо-

дали динамики хранения заметное влияние на структуру критерия оптимальности и результаты хранения - затраты труда на удаление испорченной продукции. В случае хранения плодоовощной продукции в предположении, что заложена на хранение полностью доброкачественная продукция, функция затрат труда на переборку или перемещение приведена в следующей форме:

$$R_L = S_L \cdot (Z_{opt} - Z_{lim}) \quad (8)$$

Третья составляющая критерия оптимальности, включенная в рассмотрение в рамках развиваемого подхода, выражает стоимость реализованной сохраненной продукции:

$$R_P = S_P \cdot \alpha(Z_{max}) \quad (9)$$

Количество сохраненного продукта ( $Z_{max}$ ) зависит от технологии хранения и, в частности, от температуры и труда, затраченного на переработку. Значение  $\alpha(Z_{max})$  определяется при решении системы дифференциальных уравнений, описывающих динамику хранения при заданных условиях.

Из перечисленных выше локальных критериев оптимальности сформирован глобальный критерий, который характеризует эффективность процессов холодильного хранения плодоовощной продукции.

Для дальнейшего исследования была принята схема аддитивного глобального критерия:

$$R = R_L + R_{\alpha} \cdot (Z_{max} - Z_0) - R_P \quad (10)$$

Минимум этого критерия означает максимум прибыли, полученной в результате холодильного хранения. Критерий  $R_{\alpha}$  умножается на срок хранения, чтобы все величины имели одинаковую размерность. Здесь не учитывается также первоначальная стоимость продукта, заложенного на хранение, но она не зависит от процесса хранения и не влияет на результат оптимизации. Предложенный обобщенный критерий был применен для численного решения задачи оптимизации режимов хранения плодов и овощей и задачи поиска оптимального управления.

Таблица 1.

Параметры дифференциальной модели хранения скоропортящейся продукции

Тип продукции	$q_0$ Вт/т	$\theta$ I/°C	$\varepsilon_z$ -	$\varepsilon_{вн}$ -	$\lambda_{lim}$ %	$a_0$ -	$a_1$ -
Лимоны	11,2	0,0718	1,0	2,1757	2,1081	0,5125	3,6835
Апельсины	10,6	0,0733	1,0	3,4071	4,2841	0,9301	4,4585
Абрикосы	23,4	0,1144	1,0	0,5932	0,08592	0,2562	2,5729

### ВЫВОДЫ

1. Моделирование и оптимальное управление процессами холодильного хранения скоропортящихся плодов и овощей на основе кинетических закономерностей порчи продукции является необходимым элементом компьютерных информационных технологий при создании автоматизированных рефрижераторных фрукто- и овощехранилищ.

2. Эволюция процессов убыли скоропортящейся продукции при холодильном хранении, обусловленная физико-химическими, микробиологическими и физиологическими факторами, может быть адекватно описана дифференциальной моделью динамики хранения, в которой учтен нелинейный характер функции порчи после достижения предельной усушки.

3. Адекватность моделей динамики хранения холодильного хранения сочного растительного сырья, учитывающих естественную убыль и деградацию продукции, подтверждается высокой точностью описания экспериментальных данных по динамике хранения лимонов, апельсинов и абрикосов при различных температурах.

4. Разработанный комплекс программ моделирования и оптимального управления процессами хранения плодоовощной продукции имеет универсальный характер и совместно с предложенными методами параметризации и идентификации дифференциальной модели хранения может быть адаптирован к более широкой номенклатуре продукции.

5. Сочетание термодинамических и экономических критериев сохранения качества продукции, которые скоррелированы с микробиологическими и биохимическими факторами, позволяет выделить область значений соотношений между удельными затратами труда по удалению некачественной продукции и стоимостью единицы продукта, где по условиям маркетинга сроки проведения работ по переборке могут быть оптимизированы и экономически эффективны.



Основное содержание диссертации опубликовано в следующих работах:

1. Мазур В.А., Мурад Г., Бошков Л.З. Моделирование процессов управления запасами портящегося продукта при холодильном хранении фруктов и овощей. Холодильная техника и технология. 53, (1991), с.70-75.
2. G. Murad, V. Mazur. "Optimal Control of Refrigerated Storage Conditions for Perishables". VI Science Week, Latakia, Syria. 1991

#### УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ

- $\gamma(t/z)$  - скорость порчи единицы продукта в зависимости от отношения количества испортившегося продукта, находящегося в хранилище, и количество хорошего продукта.
- $Z$  - количество плодов хорошего качества;
- $Y$  - количество испортившегося продукта, находящегося в холодильнике в момент времени  $Z$ ;
- $A_{lim}$  - предельный процент усушки;
- $\alpha_0$  - параметр, характеризующий долю ослабленных плодов, которые начинают портиться непосредственно за потерей тургора, по отношению к общему количеству качественных плодов;
- $\alpha_1$  - линейный коэффициент скорости порчи, учитывающих наличие среди здоровых плодов некоторого количества испортившихся, которые являются источником заражения;
- $Sp$  - цена единицы продукции;
- $Z(Z_{max})$  - значение количества сохраненного продукта - конце срока хранения;
- $Z_0, Z_{max}$  - соответственно, время начала и окончания;
- $S_L$  - стоимость работ в сутки;
- $Z_{lim}$  - срок, в течение которого усушка продукта достигает величины предельной усушки и начинается интенсивная порча;
- $Z_{opt}$  - предельный срок, при котором целесообразна переработка.
- $n_y$  - скорость естественной убыли

г.Одесса, роталитет ОМНТБ. Подписано к печати 01.06.92  
Объем 1,25 л.л. Тираж 100. Заказ 830-92