

**На правах рукописи**

**ЗОХУН Моголе Бертин**

**Совершенствование процесса охлаждения  
плодов киви**

**Специальность 05.04.03  
«Машины и аппараты, процессы холодильной и  
криогенной техники, систем кондиционирования  
и жизнеобеспечения»**

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации на соискание учёной степени  
кандидата технических наук

Москва - 2003



Работа выполнена на кафедре «Холодильная техника» Московского государственного университета прикладной биотехнологии.

Научный руководитель - доктор технических наук, профессор

**Мизерецкий Н.Н.**

Официальные оппоненты:- доктор технических наук, профессор

**Маринюк Б.Т.**

- кандидат технических наук

**Фролов А.П.**

Ведущее предприятие: Всероссийский научно-исследовательский институт холодильной промышленности  
(ВНИХИ)

Защита состоится 25 сентября 2003 года в 14 часов на заседании диссертационного совета К212.149.02 при Московском государственном университете прикладной биотехнологии по адресу: 109316, г. Москва, ул. Талалихина, д.33.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МГУПБ.

Автореферат разослан 27 июня 2003 года

Учёный секретарь диссертационного совета,

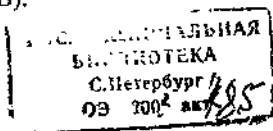
кандидат технических наук, доцент *А. Никифоров* **Никифоров Л.Л.**

**Актуальность проблемы.** Демократическая республика Бенин находится в Западной Африке на берегу Атлантического океана. Основу экономики Бенина составляет сельское хозяйство. Благодаря тропическому климату средняя годовая температура составляет 32 °С. Лишенная крупных топливно-энергетических ресурсов страна покупает электрическую энергию из соседней Республики Гана. В Продовольственной программе Бенина на период 1999-2005 годы предусмотрены эффективные меры по совершенствованию снабжения населения плодоовощной продукцией путем дальнейшего увеличения ее производства, а также путем резкого сокращения потерь продукции при уборке, транспортировании, хранении и переработке. Эта проблема весьма актуальна и для расширения экспорта плодов и овощей из Бенина в другие страны. В первую очередь это относится к тропическим и субтропическим плодам, выращиваемым в Бенине, в связи с их растущим потребительским спросом на международном рынке.

В настоящее время в Бенине наблюдается интенсивное увеличение производства плодов киви. В то же время организация их предварительного охлаждения в Бенине недостаточно совершенна и сопряжена с большими потерями от микробиологической порчи и снижения качества. Для расширения производства киви необходимо решение вопроса по совершенствованию процесса охлаждения. Его основу должны составлять исходное качество плодов и прежде всего, их устойчивость к микробиологической порче и другим неблагоприятным факторам.

В этом плане перспективным является использование электрофизических методов при холодильной обработке плодов, к одному из которых, относится электроконвекция. Возможность использование электроконвекции при охлаждении плодов киви может значительно интенсифицировать данный процесс.

**Цель работы.** Целью работы является разработка процесса и конструктивного решения камеры охлаждения плодов киви с использованием эффекта электроконвективного движения воздуха (ЭКДВ).



### **Основные задачи работы.**

1. Разработать методики исследований и создать экспериментальный стенд для исследования процесса охлаждения плодов киви.
2. Исследовать вольт-амперные характеристики (ВАХ) электроконвективной системы движения воздуха (ЭКСДВ).
3. Провести экспериментальные исследования по определению влияния следующих способов организации процесса: с использованием электроконвекции, воздушной и естественной циркуляцией; а также влияния электрических параметров на продолжительность и величину удельного теплового потока при охлаждении плодов киви.
4. Разработать на базе физико-механического метода способ оценки зрелости плодов киви.
5. Провести качественную оценку плодов киви на базе микробиологических и гистологических исследований охлажденных в электроконвективной среде.
6. Разработать конструктивное решение камеры охлаждения плодов киви с использованием ЭКСДВ и дать технико-экономическую оценку её работы.

**Научная новизна** заключается в следующем:

- Обоснован, на базе полученных данных паропроницаемости оболочки плодов киви, рациональный вариант их расположения в штабеле при охлаждении.
- Получены экспериментально вольт-амперные характеристики электродной приставки ЭКСДВ и их эмпирическая зависимость, позволяющие определить ее рабочие параметры для охлаждения плодов киви.
- Получены графические и эмпирические зависимости температуры на поверхности и в центре плода киви, удельного теплового потока от продолжительности процесса при исследуемых вариантах организации охлаждения: при использовании электроконвекции, воздушной и естественной конвекции.
- Получены графическая и эмпирическая зависимости продолжительности охлаждения плодов киви от напряжённости электрического поля и обоснован их рациональный режим.

- Получены, с использованием физико-механического метода, значения предельных напряжений сдвига неразрушенной структуры киви и коэффициента степени зрелости плода.
- Получены зависимости концентрации микрофлоры на поверхности и в мякоти плода от продолжительности процесса, позволяющие оценить микробиологическое состояние в момент обработки в электроконвективной среде.

#### **Практическая ценность.**

- Разработан способ определения степени зрелости плодов киви (подана заявка на изобретение № гос. Регистрации 2002109409).
- Предложено конструктивное решение камеры охлаждения плодов киви с использованием электроконвективной системы движения воздуха (ЭКСДВ).
- Выполненная техника – экономическая оценка предлагаемой камеры охлаждения плодов киви доказывает её экономическую эффективность.

**Достоверность результатов исследований** подтверждается использованием стандартных и общепринятых методов анализа. Математическая обработка экспериментальных данных и представление информации в графическом виде осуществлялись на персональном компьютере PC-133 Pentium-3 (600 МГц) ОЗУ: 320 Мб с использованием программ для инженерных и научных расчётов: Mathcad 2001; MATLAB 6.1; CurveExpert 1.37 и др. Надежность полученных математических зависимостей оценивалась статистическим критерием  $t$ – Стьюдента при доверительной вероятности свыше 0,95, среднеквадратичным отклонением –  $S$  и коэффициентом корреляции -  $r$ . При обработке экспериментальных данных использовали логарифмические одно- и много-факторные, а также линейные и нелинейные параболические корреляционные модели.

**Апробация работы.** Основные положения диссертации докладывались на: Международной научно-технической конференции «Пищевой белок и экология» (Москва, 2001 г.), на заседаниях кафедры « Холодильная техника» МГУПБ.

**Публикации.** По материалам диссертации опубликовано 11 печатных работ, в том числе, подана заявка на изобретение.

**Структура и объём диссертации.** Диссертационная работа состоит из введения и 4-х глав, общих выводов и приложений. Работа изложена на 128

страницах машинописного текста, содержит 26 рисунков, 11 таблиц, 3 приложения на 20 страницах, библиография включает 128 наименований работ отечественных и зарубежных авторов.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность темы и определены цели и задачи исследований.

**В первой главе** выполнен обзор литературы и проанализировано состояние вопроса совершенствования способа охлаждения применительно к плодам киви, а также применение электрофизических методов при холодильной обработке пищевых продуктов. Излагаются результаты исследований отечественных и зарубежных учёных Э.Э.Афанасова, Б.С.Бабакина, М.К.Бологи, А.И.Бута, В.А.Выгодина, И.П.Верещагина, Н.А.Головкина, П.В.Жуковского, В.В. Илюхина, В.С.Колодязной, А.Колесника, Т.В.Лариной, А.М.Остапенкова, И.А.Рогова, А.Л.Чижевского, A.W.Ewcll, R.B.H.Will и др. Конкретизируются основные направления исследования. Проведённый анализ литературных источников позволил сформулировать цель и основные задачи исследования.

- 
- Консультант глав 2, 3, 4: - д.т.н., проф. Бабакин Б.С.

**Во второй главе** приведены разработанные методики экспериментальных исследований для определения: теплофизических характеристик плода киви, паропроницаемости оболочки киви, сохранности плода киви при вертикальном положении штабеля, электрических параметров ЭКСДВ, продолжительности и плотности теплового потока при охлаждении плодов киви до  $t = 0^{\circ}\text{C}$  при различных вариантах организации процесса и также влияния напряжённости электрического поля на продолжительность процесса охлаждения при использовании ЭКСДВ, микробиологических и гистологических исследований плодов киви для дальнейшего изучения влияния ЭКСДВ на поверхностную и внутреннюю микрофлору и на клеточную структуру коркового слоя и мякоть плода.

Разработан и изготовлен экспериментальный стенд для исследования продолжительности и плотности теплового потока при охлаждении плодов киви.

ви до  $0^{\circ}\text{C}$  при использовании различных вариантов охлаждения, а также электрических параметров ЭКСДВ (рис.1).

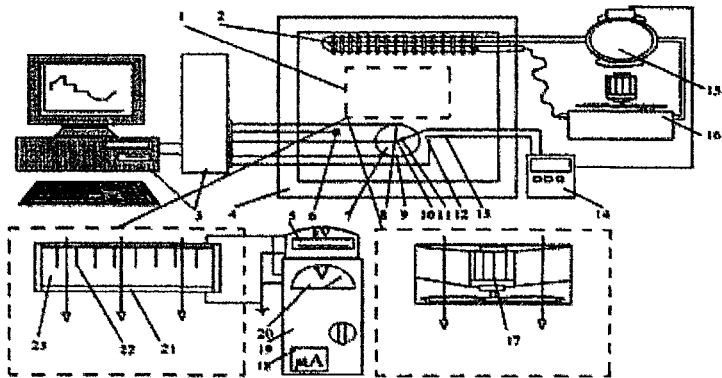


Рис.1. Экспериментальный стенд для исследования продолжительности и удельного теплового потока при охлаждении плодов киви до  $0^{\circ}\text{C}$  при использовании различных вариантов охлаждения и также для определения электрических параметров ЭКСДВ.

1 – вид системы охлаждения; 2 - охлаждающий прибор; 3 - компьютеризированная система мониторинга РМУ; 4 – холодильная камера; 5 – киловольтметр; 6 – датчик влажности; 7 - плод киви; 8 – датчик теплового потока; 9, 10, 11, 12, 13 – температурные датчики; 14 – контроллер; 15 – компрессор; 16 – воздушный конденсатор; 17- воздушная система охлаждения; 18 – микроамперметр; 19 - силовой выпрямитель ВС-20-10; 20 – вольтметр; 21 – заземлённый электрод; 22 – генерирующий игольчатый электрод; 23 – электроконвективная система для создания воздушного потока.

Объектом исследования служили плоды киви 7 с средним диаметром  $0,044\text{м}$ ., в центре и на поверхности которого размещали датчики температуры 9, 10, 11, 12, 13 и малогабаритные датчики теплового потока 8 площадью  $3,3 \times 10^{-4} \text{ м}^2$ . В холодильной камере 4, поддерживался температурный режим в пределах  $+1...-3^{\circ}\text{C}$  с помощью контроллера 14. Измерения температуры воздушной среды в экспериментальной холодильной камере проводились с помощью высокостабильных термисторов, с отрицательным температурным ко-

эффицентом сопротивления, фирмы Siemens модель S861. Контроль относительной влажности в камере осуществлялся датчиками 6 модели ННН-3602 фирмы Honeywell. Используемые в измерениях датчики ежемесячно тарировали (поверялись) с помощью прецизионного термогигрометра SRH-77А, с дополнительным контролем по образцовому лабораторному ртутному термометру ( $0..+55$  °С) с шагом делений  $0,1$  °С.

Все датчики температуры, влажности и теплового потока были подключены к компьютерной системе мониторинга РМУ (3), состоящей из серийно выпускаемой термостабильной платы ЛА70М4, обеспечивающей ввод в компьютер 16 аналоговых сигналов, преобразованных в цифровую форму. Система мониторинга РМУ позволяет сочетать в себе ряд функций: измерение заданных физических величин, визуализация и обработка информации, сигнализация при отклонении каких либо величин от первоначально заданных и сохранение собранной информации на жестком носителе. Помимо выполнения программ сбора данных, имеется возможность экспортировать результаты измерений в более развитые приложения, например электронные таблицы или программы построения диаграмм. Воздушный поток в холодильной камере создавался с помощью вентилятора 17 и ЭКСДВ 23. Электродная приставка «ЭКСДВ» представляет собой два параллельно расположенных: генерирующего игольчатого 22 и заземлённого сетчатого 21 электрода. Генерирующий электрод 22 выполнен из проволочных элементов  $D = 1,2$  мм укрепленных на диэлектрической раме с шагом 20мм. На каждом проволочном элементе перпендикулярно к поверхности электрода напаивались иглы с шагом 20 мм.

Заземлённый электрод 21 представляет собой металлическую сетку, изготовленную из провода  $D = 2$  мм с размером ячеек  $4 \times 4$  мм. Межэлектродное расстояние  $L = 21$  мм было выбрано как наиболее рациональное на основании литературных источников, габаритные размеры:  $120 \times 120$  мм, общая толщина приставки  $b = 60$  мм. Игла состоит из цилиндрической части высотой  $h_n = 27$  мм с закруглённым концом конического участка, угол конусности  $\beta = 40^\circ$ , диаметр  $d = 0,5$  мм. Для питания системы электродов было использовано выпрямительное высоковольтное устройство типа ВС-20-10 (19), предназначенное для питания различного рода аппаратов выпрямленным напряжением в диапазоне  $0...25$  кВ с возможностью заземления любого из полюсов.



В третьей главе представлены результаты экспериментальных и аналитических исследований. В настоящее время в открытой печати отсутствуют данные о таких важных характеристиках плодов киви, как их плотность ( $\rho$ ), теплоёмкость ( $c$ ), теплопроводность ( $\lambda$ ), паропроницаемость ( $\Pi$ ) и коэффициент температуропроводности ( $a$ ).

Эти данные необходимы при расчёте процесса охлаждения плодов киви. Расчет теплофизических характеристик (ТФХ) плодов киви выполнялся с использованием уравнений А.М. Бражникова и Н.Э. Каухчешвили, и результаты которых представлены в (табл.1).

Таблица 1.

**Теплофизические характеристики плода киви.**

Класс продукта	Исходные		Опытные	Расчётные							
	$W_{фр}$ , %	$t_{фр}$ , °C		$\Pi$ , г/дм <sup>2</sup>	$D$ , м	$S$ , м <sup>2</sup>	$V$ , м <sup>3</sup>	$m$ , кг	$\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	$c$ , $\frac{Дж}{кг \cdot K}$	$\lambda$ , $\frac{Вт}{м \cdot K}$
П <sub>4</sub>	85,3	-1,8	2,1	0,044	$1,5 \cdot 10^{-3}$	$0,046 \cdot 10^{-3}$	$5 \cdot 10^{-2}$	1079	3572	0,494	$1,29 \cdot 10^{-7}$
П <sub>11</sub>	82,5	-1,8	2,1	0,044	$1,5 \cdot 10^{-3}$	$0,046 \cdot 10^{-3}$	$5 \cdot 10^{-2}$	1074	3454	0,477	$1,30 \cdot 10^{-7}$
П <sub>12</sub>	86,3	-1,8	2,1	0,044	$1,5 \cdot 10^{-3}$	$0,046 \cdot 10^{-3}$	$5 \cdot 10^{-2}$	1080	3622	0,502	$1,29 \cdot 10^{-7}$

В результате исследования паропроницаемости оболочки киви было установлено, что за 24 часа через кожуру контрольного образца киви при комнатной температуре теряется 0,21 кг влаги с 1 м<sup>2</sup>, и усушка составляет 0,63%. Через сутки усушка увеличивалась практически в 2 раза. Определение паропроницаемости проводили весовым методом по ГОСТУ 21472-81.

Исследование двух вариантов расположения плодов киви (рис.2) при вертикальном положении штабеля выявило в качестве наиболее рационального - расположение, при котором плоды киви соприкасаются друг с другом в местах расположения плодоножек, так как они менее всего подвержены деформации. В качестве менее рационального расположения плодов является вариант, когда плоды соприкасаются друг с другом боковыми поверхностями, так как именно в этих местах возникали вмятины,

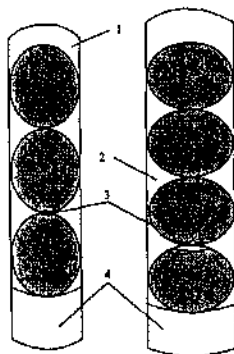


Рис.2. Варианты вертикального штабелирования плодов киви.

1 – расположение киви при касании плодоножками; 2 – расположение киви при касании боковыми поверхностями; 3 – место деформирования поверхности плодов киви; 4- картонная перфорированная упаковка.

На рис.3. представлена вольт-амперная характеристика (ВАХ) электродной приставки ЭКСДВ. Анализ вольт-амперных характеристик показал, что с увеличением напряжения, подаваемого на электродную приставку, сила тока в межэлектродном пространстве возрастает, причём увеличивать напряжение целесообразно только до значения  $U = 16$  кВ (для  $h = 21$  мм), так как выше этого значения возникает пробой между электродами и величина силы тока резко возрастает. Следует отметить наличие эффективной зоны ВАХ используемой в процессе охлаждения плодов киви. Как видно из рис. 3 - это зона развитого коронного разряда, которая начинается со значения напряжения  $U = 11,5$  кВ, а прекращается при возникновении пробоя.

По результатам исследований ВАХ характеристики электродной приставки была получена следующая эмпирическая зависимость (1):

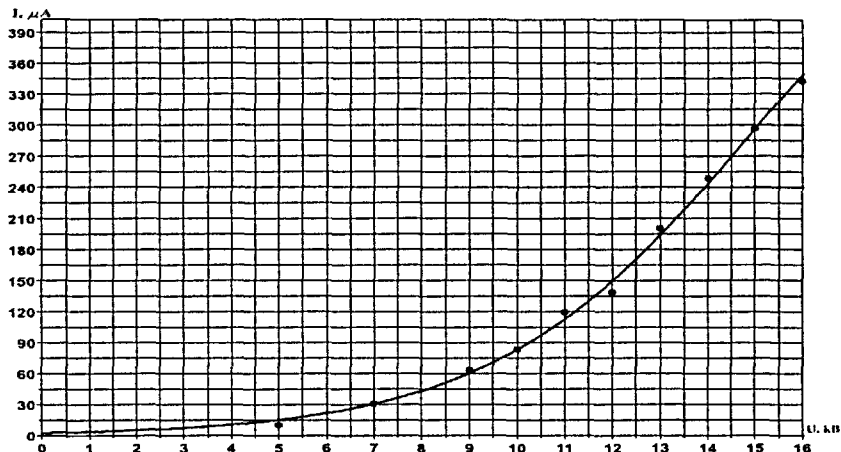


Рис. 3. Вольт-амперная характеристика ЭКСДВ.

$$I = \frac{580,94}{1 + 233,33 \cdot e^{-0,37 \cdot U}} \quad (1)$$

(стандартная ошибка  $S=6,196$ ; коэффициент корреляции  $r = 0,999$ )

С целью выявления рационального варианта организации процесса охлаждения плодов киви были рассмотрены: электроконвективная система для создания воздушного потока, воздушная система охлаждения с использованием вентилятора и естественное охлаждение. Для оценки данных вариантов охлаждения по полученным экспериментальным данным были построены графические зависимости:  $t_n = f(\tau)$ ,  $t_{ц} = f(\tau)$  - изменения температуры на поверхности и, в центре плода киви до достижения  $0^{\circ}\text{C}$  от продолжительности охлаждения (рис.4, рис.5).

В качестве контрольного способа охлаждения было принято естественное охлаждение без дополнительных интенсификаторов холодильного процесса. Как видно из рис. 4, при естественном охлаждении продолжительность холодильного процесса максимальная, т.е. через 140 минут охлаждения температура поверхности плода киви достигает  $0^{\circ}\text{C}$ . В свою очередь, минимальная

продолжительность охлаждения наблюдается при использовании электроконвекции при  $U = 15$  кВ и составляет 93 минут, что на 33% меньше, чем при естественной конвекции. Так же, интересно сравнить между собой продолжительность воздушного охлаждения с использованием вентилятора и продолжительность охлаждения с использованием электроконвекции при  $U = 11,5$  кВ, учитывая тот факт, что их скоростные показатели одинаковы и равны  $v = 1,5$  м/с. Отметим что, продолжительность охлаждения с использованием электроконвекции при  $U = 11,5$  кВ на 21,6% меньше, чем при воздушном охлаждении с использованием вентилятора и на 30% меньше, чем при естественной конвекции, что, несомненно, выявляет преимущество использования электроконвективной системы движения воздуха (ЭКСДВ), как наиболее эффективного интенсификатора холодильного процесса при выполнении условия равенства их скоростных показателей.

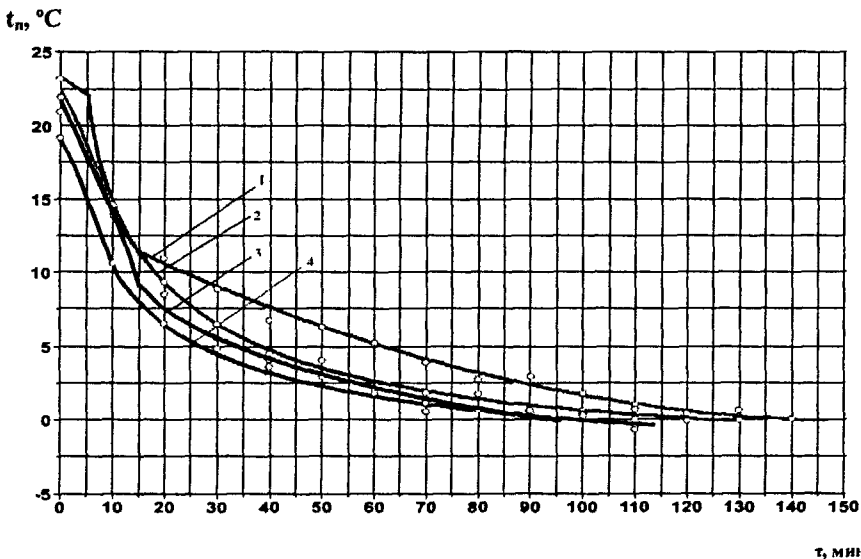


Рис.4. Зависимость изменения температуры поверхности ( $t_n$ ) плода киви до  $t_n = 0$  °C от продолжительности охлаждения ( $\tau$ ): 1 – естественная конвекция; 2 – с использованием вентилятора; 3; 4 – при применении электроконвекции ( $U=11,5; 15$ кВ).

Разработанное устройство (ЭКСДВ) позволяет создать условия электроконвекции за счет наличие ионов. Такой эффект обусловлен интенсивным движением ионизированного воздуха вокруг плода, при этом ионы стремятся рекомбинироваться при осаждении на поверхности плода, что приводит к увеличению турбулентности и разрушению пограничного слоя, а следовательно, и к возрастанию коэффициента теплоотдачи. Применение ЭКСДВ позволяет повысить скорость электрического ветра до 2,5...3 м/с и зависит от начала возникновения пробоя между электродами, но и этой скорости достаточно для интенсификации охлаждения плодов киви. По результатам опытов получены эмпирические зависимости изменения температуры на поверхности ( $t_n$ ) плода киви до  $t_n = 0^\circ\text{C}$  от продолжительности охлаждения ( $\tau$ ):

а) при естественной конвекции

$$t_1 = \frac{22,34 + 0,55 \cdot \tau}{1 + 0,05 \cdot \tau + 0,01 \cdot \tau^2}, \quad 0 \leq \tau \leq 15 \quad (2)$$

$$t_2 = 13,99 - 0,18 \cdot \tau + 0,001 \cdot \tau^2, \quad 15 \leq \tau \leq 170 \quad (3)$$

б) с использованием вентилятора

$$t_1 = 23,212 - 0,235 \cdot \tau, \quad 0 \leq \tau \leq 5 \quad (4)$$

$$t_2 = 19,607 - 0,638 \cdot \tau + \frac{146,242}{\tau^2}, \quad 5 \leq \tau \leq 12 \quad (5)$$

$$t_3 = \frac{0,112 + 235 \cdot \tau^{-1,106}}{0,043 + \tau^{-1,106}}, \quad 12 \leq \tau \leq 134 \quad (6)$$

в) при электроконвекции ( $U = 11,5$  кВ)

$$t_1 = \frac{21,708 + 0,145 \cdot \tau}{1 - 0,013 \cdot \tau + 0,001 \cdot \tau^2}, \quad 0 \leq \tau \leq 15 \quad (7)$$

$$t_2 = 22,294 - 4,908 \ln \tau, \quad 15 \leq \tau \leq 115 \quad (8)$$

г) при электроконвекции ( $U = 15$  кВ)

$$t_1 = \frac{19,064 + 0,145 \cdot \tau}{1 + 0,014 \cdot \tau + 0,005 \cdot \tau^2}, \quad 0 \leq \tau \leq 11 \quad (9)$$

$$t_2 = \frac{-0,88 + 26,20 \cdot \tau^{-0,74}}{0,2 + \tau^{-74}}, \quad 11 \leq \tau \leq 127 \quad (10)$$

(стандартная ошибка  $S=0,077\dots0,540$ ; коэффициент корреляции  $r = 0,968\dots0,999$ )  
 $t_{ц}, ^\circ\text{C}$

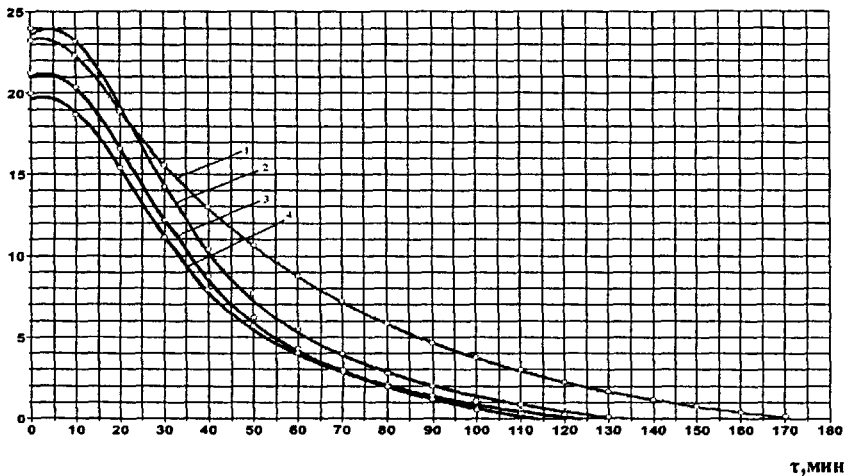


Рис. 5. Зависимость изменения температуры в центре плода киви до  $t_{ц} = 0^\circ\text{C}$  от продолжительности охлаждения. 1 – естественная конвекция; 2 – с использованием вентилятора; 3; 4 – при применении электроконвекции ( $U=11,5; 15$  кВ).

Из рис. 5, видно, что наиболее интенсивно температура в центре плода киви понижается при использовании ЭКДВС с напряжением  $U = 15$  кВ, при этом продолжительность процесса сокращается на 32,6%; в случае если напряжение понижается до  $U = 11,5$  кВ, ускорение процесса составляет 27%. Учитывая, что при воздушном охлаждении с использованием вентилятора и при охлаждении с использованием электроконвекции при  $U = 11,5$  кВ, воздушный поток создается с одинаковой скоростью  $v = 1,5$  м/с, то более эффективным следует считать применение ЭКДВ, так как продолжительность охлаждения при электроконвекции ( $U = 11,5$  кВ) на 8% меньше, чем при воздушном охлаждении с использованием вентилятора.

По результатам опытов получены эмпирические зависимости изменения температуры в центре плода киви до  $t_u = 0^{\circ}\text{C}$  от продолжительности охлаждения:

а) при естественной конвекции

$$t_1 = 19,151 + 4,205 \cdot \cos(0,089 \cdot \tau - 0,172), \quad 0 \leq \tau \leq 27 \quad (11)$$

$$t_2 = \frac{26,15 - 0,15 \cdot \tau}{1 + 9,69 \cdot 10^{-5} \cdot \tau^2}, \quad 27 \leq \tau \leq 170 \quad (12)$$

б) с использованием вентилятора

$$t_1 = 17,794 + 6,169 \cdot \cos(0,084 \cdot \tau - 0,3251), \quad 0 \leq \tau \leq 33 \quad (13)$$

$$t_2 = \frac{1839604 - 3,377 \cdot \tau^{1,289}}{23,157 + \tau^{1,289}}, \quad 33 \leq \tau \leq 133 \quad (14)$$

в) при электроконвекции ( $U = 11,5 \text{ кВ}$ )

$$t_1 = 15,455 + 5,766 \cdot \cos(0,080 \cdot \tau - 0,234), \quad 0 \leq \tau \leq 33 \quad (15)$$

$$t_2 = -4,761 + \frac{541,492}{\tau}, \quad 33 \leq \tau \leq 114 \quad (16)$$

г) при электроконвекции ( $U = 15 \text{ кВ}$ )

$$t_1 = 14,184 + 5,593 \cdot \cos(0,078 \cdot \tau - 0,177), \quad 0 \leq \tau \leq 33 \quad (17)$$

$$t_2 = -3,76 + \frac{46316}{\tau}, \quad 33 \leq \tau \leq 124 \quad (18)$$

(стандартная ошибка  $S = 0,044 \dots 0,205$ ; коэффициент корреляции  $r = 0,998 \dots 0,999$ )

В работе получены значения удельного теплового потока ( $q$ ) при охлаждении плода киви до  $t_u = 0^{\circ}\text{C}$  при использовании электроконвекции, естественно-го и воздушного способов охлаждения. На рис.6 представлен график  $q = f(\tau)$  - зависимости плотности удельного теплового потока от продолжительности процесса. Как показали результаты исследований, продолжительность охлаждения плодов киви в зависимости от параметров электроконвективной среды ( $U = 11,5; 15 \text{ кВ}$ ) сокращается на поверхности на 30...33,6%,

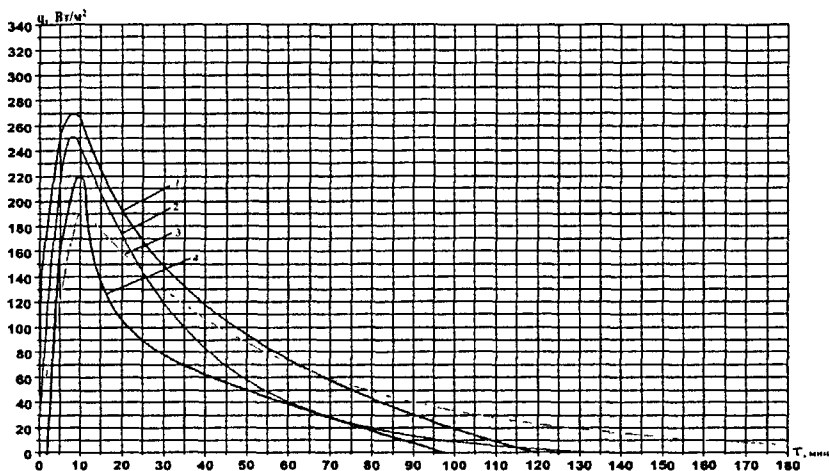


Рис.6. Зависимость плотности удельного теплового потока ( $q$ ) от продолжительности ( $t$ ) при различных вариантах охлаждения киви. 1; 2 – с использованием электроконвекции при ( $U=11,5; 15$  кВ); 4 – с использованием вентилятора; 3- естественная конвекция.

в центре плода на 27...32,6% по сравнению с естественной конвекции; а при использовании вентилятора с одинаковой скоростью с ЭКСДВ ( $v_{\text{вент}} = v_{\text{эксдв}} = 1,5$  м/с), продолжительность процесса сокращается на 21,6% на поверхности и на 8% в центре плода. Плотность удельного теплового потока возрастает на 28...33,3%. Максимальное значение  $q$  наблюдается через 8...10 мин с момента охлаждения и достигает 250...270 Вт/м<sup>2</sup> при охлаждении с использованием электроконвекции и 180...220 Вт/м<sup>2</sup> в отсутствие электроконвекции, т.е. при охлаждении с использованием электроконвекции плотность удельного теплового потока возрастает почти в 1,4...1,5 раза. При охлаждении с использованием вентилятора с одинаковой скоростью с ЭКСДВ при  $U = 11,5$ кВ ( $v_{\text{эксдв}} = 1,5$  м/с), плотность теплового потока возрастает на 12%. Анализ полученных экспериментальных данных показал, что наибольшая эффективность наблюдается при охлаждении с использованием электроконвекции.



По полученным опытным данным предложены эмпирические зависимости:

- при естественной конвекции

$$q_1 = \frac{31,665 + 17,278 \tau}{0,975 + 0,003 \tau^2}, \quad 0 \leq \tau \leq 10 \quad (19)$$

$$q_2 = \frac{236279 - 1,014 \tau}{1 + 0,00015 \tau^2}, \quad 10 \leq \tau \leq 170 \quad (20)$$

- с использованием вентилятора

$$q_1 = \frac{320,03 + 336,01 \cdot \tau^{1,595}}{8,65 + \tau^{1,595}}, \quad 0 \leq \tau \leq 10 \quad (21)$$

$$q_2 = \frac{317733 - 2,363 \tau}{1 + 0,001 \tau^2}, \quad 10 \leq \tau \leq 134 \quad (22)$$

- с использованием электроконвекции при  $U = 11,5$  кВ

$$q_1 = \frac{6147 + 54835 \cdot \tau}{1 + 2,49 \tau - 0,08 \cdot \tau^2}, \quad 0 \leq \tau \leq 9 \quad (23)$$

$$q_2 = 516,6 - 108,03 \cdot \ln \tau, \quad 9 \leq \tau \leq 119 \quad (24)$$

- с использованием электроконвекции при  $U = 15$  кВ

$$q_1 = -47,58 + 23,06 \cdot \tau + 0,33 \cdot \tau^2, \quad 0 \leq \tau \leq 8 \quad (25)$$

$$q_2 = 92,9 - 0,96 \tau + \frac{1305 \tau}{\tau^2}, \quad 8 \leq \tau \leq 98 \quad (26)$$

(стандартная ошибка  $S = 1,198 \dots 23,366$ ; коэффициент корреляции  $r = 0,886 \dots 0,999$ )

В работе также проводились исследования по изучению влияния напряжённости поля электроконвективной системы движения воздуха (ЭКСДВ) при средней температуре в камере  $t_{cp} = -1^\circ\text{C}$ . Зависимость продолжительности охлаждения плодов киви до  $t_{ц} = 0^\circ\text{C}$  от напряжённости поля между электрода-

ми показана на рис.7. С увеличением средней напряжённости поля в межэлектродном пространстве ЭКСДВ продолжительность охлаждения плодов киви до  $0^{\circ}\text{C}$  уменьшается. В связи с этим, наиболее рациональные значения напряжённости поля  $E$  в пределах  $547,6\dots 714,3$  кВ/м что соответствует  $114\dots 124$  мин продолжительности процесса охлаждения.

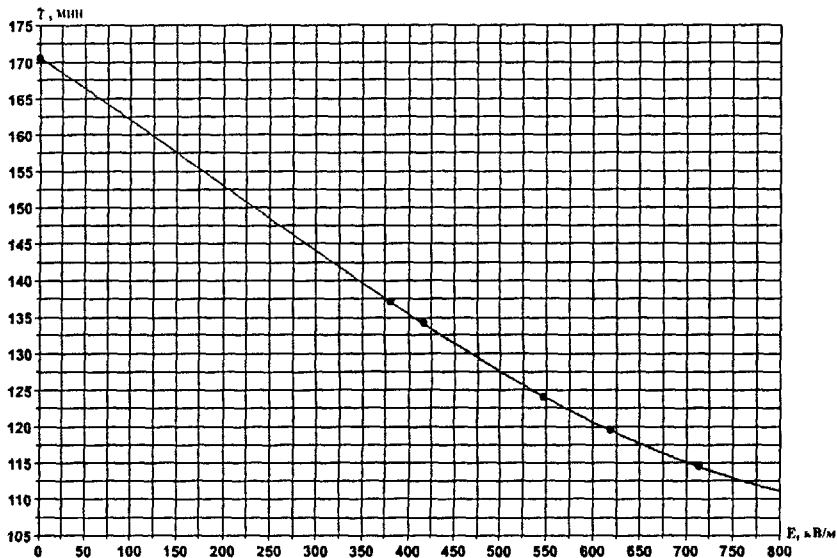


Рис.7. Зависимость продолжительности ( $\tau$ ) процесса охлаждения плодов киви до  $t_{\text{ц}} = 0^{\circ}\text{C}$  от напряжённости ( $E$ ) поля создаваемой ЭКСДВ.

По результатам экспериментальных данных получена эмпирическая зависимость:

$$\tau = 152,619 + 44,125 \cdot \cos(0,002 \cdot E + 1,152) \quad (27)$$

(стандартная ошибка  $S=0,009$ ; коэффициент корреляции  $r = 0,999$ )

**В процессе определения степени зрелости плода киви были выявлены предельные напряжения сдвига неразрушенной структуры плода по центру ( $\theta_{0\text{ц}}$ ) и боковой ( $\theta_{0\text{б}}$ ) поверхности; результаты приведены в (табл. 2).**

**Значений предельных напряжений сдвига не разрушенной структуры плода по центру и боковой поверхности.**

$\theta_{об}$ (Па) экпер.	$\theta_{оц}$ (Па) экпер.	$\theta_{оц}$ (Па) расч.	Ошибка расчета %	$K = \frac{\theta_{оц_{эксп}}}{\theta_{об_{эксп}}}$
13468	60204	60278	0,12	4,47
9105	33386	34157	2,3	3,66
4364	12938	12933	0,04	2,96

где, К – коэффициент степени зрелости плода.

По полученным данным построена гистограмма зависимости предельного напряжения от степени зрелости плода (рис.8) и график зависимости предельного напряжения сдвига плода по центру от предельного напряжения сдвига его по боковой поверхности (рис.9).



**Рис. 8** Гистограмма зависимости предельного напряжения плода от степени зрелости плода.

Анализ показал что, предельное напряжение сдвига структуры ткани плода по центру значительно выше, чем по его боковой поверхности. Это связано с тем, что плод имеет более высокую жёсткость в центре, чем в боковой поверхности. Для исследуемой партии плодов киви прочность изменялась от 4000 Па до 60000 Па. Получена эмпирическая зависимость предельного на-

пряжения сдвига плода по центру от предельного напряжения сдвига по боковой поверхности:

$$\theta_{0ц} = 166 \cdot 10^{-6} \cdot \theta_{0б}^2 + 2,24 \cdot \theta_{0б} . \quad (28)$$

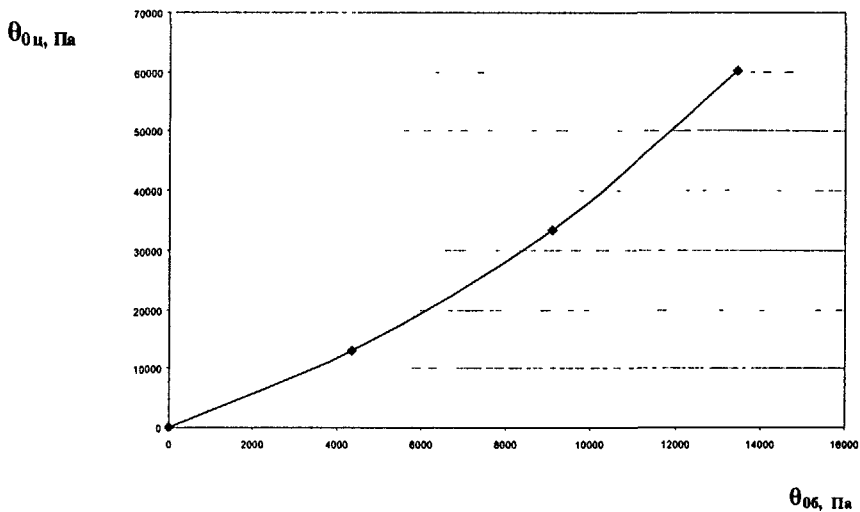


Рис.9. Зависимость предельного напряжения сдвига плода по центру от предельного напряжения сдвига его по боковой поверхности.

Проведённые исследования рассмотренного способа показали его эффективность и возможность оценивать степень зрелости плода киви по величине динамического предельного напряжения сдвига, который является чувствительной величиной. С использованием полученных значений коэффициента (К) определена степень зрелости плода киви:

при  $K \geq 4,0$  – плод незрелый;

при  $3,2 < K < 4,0$  – плод нормальной зрелости;

при  $K \leq 3,2$  – плод перезрелый.

**Результаты микробиологических исследований** воздействия электроконвективной среды на поверхностную и внутреннюю микрофлору плодов киви представлены в табл.2., из которой видно, что уже через 15 минут отмирают представители более чувствительной микрофлоры, количество которых

уменьшилось в 20...58 раз по сравнению с контрольным образцом. Через 30...45 минут обработки эффективность отмирания микрофлоры менее выражена, что объясняется отмиранием более устойчивых микроорганизмов (спорообразующих), которые не погибли под воздействием электроконвекции в течение первых 15-ти минут.

Применение ЭКСДВ для снижения развития микрофлоры на плодах киви показало, что в течении 15-ти минутного воздействия ионного потока на кожуру и мякоть плода бактерицидный эффект составляет 95 ... 98 % (рис. 10), при этом инактивация микрофлоры у мякоти плода наступила через 30 минут, а у оболочки плода уже через 45 минут, что указывает на перспективность использования ЭКСДВ в камерах охлаждения плодов киви, учитывая, что продолжительность охлаждения плодов киви составляет более 1-ого часа.

Таблица 3.

**Результаты воздействия ЭКСДВ на поверхностную и внутреннюю микрофлору плода киви.**

Продолжительность обработки $\tau$ , мин	Количество бактерий X в 1 г продукта	
	Оболочка плода	Мякоть плода
0	$200 \times 10^3$	$25 \times 10^3$
15	$10 \times 10^3$	$0,42 \times 10^3$
30	$7,6 \times 10^3$	$0,30 \times 10^3$
45	$2,6 \times 10^3$	$0,23 \times 10^3$

На основании полученных результатов, выведены эмпирические зависимости, позволяющие рассчитать концентрацию микрофлоры N в любой момент  $\tau$  обработки плода киви в электроконвективной среде при известной исходной концентрации микрофлоры  $N_0$ :

микрофлора на поверхности:

$$N = \frac{N_0}{1 + 1,76 \cdot \tau^{0,86}} \quad (29)$$

микрофлора на мякоти:

$$N = \frac{N_0}{1 + 13.57 \cdot \tau^{0.54}} \quad (30)$$

(стандартная ошибка  $S=0,0004+0,0120$ ; коэффициент корреляции  $r = 0,999$ )

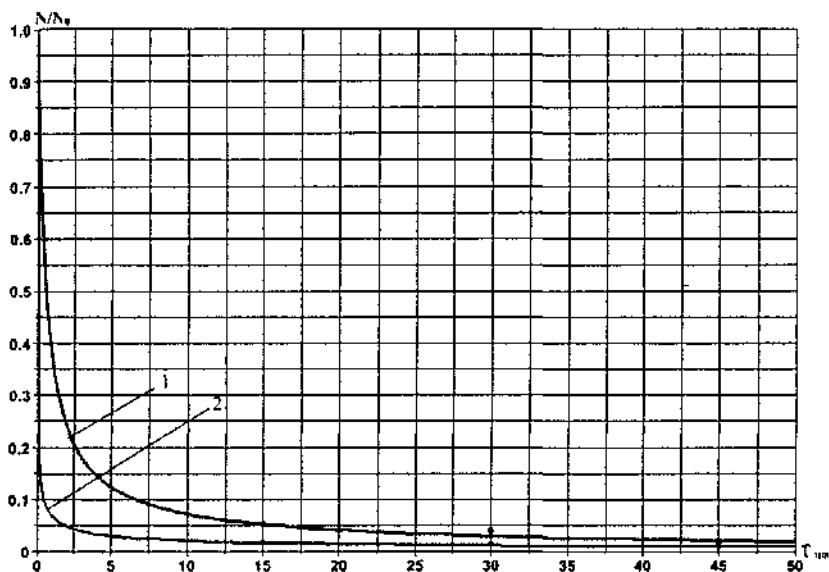
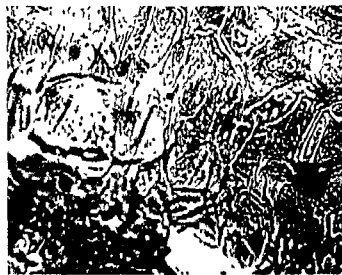


Рис.10. Выживаемость микроорганизмов ( $N/N_0$  – отношение концентрации микроорганизмов в момент времени  $\tau$  к исходной концентрации микроорганизмов). 1 – на поверхности плода; 2 – на мякоти плода.

Результаты гистологических исследований воздействия электроконвективной среды на клеточную структуру представлены на рис.11. Анализ показал, что после обработки плодов с ЭКСДВ, структура клеток поверхностных, средних и центральных слоев аналогична таковым в плодах без обработки. Округлые клетки плотно прилегают друг к другу, деструктивных изменений в их структуре не выявлено. Вытянутые клетки средних слоев сохраняют характерную для них форму, целостность структурных элементов клеток не нарушена. Структура клеток центральных слоев аналогична таковым в плодах без обработки. Округлые клетки плотно прилегают друг к другу, деструктивных изменений в их структуре не выявлено.



Радиальный слой от центра до обработки



Центральный слой до обработки



Радиальный слой от центра после обработки



Центральный слой после обработки

Рис. 11. Клеточная структура плода киви до и после обработки с ЭКСДВ.

В четвёртой главе представлено техническое решение и конструктивное оформление камеры охлаждения плодов киви. Камера предусматривает охлаждение циркулирующего воздуха с помощью потолочных батарей, а циркуляция воздуха осуществляется с помощью ЭКСДВ (рис.12).

Ёмкость камеры составляет 200 кг, скорость воздушного потока омывающего плоды киви до  $v = 2,5$  м/с. В камере установлены напольные тележки: 2 ряда по 5 тележек. На каждой тележке предусмотрено три яруса, на которых подвешиваются вертикально упакованные в сетку по 5 штук плоды киви. Продолжительность охлаждения киви составляет  $\tau = 114$  мин, а с учетом времени загрузки и выгрузки тележек из камеры продолжительность цикла охлаждения в среднем составляет  $\tau = 3$  ч. Учитывая размеры тележки 800x800x1600 мм, проходы от стен и между рядами, а также расстояние между тележками в одном ряду, внутренние размеры камеры составляют: длина  $l_{\text{кам}} = 5$  м, ширина  $b_{\text{кам}} = 2,5$  м, высота,  $h_{\text{кам}} = 3$  м.

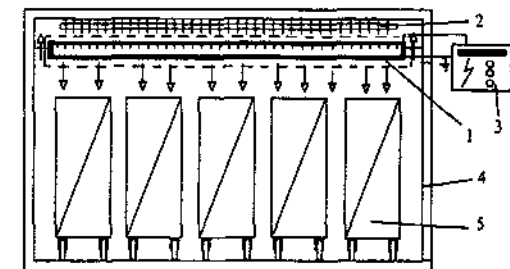


Рис. 13. Камера охлаждения туннельного типа с охлаждающей батареей и ЭКСДВ: 1 - ЭКСДВ; 2 - охлаждающая батарея; 3 - источник питания; 4 - камера охлаждения; 5 - тележка.

ЭКСДВ представляет собой два параллельно расположенных электрода: генерирующего игольчатого и заземлённого сетчатого. Генерирующий электрод выполнен из проволочных медных отрезков  $D = 1,2$  мм укрепленных на диэлектрической раме с шагом 20 мм. На каждом проволочном элементе перпендикулярно к поверхности электрода напаявались иглы с шагом 20 мм. Заземлённый электрод представляет собой металлическую сетку, изготовленную из проводов  $D = 2$  мм с размером ячеек  $4 \times 4$  мм, расположенную на раме, межэлектродное расстояние  $L = 21$  мм, габаритные размеры  $4 \times 1,6$  м. Блок питания выносной и крепится на стене. Выходная мощность источника питания  $N_{\text{ист}} = 0,9$  кВт.

Получены сравнительные данные технико-экономического анализа камеры охлаждения, оборудованной двумя вариантами охлаждающего оборудования: камера охлаждения с настенными воздухоохладителями и камера охлаждения с потолочными батареями и ЭКСДВ: снижение энергозатрат в 2...2,5 раз и приведенный затрат на 17%. В работе рассмотрены меры безопасности при эксплуатации источника питания для ЭКСДВ.

#### ВЫВОДЫ

1. Разработанные экспериментальный стенд и методики проведения исследований можно рекомендовать для постановки учебных и лабораторно-исследовательских работ с целью изучения процесса электроконвективного теплообмена применительно к области холодильной техники и технологии.



2. Обоснован, с использованием результатов исследований паролпроницаемости оболочки плодов киви, рациональный вариант их расположении в штабеле при охлаждении – вертикальный, при этом плоды киви соприкасаются в местах расположении плодоножек.
3. Получены значения вольт-амперной характеристики ЭКСДВ, и на их базе эмпирическая зависимость, которые позволили определить эффективную зону, используемую в процессе охлаждения плодов киви.
4. Получены графические зависимости температуры на поверхности ( $t_n$ ) и в центре ( $t_c$ ) плода киви, а также теплового потока ( $q$ ) от продолжительности процесса и на их базе эмпирические зависимости для следующих вариантов организации охлаждения: с использованием электроконвекции, воздушной и с естественной циркуляцией.
5. Доказано на базе полученных экспериментальных данных, что охлаждение с использованием электроконвекции при ( $U = 11,5 \text{ кВ}$ ), позволяет сократить продолжительность процесса охлаждения плодов киви до  $t_n = 0 \text{ }^\circ\text{C}$  на 21,6% по сравнению с воздушным, с использованием вентилятора с одинаковой скоростью и на 30% при естественном воздушном варианте.
6. Получены на базе экспериментальных данных, графическая и эмпирическая зависимости продолжительности ( $\tau$ ) плодов киви от напряжённости ( $E$ ) поля между электродами ЭКСДВ, позволяющие выявить рациональные значения ( $E = 547,6 \dots 714,3 \text{ кВт/м}$ ), соответствующие процессу ( $\tau = 114 \dots 124 \text{ мин}$ ).
7. Получены, с использованием физико-механического метода значения предельных напряжений сдвига неразрушенной структуры киви, позволяющие определить коэффициент ( $K$ ) и на его основе шкалу степени зрелости плода. Подана заявка на изобретение № 2002109409 от 12.04.2002 «Способ определения степени зрелости киви».
8. Доказано на основе микробиологических и гистологических исследований, что использование для охлаждения плодов киви ЭКСДВ сохраняет их клеточную структуру, и в силу бактерицидного эффекта снижает поверхностную и внутреннюю микрофлору.

9. Разработано конструктивное решение холодильной камеры для плодов киви, с использованием ЭКСДВ для циркуляции воздуха.

### **Перечень опубликованных по диссертации работ**

1. Бабакин Б.С.; Мизерецкий Н.Н., Смирнов В.В., Зохун М.Б., Колиева В.Б. Холодильная обработка плодов манго и киви в условиях электроконвекции «Проблемы совершенствования холодильной техники и технологии» Сборник научных трудов, Выпуск 1, МГУПБ, М.:1999. – С. 92.
2. Зохун М.Б., Мизерецкий Н.Н., Смирнов В.В. «Особенности охлаждения многоядных упаковок тропических фруктов (киви)» Пищевой белок и экология. «Материалы четвертой международной научно-технической конференции, М. :2001, С.195
3. Зохун М.Б., Мизерецкий Н.Н., Смирнов В.В. «Некоторые геометрические и физико-химические характеристики плодов киви», «Естественные и технические науки», М. :2002. - № 2(2). – С.74-76.
4. Зохун М.Б., Мизерецкий Н.Н., Смирнов В.В. «Гистологическое исследование плодов киви», «Естественные и технические науки», М.:2002. - № 2(2).– С.39.
5. Зохун М.Б., Мизерецкий Н.Н., Степаненко П.П. «Микробиологические исследования плодов киви», «Естественные и технические науки», М. :2002.-№ 2(2).- С. 30-31.
6. Заявка РФ на изобретение № гос. регистрации 2002109409 от 12.04.2002«Способ определения степени зрелости плодов киви»/ Зохун М.Б., Мизерецкий Н.Н., Косой В.Д./ RU BZ1A № 34, опуб.10.12.2002 – М.: ФИПС, 2002.-С.3.
7. Бабакин Б.С; Мизерецкий Н.Н, Смирнов В.В., Зохун М.Б. Экспериментальный стенд для исследования процесса охлаждения плодов киви с использованием электроконвекции. «Проблемы совершенствования холодильной техники и технологии» Сборник научных трудов, Выпуск 2, МГУПБ, М.:2003. – С.109 – 112.
8. Бабакин Б.С; Мизерецкий Н.Н., Зохун М.Б. Эффективность способов создания воздушного потока при охлаждении плодов киви. «Проблемы совершенствования холодильной техники и технологии» Сборник научных трудов, Выпуск 2, МГУПБ, М.:2003. – С. 113 – 116.

9. Бабакин Б.С; Мизерецкий Н.Н, Зохун М.Б. Влияние напряжённости поля на продолжительность охлаждения плодов киви. «Проблемы совершенствования холодильной техники и технологии» Сборник научных трудов, Выпуск 2, МГУПБ, М.:2003. – С. 117.
10. Бабакин Б.С; Мизерецкий Н.Н, Зохун М.Б. Исследование зависимости плотности теплового потока от продолжительности процесса при различных вариантах охлаждения плодов киви. «Проблемы совершенствования холодильной техники и технологии» Сборник научных трудов, Выпуск 2, МГУПБ, М.:2003. – С. 118 – 119.
11. Бабакин Б.С; Мизерецкий Н.Н, Степаненко П.П.; Зохун М.Б. Воздействие электроконвективной среды на поверхностную и внутреннюю микрофлору плодов киви. «Проблемы совершенствования холодильной техники и технологии» Сборник научных трудов, Выпуск 2, МГУПБ, М.:2003. – С. 120 – 121.

### Условные обозначения

$v$  – скорость воздушного потока, м/с;  $v_{\text{эксдв}}$  – скорость ЭКСДВ;  $h$  – шаг игл, мм;  $L$  – расстояние между электродами, мм;  $d$  – диаметр игл, мм;  $h_{\text{ц}}$  – высота цилиндрической части иглы;  $b$  – толщина приставки, мм;  $q$  – плотность удельного теплового потока, Вт/м<sup>2</sup>;  $t_{\text{п}}$  – температура поверхности продукта, °С;  $t_{\text{ц}}$  – температура в центре продукта, °С;  $t_{\text{с}}$  – температура среды;  $t$  – температура, °С;  $t_{\text{кр}}$  – температура криоскопическая, °С  $D$  – диаметр, мм;  $\beta$  – конусность, град;  $\theta_0$  – предельное напряжение сдвига не разрушенной структуры, Па;  $\Pi$  – паропроницаемость, г/дм<sup>2</sup>;  $\varphi$  – относительная влажность, %;  $\tau$  – продолжительность;  $c$  – удельная теплоемкость, кДж/(кг·К);  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К);  $a$  – коэффициент температуропроводности, м<sup>2</sup>/с;  $\rho$  – плотность, кг/м<sup>3</sup>;  $W$  – влажность продукта, %;  $U$  – напряжение, кВ;  $t$  – температура, °С;  $S$  – площадь, м<sup>2</sup>,  $R$  – радиус, м;  $m^2$ ;  $I$  – сила тока,  $\mu\text{A}$ ;  $E$  – напряжённость, кВ/м;  $K$  – коэффициент степени зрелости;  $N$  – концентрация микроорганизмов в момент  $\tau$ , КОЕ/г;  $N_0$  – исходная концентрация микроорганизмов, КОЕ/г;  $l$  – длина, м;  $h$  – высота, м;  $b$  – ширина, м; кВт;  $N_{\text{ист}}$  – мощность источника питания, кВт;

Подписано в печать 25.06.2003 г. Формат 60x84 1/16

Печать лазерная. Объем 1,5 пл. Заказ 177 Тираж 100

Государственное унитарное полиграфическое предприятие «Печатник»,  
109316 Москва, ул. Талалихина, 33

# 12101

2003-A  
12101