

На правах рукописи



Кузнецов Евгений Петрович

**ТЕРМОДИНАМИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ РЕЖИМОВ
РАБОТЫ СИСТЕМ ОБЕСПЕЧЕНИЯ МИКРОКЛИМАТА
ХРАНИЛИЩ БИОЛОГИЧЕСКИ АКТИВНОЙ ПРОДУКЦИИ**

05.23.03 – Теплоснабжение, вентиляция, кондиционирование воздуха, газо-
снабжение и освещение

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Пенза – 2016

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Тольяттинский государственный университет»

Научный руководитель кандидат технических наук, доцент
Кучеренко Мария Николаевна

Официальные оппоненты: **Бодров Михаил Валерьевич**,
доктор технических наук, ФГБОУ ВО «Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет», профессор кафедры «Отопление и вентиляция»

Мансуров Рустам Шамильевич,
кандидат технических наук, доцент, ФГБОУ ВО «Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (СИБСТРИН)», заведующий кафедрой «Теплогазоснабжение и вентиляция»

Ведущая организация: ФГБОУ ВО «Тюменский индустриальный университет»

Защита состоится «24» ноября 2016 г. в 16:00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.184.02 на базе ФГБОУ ВО «Пензенский государственный университет архитектуры и строительства» по адресу: 440028, г.Пенза, ул.Германа Титова, 28, 1 корпус, конференц-зал.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Пензенский государственный университет архитектуры и строительства» и на сайте <http://dissovet.pguas.ru/>.

Автореферат разослан « ____ » _____ 2016г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



М.В. Бikuнова

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Хранение сочного растительного сырья часто сопровождается повышенными потерями. Изменение параметров воздуха в слое хранящейся продукции за счет выделения продукцией в процессе дыхания теплоты и влаги, вызывает значительные отклонения параметров микроклимата от рекомендуемых норм, что порождает увядание или отпотевание сырья даже при использовании искусственного холода и современной техники систем обеспечения параметров микроклимата.

Повышение требований к обеспеченности тепловлажностных параметров микроклимата в хранилище приводит к необходимости исследований теплофизических характеристик продукции, процесса тепломассопереноса в системе «поверхность сочного растительного сырья – влажный воздух», выявления количественных характеристик движущих сил тепломассопереноса. Применение теории тепломассопереноса в вопросе поддержания оптимальных тепловлажностных параметров микроклимата при хранении сочного растительного сырья является нестандартной и недостаточно изученной задачей.

Интенсивность испарения влаги с поверхности картофеля и овощей зависит от многих частных явлений, которые трудно поддаются изучению. Поэтому нахождение закономерностей тепловлагообмена должно базироваться на наиболее общем термодинамическом подходе, позволяющем отказаться от анализа частных закономерностей.

Таким образом, разработка методов расчета режимов работы систем обеспечения микроклимата при хранении сочного растительного сырья и количественных показателей тепломассопереноса в слое хранящейся продукции на основе полного термодинамического потенциала (потенциала влажности) является актуальной задачей теоретических и практических исследований.

Степень разработанности темы исследования. Теоретическими основами диссертационного исследования являются работы, посвященные изучению процессов тепломассопереноса в слое биологической продукции и расчету режимов работы систем обеспечения микроклимата при хранении растительного сырья А.Г. Егiazарова, В.И. Бодрова, В.М. Валова, А.В. Лыкова, Н. Богословского, В.Г. Гагарина, В.З. Жадана, М.П. Калашникова, Г.М. Позина и др. Рассмотренные методы расчета тепломассопереноса в биологически активной продукции, базирующиеся на различных методах и понятиях, не могут с достаточной точностью описать процессы, происходящие при хранении биологически активной продукции. Существующие методики расчета режимов работы систем обеспечения микроклимата при хранении не учитывают особенностей тепло-влажностных характеристик насыпи. В представленной диссертации предлагается термодинамический подход к выбору и расчету режимов работы

систем обеспечения микроклимата, обеспечивающих максимальную сохранность продукции.

Целью диссертационной работы является повышение эффективности хранения сочного растительного сырья путем разработки методики расчета интенсивности процессов тепломассообмена в слое сырья на основе градиента полного термодинамического потенциала.

Для достижения поставленной цели сформулированы следующие основные **задачи**:

- провести анализ существующих методик расчета режимов работы систем обеспечения параметров микроклимата при различных способах хранения растительного сырья и методик расчета процессов тепломассообмена в слое хранящейся продукции;
- на основе анализа зависимостей потенциала влажности θ от упругости водяного пара p_n построить линии постоянных потенциалов $\theta = \text{const}$ на $I-d-\theta$ -диаграмму в области низких положительных температур;
- разработать уточненную обобщенную теплофизическую модель тепломассообмена в слое сочного растительного сырья с позиции теории потенциала влажности;
- провести натурные исследования по выявлению закономерностей изменения потенциала влажности в насыпи сочного растительного сырья;
- разработать инженерный метод расчета режимов работы систем обеспечения микроклимата при хранении с использованием $I-d-\theta$ -диаграммы в области низких положительных температур;
- произвести прогнозирование и оценку на стадиях проектирования и эксплуатации коэффициентов обеспеченности сохранности СРС в зависимости от технологии хранения.

Научная новизна. Термодинамически обоснованы и получены аналитические зависимости для расчета значений потенциала влажности θ в области низких положительных температур (ниже 10°C). Предложена уточненная теплофизическая модель тепломассообмена в слое биологически активного сырья. Получены аналитические зависимости для определения количественных показателей интенсивности процессов тепломассопереноса в слое биологически активной продукции.

Теоретическая и практическая значимость работы заключается в разработке инженерного метода расчета режимов работы систем обеспечения параметров микроклимата при хранении растительного сырья (с использованием уточненной $I-d-\theta$ -диаграммы), учитывающий тепловлажностные показатели продукции, который включает: аналитическое и графическое определение значений потенциала влажности воздуха в процессе вентилирования; аналитиче-

ское определение коэффициента влагообмена α_0 в слое хранящейся продукции; расчет времени работы систем обеспечения микроклимата для обеспечения максимальной сохранности продукции.

Предложенная инженерная методика расчета времени работы систем обеспечения микроклимата внедрена в ООО Агрофирма «Белозерки». Удельный экономический эффект от оптимизации режимов работы систем активной вентиляции при хранении сочного растительного сырья в натуральных условиях составил 600 000 руб. в год.

Методология и методы исследования. Методологической основой диссертационного исследования являются аналитическое обобщение известных научных теоретических результатов, фундаментальные положения тепломассообмена и термодинамики. Научные исследования проводились с применением современных математических методов планирования и обработки экспериментальных данных. Экспериментальные исследования основываются на общепринятых методах физического моделирования в натуральных условиях.

На защиту выносятся следующие положения:

1. Аналитические зависимости потенциала влажности θ от упругости водяного пара p_n с нанесением линий постоянных потенциалов $\theta = \text{const}$ на $I-d-\theta$ -диаграмму в области низких положительных температур.
2. Уточненная теплофизическая модель тепломассообмена в слое сочного растительного сырья.
3. Экспериментальное подтверждение основных аналитических закономерностей изменения потенциала влажности в насыпи сочного растительного сырья.
4. Метод расчета режимов работы систем активной вентиляции в хранилищах сочного растительного сырья с применением уточненной $I-d-\theta$ -диаграммы в области низких температур.

Достоверность результатов исследований гарантирована достаточной их обоснованностью, корректностью сделанных допущений, достаточной сходимостью результатов теоретических и экспериментальных исследований. Предложенные аналитические зависимости не противоречат основным положениям существующих теорий тепломассопереноса и результатам ранее выполненных исследований. При постановке эксперимента использованы современные поверенные приборы. Автоматизированная обработка экспериментальных данных осуществлялась с помощью программных пакетов Microsoft Office Excel и OriginLab 8.1. Достоверность разработанных методик расчетов подтверждается результатами практической апробации.

Личное участие автора заключается в формулировании цели работы и постановке задач, в разработке методик теоретических исследований, в плани-

ровании и проведении экспериментальных исследований, обработке полученных результатов.

Апробация работы. Основные результаты исследований докладывались на Всероссийской научно-практической конференции «Энерго- и ресурсосбережение. Энергообеспечение. Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии», УрФУ, Екатеринбург, 2010 г.; на II научно технической конференции студентов, магистрантов, аспирантов, ТГУ, 2012 г.; на международной научно-практической конференции «Строительство-2012», Ростов на Дону, 2012 г.; опубликованы в виде докладов на конференциях: на VII международной научно-практической конференции «Научная индустрия европейского континента-2011», Чехия, 2011 г.; на VIII международной научно-практической конференции «Ключевые аспекты научной деятельности – 2012», Польша, 2012 г.; на X международной научно-практической конференции «Перспективные научные исследования – 2014», Болгария, 2014 г.

Публикации. Основные результаты исследований опубликованы в 10 статьях, в том числе 4 статьях в рецензируемых журналах по списку ВАК.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа изложена на 126 страницах и состоит из введения, четырех глав, основных выводов, списка литературы и трёх приложений. Список использованной литературы включает 118 источников, в том числе 19 иностранных источников. Иллюстрационный материал содержит 55 рисунков, 20 таблиц в тексте.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулированы ее цель и основные задачи, научная и практическая значимость решаемых задач, дана краткая характеристика работы.

В первой главе рассмотрен современный подход к созданию систем обеспечения микроклимата овощекартофелехранилищ. Оценены физико-механические и теплофизические характеристики СРС, способы хранения и поддержания параметров микроклимата при хранении биологически активной продукции. Рассмотрены методики расчета режимов работы САВ при хранении СРС. Существующие методики не учитывают влажностный режим насыпи, количественные значения выделения влаги при хранении и ассимиляцию влаги системой вентиляции.

Процессы тепломассопереноса, протекающие в объеме биологически активной продукции, наиболее полно характеризуются с позиции потенциала влажности. Развитию теории и практики потенциала влажности посвящены работы А.В. Лыкова, В.Н. Богословского, В.Г. Гагарина, А.Г. Перехоженцева,

Е.И. Тертичника, С.В. Корниенко, А.Н. Гвоздкова, В.И. Бодрова и др. В настоящее время отсутствуют инженерные методики расчета параметров микроклимата в хранилищах сочного растительного сырья основанные на теории потенциала влажности.

Проведенный анализ научной и справочной литературы позволил сформулировать цель и задачи исследований.

Во второй главе представлены результаты графо-аналитических исследований зависимости потенциала влажности θ от упругости водяного пара p_n с нанесением линий постоянных потенциалов $\theta = \text{const}$ на $I-d-\theta$ -диаграмму в области низких положительных температур.

Определенное значение потенциала влажности θ , °В, характеризует множество сочетаний температур t_v и относительной влажности воздуха ϕ_v . Профессор В.Н. Богословский и доцент А.Н. Гвоздков на основании зависимостей между потенциалом влажности и упругостью водяного пара при различных температурах, полученных экспериментально, нанесли линии постоянных потенциалов влажности на $I-d$ -диаграмму. Однако для практического использования $I-d-\theta$ -диаграммы в расчетах процессов теплообмена в слое хранящегося сочного растительного сырья необходим анализ $I-d-\theta$ диаграммы в области низких температур (от 0 до 10 °С), т.к. основное время хранения протекает в этом температурном диапазоне.

Используя известную зависимость давление насыщенного водяного пара p_n , кПа, от температуры t , °С, нами были построены кривые, характеризующие значения потенциала влажности θ , °В, при различных значениях упругости водяного пара p_n для ряда температур от 0 до 23 °С с шагом в 1 градус (рисунок 1). Анализ полученных кривых показывает, что графическая зависимость давления пара в воздухе от потенциала влажности при определенной температуре можно условно разбить на три характерных участка (рисунок 2). Первый участок (кривая $a-b-e$) – в этом диапазоне значение p_n зависит от θ в независимости от температуры. Вторым участком (кривая bc) – значения p_n имеет определенную зависимость от θ , на которую оказывает влияние температура. Третий участок (прямая $c-d$) – на величину потенциала влажности θ не оказывает влияние значения упругости водяного пара p_n . Данный участок характеризуется прямой параллельной оси абсцисс, значения p_n равны давлению насыщения пара в воздухе при конкретной рассматриваемой температуре воздуха. Для всех кривых прослеживается зависимость нахождения точки b на кривой ac . Значение p_n в точке b при любой температуре находится в диапазоне относительной влажности $\phi \approx 65 \%$.

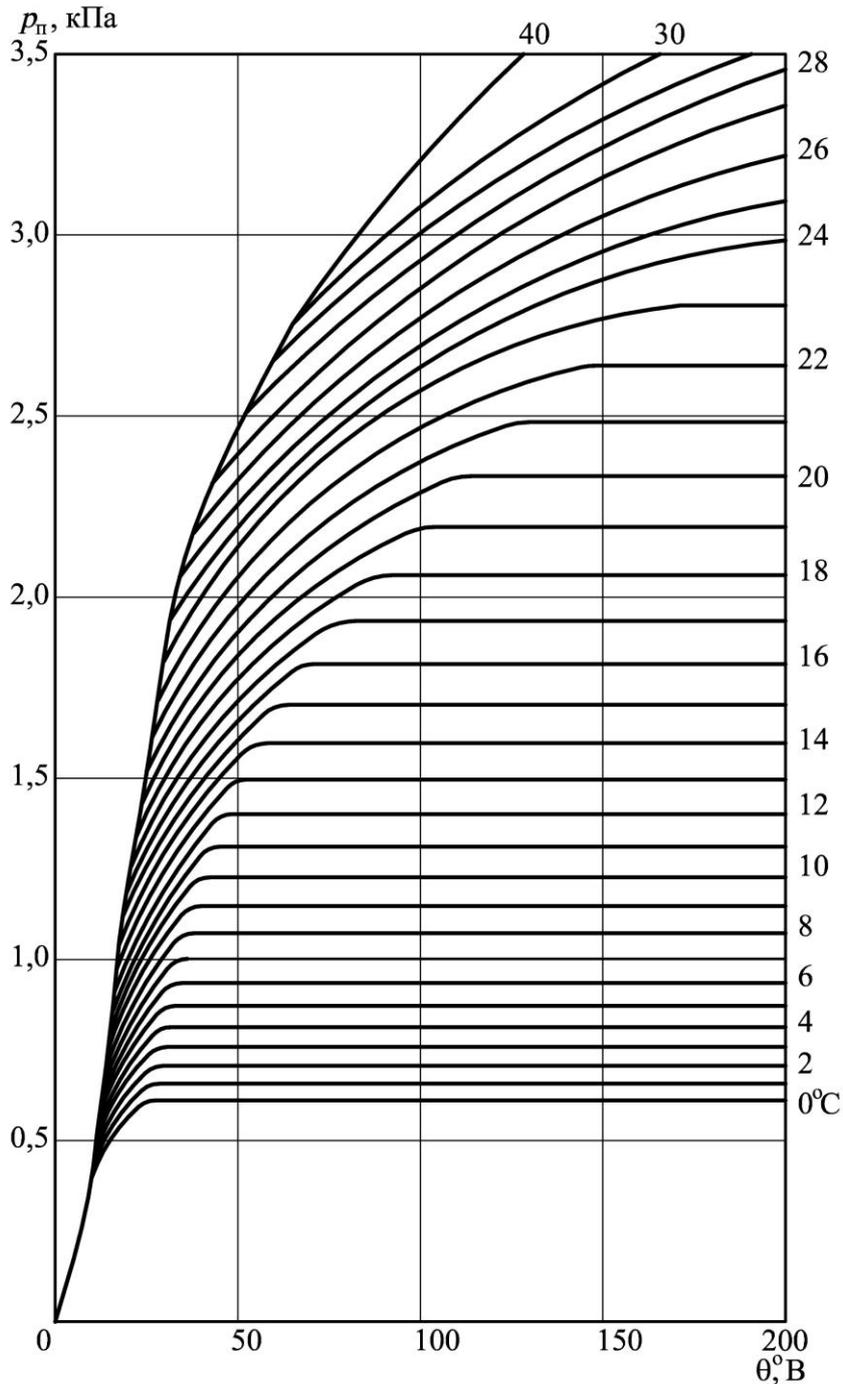


Рисунок 1 – Зависимость между потенциалом влажности воздуха и упругостью водяного пара в воздухе

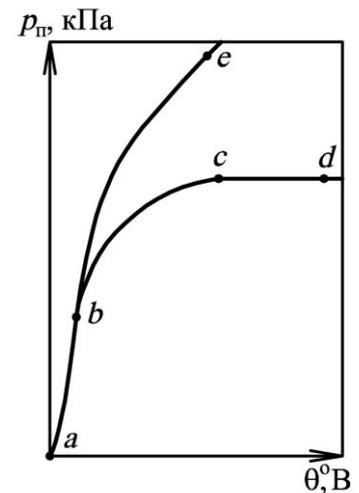


Рисунок 2 – Характерные участки кривой $p_{\pi} = f(\theta, t)$

В результате аппроксимации кривых в области b - c получены зависимости:

$$p_{\pi} = a_{t1} \cdot \left(-e^{-b_{t1} \cdot \theta} \right), \text{ при } 0 \leq t \leq 5 \text{ и } 65 < \varphi \leq 100; \quad (1)$$

$$p_{\pi} = a_{t2} + b_{t2} \cdot r_t^{\theta}, \text{ при } t > 5 \text{ и } 65 < \varphi \leq 100, \quad (2)$$

где a_{t1} , b_{t1} , a_{t2} , b_{t2} , r_t – температурные коэффициенты.

Для получения математического выражения, характеризующего значения параметров a_{t1} , b_{t1} , a_{t2} , b_{t2} , r_t , построены графики изменения величины данных

коэффициентов (рисунки 3-7). Аппроксимация построенных кривых дала следующий результат:

$$a_{t1} = 0,66 + 0,067 t; \quad (3)$$

$$b_{t1} = 0,088 - 0,0033t; \quad (4)$$

$$a_{t2} = 0,46 + 0,11 t; \quad (5)$$

$$b_{t2} = -0,81 - 0,04 t; \quad (6)$$

$$r_t = 0,91 \cdot t^{0,027}. \quad (7)$$

В результате аппроксимации кривой в области $a-e$, получены уравнения:

$$p_{\Pi} = 0,023 + 0,017 \cdot \theta^{1,34}; \text{ при } p_{\Pi} \leq 0,4 \text{ кПа и } \varphi > 65 \% ; \quad (8)$$

$$p_{\Pi} = 4,15 \cdot \ln(0,46 \cdot \ln(\theta)); \text{ при } p_{\Pi} > 0,4 \text{ кПа и } \varphi > 65 \% . \quad (9)$$

Уравнения (1, 2, 8, 9) математически описывают изменение упругости водяного пара от изменения температуры и потенциала влажности.

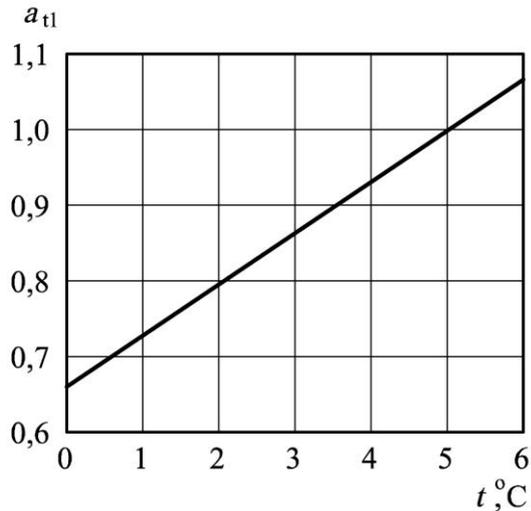


Рисунок 3 – Зависимость коэффициента a_{t1} от температуры воздуха

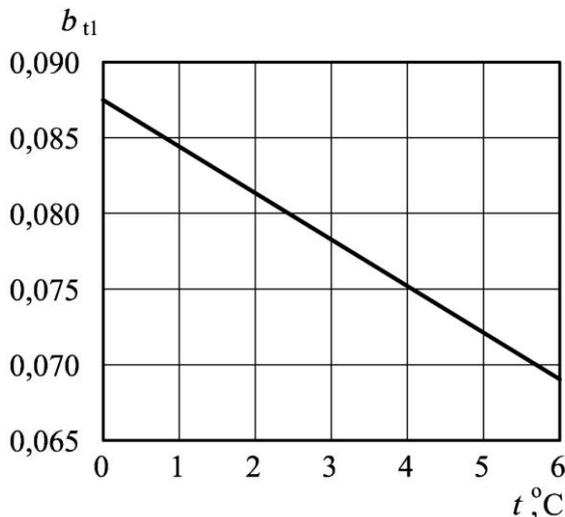


Рисунок 4 – Зависимость коэффициента b_{t1} от температуры воздуха

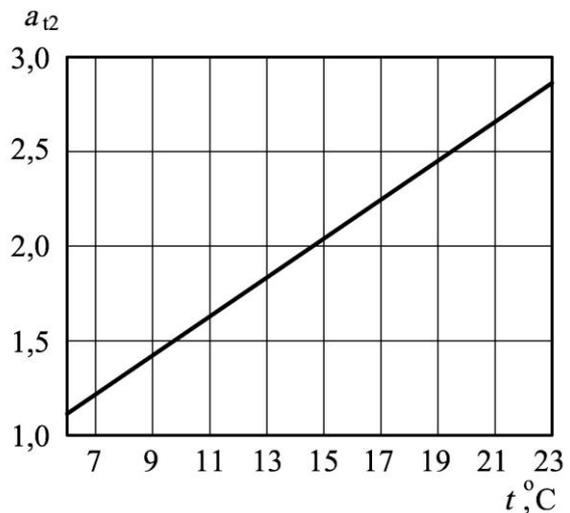


Рисунок 5 – Зависимость коэффициента a_{t2} от температуры воздуха

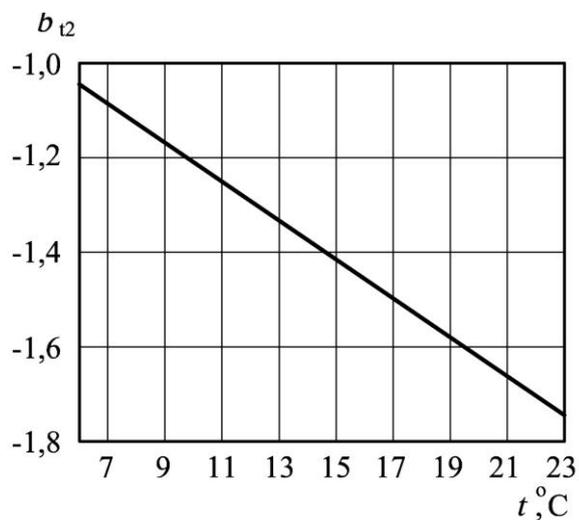


Рисунок 6 – Зависимость коэффициента b_{12} от температуры воздуха

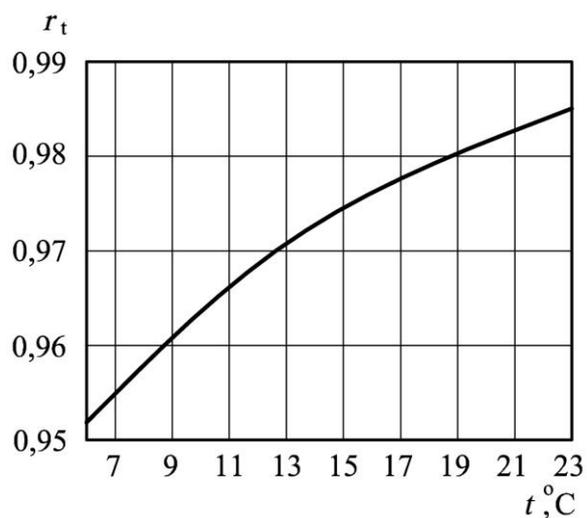


Рисунок 7 – Зависимость коэффициента r_t от температуры воздуха

Используя полученные зависимости были нанесены линии постоянных значений потенциала влажности $\theta = \text{const}$ на $I-d$ -диаграмму (рисунок 8).

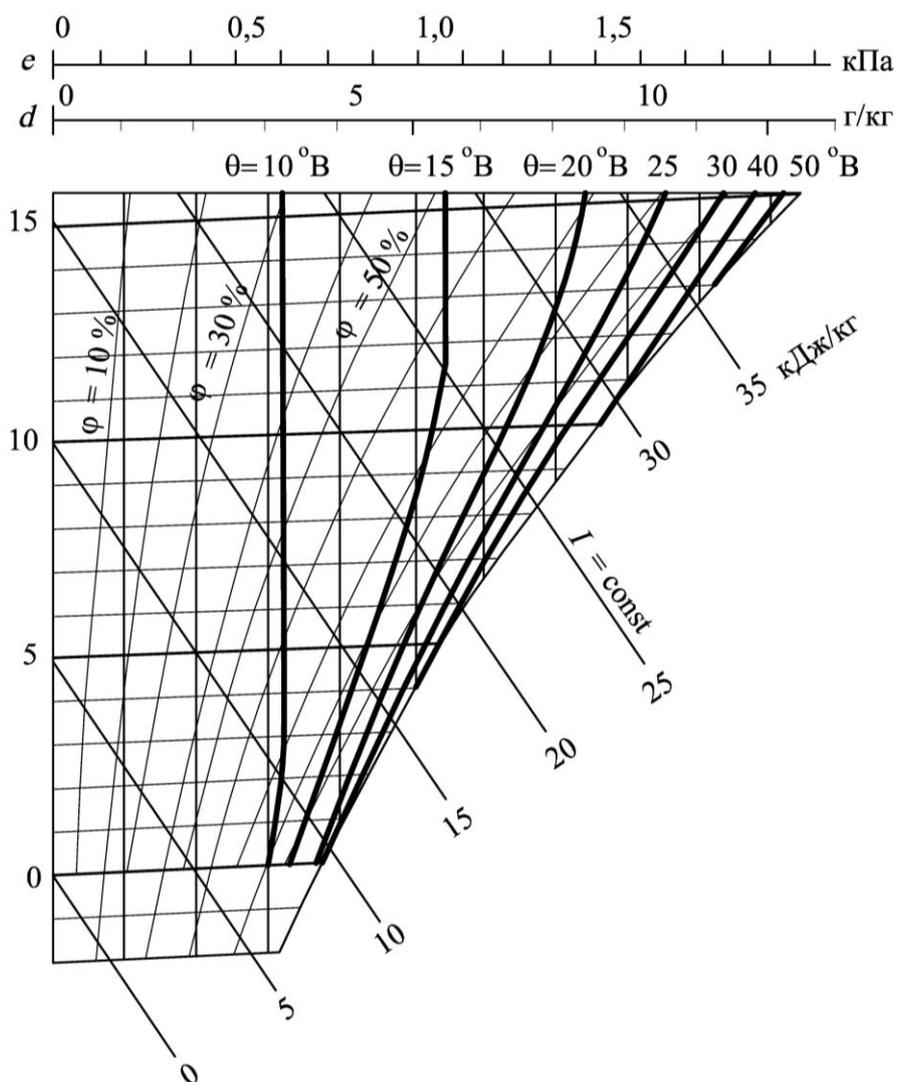


Рисунок 8 – Уточненная $I-d-\theta$ диаграмма в области низких положительных температур

Построение процессов тепломассообмена между продуваемым воздухом и хранящейся продукции на уточненной $I-d-\theta$ - диаграмме позволяет уточнить теплофизическую модель тепломассообмена в слое сочного растительного сырья. В качестве примера, на рисунке 9 показана система построений процессов тепломассообмена при некоторых способах обработки приточного воздуха. Если параметры наружного воздуха (точка Н с параметрами $t_H, \varphi_H, d_H, I_H, \theta_H$) находятся на продолжении прямой ПУ, характеризующей процесс изменения тепловлажностных характеристик продуваемого воздуха, то для достижения оптимальных значений необходимо применение рециркуляции в пропорции УП/ПН. В результате смешивания воздух с параметрами точки П – $t_P, \varphi_P, d_P, I_P, \theta_P$ поступает в насыпь. Сорбирующий потенциал воздуха уменьшается на разность потенциалов $\Delta\theta_{HP} = \theta_P - \theta_H > 0$. В результате потери продукции от усушки становятся минимальными, определяются только дыханием продукции. Интенсивность влажотока определяется разностью потенциалов $\Delta\theta_{PY} = \theta_Y - \theta_P > 0$.

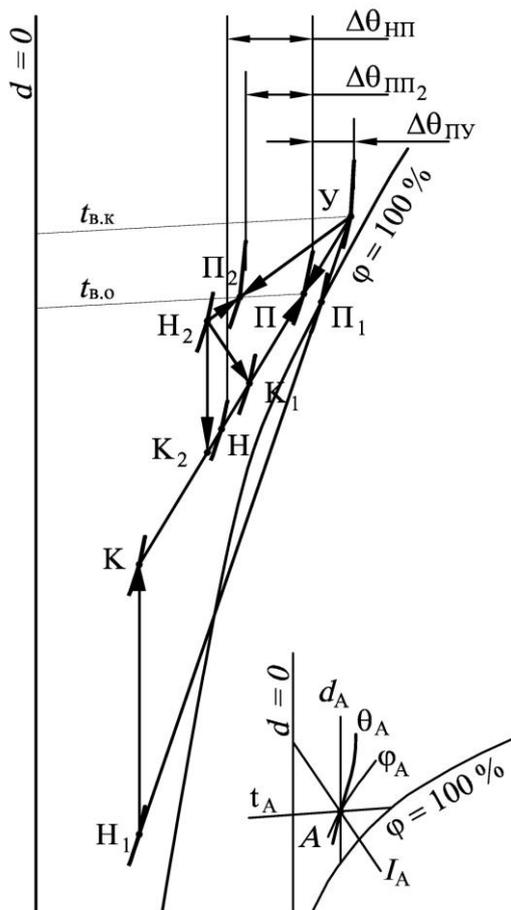


Рисунок 9 – Теплофизическая модель тепломассообмена в слое хранящейся продукции

Если параметры наружного воздуха находятся ниже прямой ПУ (точка H_1) использование наружного воздуха без предварительного подогрева не допустимо. При начальных параметрах воздуха, соответствующих точке H_2 и применении рециркуляции (точка P_2) интенсивность влажотока возрастает ($\Delta\theta_{HP2} = \theta_P - \theta_{P2} > 0$), что приводит к дополнительной усушке продукции. Усушка предотвращается при искусственном охлаждении наружного воздуха (процесс H_2K_1 и H_2K_2). Аналогичным образом может быть представлена на $I-d-\theta$ -диаграмме система построений процессов тепломассообмена в слое при любых параметрах наружного воздуха и способах его обработки.

В третьей главе представлены результаты натурных исследований динамики изменения потенциала влажности в слое хранящейся продукции.

Натурные исследования теплофизических условий хранения СРС при контейнерном хранении СРС проводились в картофелехранище агрофирмы «Белозерки» Ставропольского района Самарской области. В середине хранилища выбраны два ряда контейнеров в количестве 24 шт. с картофелем. Измерение температуры и относительной влажности производилось в 36 точках (24 точки в центре контейнеров и 12 точек вне контейнеров) (рисунок 10).

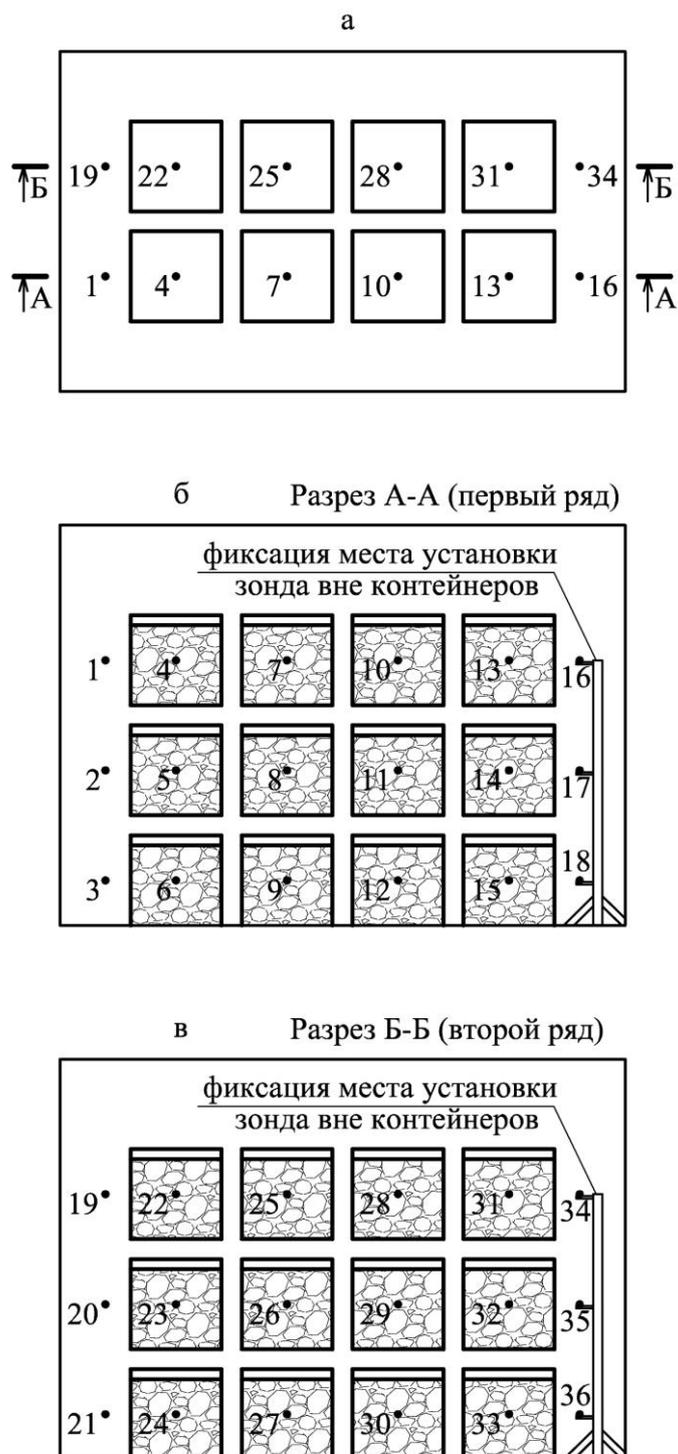


Рисунок 10 – Отсек для проведения натурального эксперимента с указанием точек замеров находящихся в и вне контейнеров: а – план; б – разрез

На основании осредненных данных по каждому дню проведения замеров с применением программно-вычислительного комплекса Origin 8.1 построены поля потенциала влажности в камере хранения (рисунок 11). Поля потенциалов влажности имеют выраженный равномерный характер в исследуемом объеме, что свидетельствует о правомерности применения понятия потенциал влажности и $I-d-\theta$ -диаграммы в расчете времени работы систем вентиляции.

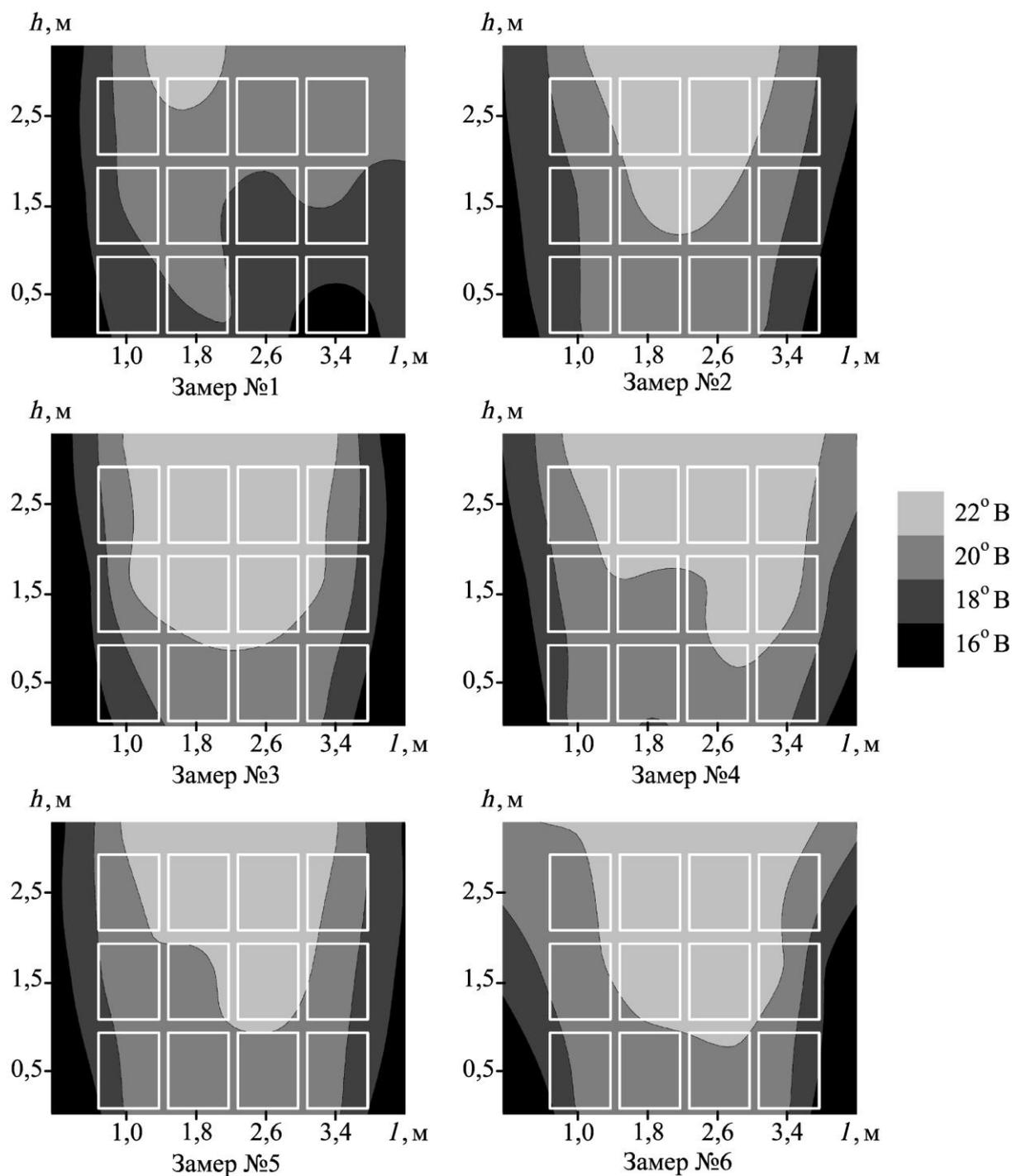


Рисунок 11 – Поле потенциала влажности в хранилище

Значения потенциалов влажности θ в общем объеме хранилища изменяются в диапазоне от 14,0 до 21,9 °В в зависимости от геометрического расположения контейнеров. Наблюдается равномерный градиент возрастания потенциала влажности по высоте.

Полученная динамика изменения полей потенциала влажности позволяет рассматривать штабель контейнеров сочного растительного сырья как насыпь с равномерно распределенными по объему источниками теплоты и влаги.

На основании полученных полей потенциала влажности построен график изменения потенциала влажности по высоте хранящейся продукции (рисунок 12). В результате аппроксимации получена зависимость:

$$\theta = \frac{h + 9.37}{0.59}, \quad (10)$$

где h – высота слоя хранящейся продукции, м.

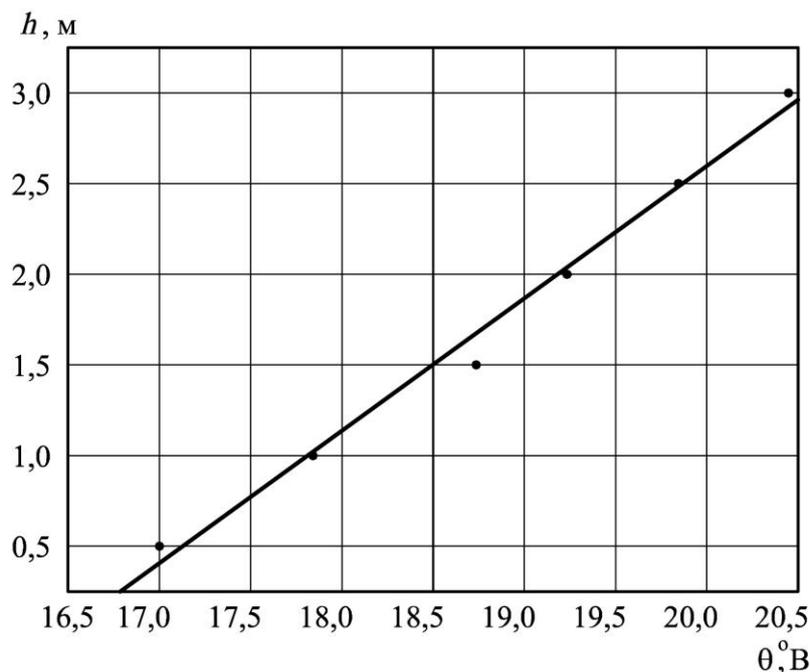


Рисунок 12 – Динамика изменения потенциала влажности в по высоте слоя

В четвертой главе рассмотрены условия применения естественных источников энергии для поддержания микроклимата в хранилище. Применение естественного холода приводит к повышению энергоэффективности хранения СРС. Проведен анализ обеспеченности естественным холодом процесса охлаждения СРС для климатических условий Самарской и Нижегородской областей, климат которых характерен для южной и северной части Среднего Поволжья. Оценка возможности использования необработанного атмосферного воздуха при хранении СРС проводилась на основе расчета температуры и потенциала влажности наружного воздуха в процессе вентилирования (рисунок 13).

время (день, месяц)

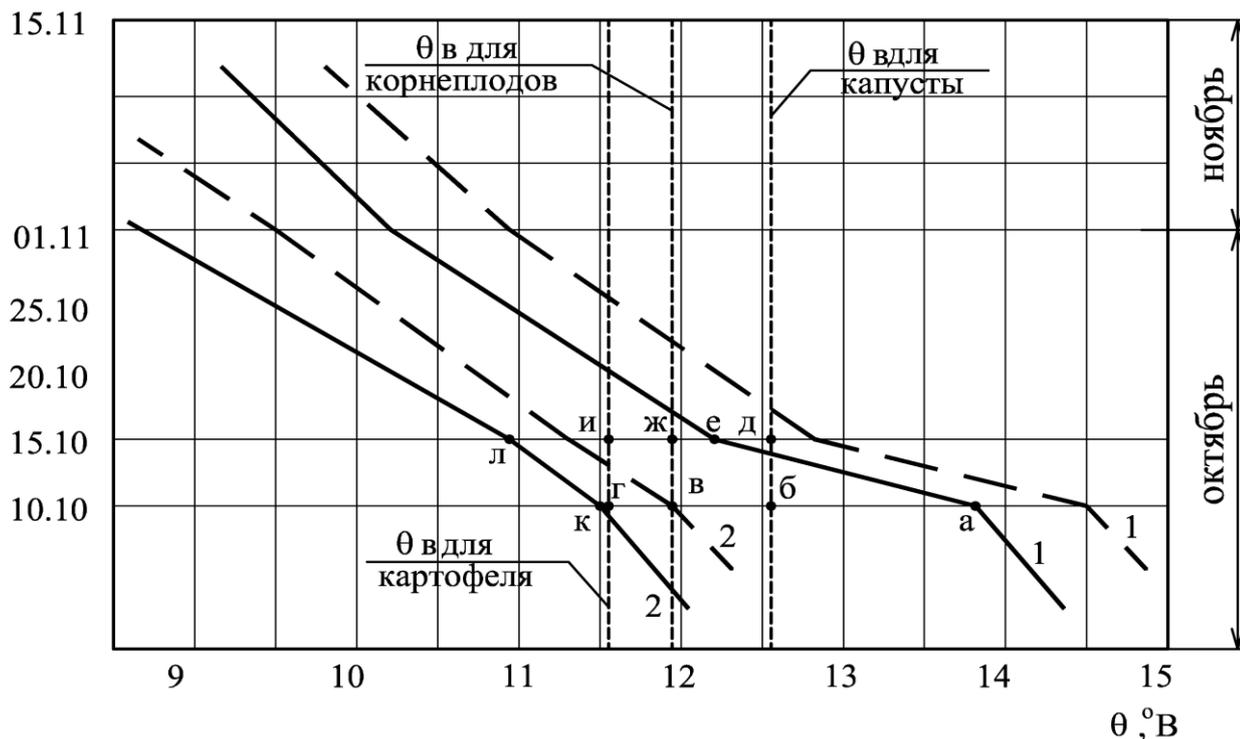


Рисунок 13 – Определение потребности в корректировке потенциала влажности подаваемого в хранилище СРС воздуха: - - - - линия среднесуточных значений потенциала влажности наружного воздуха $t_{ср}$; — линия потенциала влажности подаваемого в хранилище воздуха $t_{в.о.}$; 1 – г. Тольятти; г. 2 – Нижний Новгород.

Цикличность работы систем обеспечения микроклимата в течение суток должна определяться из условия полной ассимиляции теплоты и влаги, выделяющейся в процессе биологического дыхания продукции. Пониженная влажность подаваемого воздуха увеличивает естественную убыль за счет увядания продукции, повышение влажности продувочного воздуха способствует развитию фитопатогенных организмов и гниению.

Полученные в результате графо-аналитических исследований математические зависимости (1, 2, 8, 9) и уточнение нанесения линий постоянных потенциалов влажности на $I-d-\theta$ -диаграмму в области значений низких температур позволяют упростить инженерную методику расчета потерь СРС в процессе хранения и уточнить режимы работы систем активной вентиляции в отношении влажностного режима.

Количество влаги, ассимилируемое из слоя сочного растительного сырья продуваемым воздухом, равно:

$$W_B = \alpha_\theta (\theta_y - \theta_{в.о.}) G_{\text{мат}} \tau_{\text{вен}}, \quad (11)$$

где $\theta_{в.о.}$ – начальный потенциал влажности подаваемого воздуха, °В; θ_y – потенциал влажности удаляемого из хранилища воздуха, °В; α_θ – коэффициент массопереноса, г/(г·ч·°В).

Исходя из определения потока влаги с позиции теории потенциала влажности коэффициент массопереноса α_θ определяется выражением:

$$\alpha_\theta = \frac{g_B (d_y - d_{B.0})}{\theta_y - \theta_{B.0}}, \quad (12)$$

где g_B – удельный расход воздуха, кг/(ч·т); $d_{B.0}$, d_y – влагосодержание подаваемого и удаляемого воздуха, г/кг.

Используя уточненную $I-d-\theta$ -диаграмму и полученные ранее экспериментальные данные, представленные в научной литературе, получена графическая зависимость коэффициента массопереноса α_θ от температуры и удельного расхода воздуха (рисунок 14).

Для аналитического определения коэффициента массопереноса α_θ , с достаточной для инженерных расчетов степенью точности, предложено использовать следующие выражения:

$$\begin{aligned} \text{при } 10 < g_B < 20 & \quad \alpha_\theta = 0,25 \cdot \Delta t + 2,94; \\ \text{при } 20 < g_B < 30 & \quad \alpha_\theta = 0,42 \cdot \Delta t + 4,9; \\ \text{при } 30 < g_B < 40 & \quad \alpha_\theta = 0,59 \cdot \Delta t + 6,86, \end{aligned} \quad (13)$$

где Δt – температурный перепад уходящего и подающего воздуха, °С.

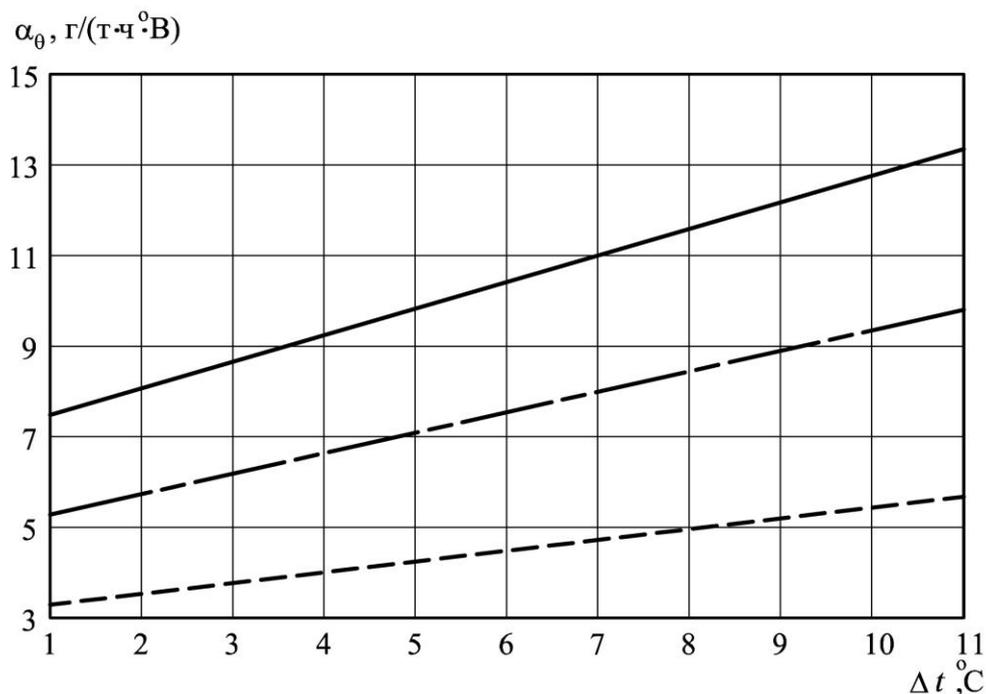


Рисунок 14 – Значения коэффициента α_θ в слое СРС в зависимости от удельного расхода продувочного воздуха: — — — — при $10 < g_B < 20$; — — — — при $20 < g_B < 30$;
 — — — — при $30 < g_B < 40$.

Для достижения условий максимальной сохранности продукции время работы системы обеспечения параметров микроклимата в течение суток $K_{B.ВЛ}^\theta$ составляет:

$$K_{\text{в.вл}}^{\theta} = \frac{W}{\alpha_{\theta} (\theta_y - \theta_{\text{в.о.}}) G_{\text{мат}}}, \quad (14)$$

где W – удельные влаговыделения продукцией, г/ч.

Таким образом, предложенная инженерная методика расчета режимов работы систем обеспечения микроклимата при хранении биологического сырья позволяет скорректировать время работы систем вентиляции, что приводит к повышению сохранности продукции и сокращению затрат на обеспечение оптимальных параметров хранения.

Оптимизация режимов работы систем вентиляции в хранилище картофеля Агрофирмы «Белозерки» в реальных условиях позволила снизить убыль продукции на 6 % и достигнуть экономического эффекта в среднем 600 000 руб/год.

В приложениях приведены результаты экспериментальных исследований и документы, подтверждающие практическое использование полученных в работе результатов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. На основе анализа литературных источников показано, что наиболее перспективным является хранение сочного растительного сырья в стационарных хранилищах с использованием систем искусственной вентиляции. Существующие методики расчета режимов работы систем вентиляции при хранении не учитывают влажностный режим насыпи. Интенсивность процессов тепломассообмена между поверхностью сырья и влажным воздухом при хранении наиболее полно может быть определена только на основе теории полного термодинамического потенциала (потенциала влажности).
2. На основе результатов графо-аналитических исследований получены математические зависимости для определения потенциала влажности θ от упругости водяного пара $p_{\text{п}}$ в температурном диапазоне менее 10 °С и всем диапазоне значений относительной влажности.
3. Теоретически обосновано нанесение линий постоянных потенциалов на $I-d-\theta$ -диаграмму в области температур менее 10 °С, что позволяет использовать предложенную $I-d-\theta$ -диаграмму для расчетов режимов работы систем обеспечения микроклимата.
4. Разработана уточненная теплофизическая модель тепломассообмена в слое сочного растительного сырья, позволяющая оценить интенсивность тепломассообмена в процессе хранения при любых способах обработки приточного воздуха с позиции потенциала влажности.

5. Экспериментально получены основные аналитические закономерности динамики полей потенциала влажности в насыпи сочного растительного сырья по высоте слоя продукции.
6. Разработан инженерный метод расчета режимов работы систем обеспечения микроклимата в хранилищах сочного растительного сырья на основе понятия потенциал влажности с применением уточненной $I-d-\theta$ -диаграммы в области низких температур.
7. Проведена оценка возможности использования естественного холода в различных регионах Поволжья с учетом тепловлажностных климатических условий. Определены оптимальные сроки применения необработанного наружного воздуха при хранении биологически активной продукции.
8. Годовой экономический эффект от оптимизации времени работы систем обеспечения микроклимата при хранении сочного растительного сырья в натурных условиях в картофелехранилище Агрофирмы «Белозерки» выразился в снижении убыли продукции и составил 600 000 руб. в ценах 2015 года.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ ОПУБЛИКОВАНО В РАБОТАХ:

(шрифтом выделены публикации в изданиях, рекомендованных ВАК)

1. Кузнецов, Е.П. Интенсивность процесса влагопереноса как показатель энергоэффективности хранения сочного растительного сырья / Е.П. Кузнецов, М.Н. Кучеренко // Энерго- и ресурсосбережение. Энергообеспечение. Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии : Сб. материалов Всеросс. науч.-практич. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых 22-26 ноября 2010 г. – Екатеринбург, УрФУ, 2010. – С.110-112.
2. **Кузнецов, Е.П. Графо-аналитические исследования $I-d-\theta$ - диаграммы в области низких температур / Е.П. Кузнецов, М.Н. Кучеренко // Приволжский научный журнал. – 2012. – №2. – С.73-77.**
3. Кузнецов, Е.П. Применение $I-d-\theta$ - диаграммы и понятия потенциал влажности в расчетах систем вентиляции хранилищ сочного растительного сырья / Е.П. Кузнецов, М.Н. Кучеренко // Научная индустрия европейского континента-2011: Материалы VII международной научно-практической конференции. – Publishing House «Education and Science» s.r.o, Чехия, 2011. – С.94-96.
4. Кузнецов, Е.П. Исследование полей температур, относительной влажности и потенциала влажности в хранилище сочного растительного сырья / Е.П. Кузнецов, М.Н. Кучеренко // Ключевые аспекты научной деятельности – 2012: Материалы VIII международной научно-практической конференции. – Sp. z o.o. “Nauka I studia”, Przemysl , Польша, 2012. – С.87-90.

5. Кузнецов, Е.П. Время работы систем активной вентиляции как показатель энергоэффективности хранения сочного растительного сырья / Е.П. Кузнецов, М.Н. Кучеренко // Строительство-2012: Материалы Междунар. науч.-практ. конф. – Ростов на Дону, Рост. гос.строит. ун-т, 2012. – С.158-160.
6. Кузнецов, Е.П. Применение потенциала влажности в расчете времени работы систем активной вентиляции как показатель энергоэффективности хранения сочного растительного сырья / Е.П. Кузнецов, М.Н. Кучеренко // Энергоэффективность и энергобезопасность производственных процессов: Материалы II научно технической конференции студентов, магистрантов, аспирантов. – Тольятти, 2012. – С.217-218.
7. **Кузнецов, Е.П. Расчет времени работы систем активной вентиляции хранилищ сочного растительного сырья на основе градиента потенциала влажности / Е.П. Кузнецов, М.Н. Кучеренко // Вестник ВСГУТУ. – 2013. – №2(43). – С.81-85.**
8. **Кузнецов, Е.П. Экспериментальные исследования параметров микроклимата при контейнерном хранении сочного растительного сырья / Е.П. Кузнецов, М.Н. Кучеренко // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. – 2014. – № 2. – С. 142-149.**
9. Кузнецов, Е.П. Повышение энергоэффективности хранения сочного растительного сырья с применением естественного холода / Е.П. Кузнецов, М.Н. Кучеренко // Перспективные научные исследования – 2014: Материалы X международной научно-практической конференции. – «Бял ГРАД-БГ» ООД, Болгария, 2014. – С.66-70.
10. **Кузнецов, Е.П. Проектирование системы вентиляции для сельскохозяйственных хранилищ с учётом динамики тепломассопереноса в слое сырья/ М.Н. Кучеренко, Е.П. Кузнецов, Г.И. Грейсух, С.А. Степанов, Е.Г. Ежов // Региональная архитектура и строительство. – 2016. – №3(28). – С. 149-154.**

Подписано в печать 21.09.2016. Формат 60×84/16.
Печать оперативная. Усл. п. л. 1,15.
Тираж 100 экз. Заказ № 3-485-16.

Издательство Тольяттинского государственного университета
445020, г. Тольятти, ул. Белорусская, 14