

Министерство образования и науки Российской Федерации  
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
«Тольяттинский государственный университет»

На правах рукописи



Кузнецов Евгений Петрович

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

05.23.03 – Теплоснабжение, вентиляция, кондиционирование воздуха,  
газоснабжение и освещение

**ДИССЕРТАЦИЯ**  
на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Научный руководитель:

к.т.н., доцент,  
М.Н.Кучеренко

## СОДЕРЖАНИЕ

	стр.
Основные условные обозначения	4
Введение	6
Глава 1 Современный подход к созданию систем обеспечения микроклимата хранилищ	
1.1 Параметры микроклимата хранилищ и режимы работы систем обеспечения параметров микроклимата	
1.1.1. Физико - механические и теплофизические характеристики сочного растительного сырья	12
1.1.2. Способы хранения и поддержания параметров микроклимата при хранении биологически активной продукции	22
1.1.3. Обобщенные теплофизические модели теплообмена в слое сочного растительного сырья	27
1.1.4. Режимы работы систем активной вентиляции в хранилищах	34
1.2. Процессы теплообмена при хранении сочного растительного сырья	
1.2.1. Движущие силы теплообмена биологически активной продукции	42
1.2.2. Потенциал влажности как движущая сила теплопереноса	48
Выводы по главе 1	55
Глава 2 Графо-аналитическое обоснование интенсивности влагообмена в слое биологически активного сырья с применением $I-d-\theta$ -диаграммы	
2.1. Тепловой баланс хранилища	57
2.2. Графо-аналитические исследования $I-d-\theta$ -диаграммы в области низких температур и ее применение в расчетах процессов теплообмена в слое сочного растительного сырья	
2.2.1. Графо-аналитические исследования $I-d-\theta$ -диаграммы в области низких температур	64

	2.2.2. Построение процессов тепломассообмена на $I-d-\theta$ -диаграмме при различных способах обработки приточного воздуха	72
	Выводы по главе 2	80
Глава 3	Экспериментальные исследования процесса тепломассообмена в слое сочного растительного сырья	
	3.1. Методика и экспериментальная база исследований	81
	3.2. Объекты и методы исследований при хранении сочного растительного сырья	82
	3.3. Оценка точности. Определение минимального количества измерений	85
	3.4. Исследование теплофизических условий сочного растительного сырья при контейнерном хранении в промышленном овощехранилище	89
	Выводы по главе 3	100
Глава 4	Инженерный метод расчёта и технико-экономическое обоснование режимов работы систем вентиляции	
	4.1. Использование естественных источников энергии	101
	4.2. Инженерная методика расчёта тепломассопереноса на основе градиента потенциала влажности	109
	4.3. Примеры расчета режимов работы систем обеспечения параметров микроклимата с помощью $I-d-\theta$ -диаграммы	113
	4.4. Коэффициент обеспеченности сохранности сочного растительного сырья	117
	4.5. Экономическая эффективность использования расчета времени работы систем активной вентиляции хранилищ сочного растительного сырья основанного на понятии потенциал влажности	120
	Выводы по главе 4	124
	Выводы по диссертации	125
	Список авторских публикаций	127
	Список используемой литературы	129
	Приложения	141

## ОСНОВНЫЕ УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ

- $K_{об}$  – коэффициент обеспеченности, доли;  
 $\Pi$  – пористость, доли, %;  
 $a$  – степень загрузки хранилища, доли; коэффициент температуропроводности, м<sup>2</sup>/с;  
 $c$  – удельная теплоемкость, кДж/(кг·°С);  
 $d$  – диаметр, м; влагосодержание воздуха, г/кг сух. воздуха;  
 $G$  – масса продукции, вместимость хранилища, кг, т;  
 $h$  – высота, мм, м;  
 $j$  – удельная интенсивность влаготтока, г/(кг·ч);  
 $L, L_m$  – удельные расходы воздуха, соответственно, м<sup>3</sup>/(м<sup>2</sup>·ч), м<sup>3</sup>/(т·ч);  
 $p$  – парциальное давление водяных паров, Па;  
 $\Delta p$  – аэродинамическое сопротивление, Па/м;  
 $q_{СРС}$  – удельные биологические тепловыделения, Вт/кг;  
 $q$  – удельный тепловой поток, Вт/м<sup>2</sup>;  
 $r$  – скрытая теплота парообразования, кДж/кг; радиус, м;  
 $T, t$  – температура, К, °С;  
 $W$  – интенсивность влаготтока, кг/ч;  
 $\alpha_0$  – коэффициенты влагоотдачи, г/(кг·ч·°В);  
 $\varepsilon$  – тепловлажностная характеристика процесса на  $I-d$ - диаграмме, кДж/кг;  
 $\theta$  – потенциал влажности, °В;  
 $\rho$  – плотность, кг/м<sup>3</sup>;  
 $\lambda$  – коэффициент теплопроводности, Вт/(м·°С);  
 $\varphi$  – относительная влажность воздуха, %, доли;  
 $K_v$  – коэффициент использования вентиляции, доли;  
 $\Delta z_{опт}$  – оптимальный темп охлаждения, °С/ч;  
 $j$  – удельные влаговыведения продукции, г/(т·ч);  
 $u$  – скорость воздуха в насыпи, м/с;  
 $w$  – влажность продукции, доли, %;  
 $D$  – коэффициент диффузии, м<sup>2</sup>/с;  
 $F$  – площадь ограждающих конструкций, м<sup>2</sup>;  
 $I$  – удельная энтальпия, кДж/кг;  
 $R_0$  – сопротивление теплопередачи ограждения, (м<sup>2</sup>·°С)/Вт;  
 $S$  – площадь поверхности насыпи, м<sup>2</sup>/м<sup>3</sup>, м<sup>2</sup>/т;  
 $\varepsilon$  – доля площади «влажного» участка продукции;  
 $\tau$  – время, с; температура внутренней поверхности ограждения, °С;  
 $\nu$  – коэффициент кинематической вязкости, м<sup>2</sup>/с.

Числа:

$Re = u \cdot d / \nu$  – Рейнолдса;

$Pr_t = \nu / a$ ;  $Pr_d = \nu / D$  – теплообменный и диффузионный критерий Прандтля, где  $D$  – коэффициент диффузии водяного пара в воздухе при данном значении температуры и барометрического давления.

$Gu = (T_c - T_m) / T_c = \Delta t / T_c$  – Гухмана;

$Nu_t = \alpha_t \nu_{cp} / \lambda$ ;  $Nu_d = \alpha_t \nu_{cp} / D$ ;  $Nu_m = \beta_p l / D$  – теплообменный, диффузионный и массообменный критерий Нуссельта.

Индексы:

б - биологические; в - воздух, внутренний; вл - влага; д - действительный; е - естественное; з - замерзание; и - испарение; к - каркас (продукция); н - наружный, насыпной, нормируемый; о - начальный; опт - оптимальный; п - полный, покрытие; пр - приточный; р - равновесный, рециркуляционный, расчетный; св - сухое вещество; ср - средний; СРС - сочное растительное сырье; ст - стена; тр - требуемый; у - удаляемый; ф - физический, фильтрационный; я – явный.

## ВВЕДЕНИЕ

Хранение сочного растительного сырья часто сопровождается повышенными потерями. Изменение влажности воздуха в слое хранящейся продукции, вызванное выделением продукцией в процессе дыхания тепла 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 сохранению оптимальных тепловлажностных характеристик микроклимата в хранилище приводит к необходимости продолжения исследований теплофизических характеристик продукции, процесса тепломассопереноса в системе «поверхность сочного растительного сырья – влажный воздух», выявления количественных характеристик движущих сил тепломассопереноса. При нормировании теплотехнических характеристик наружных ограждений и выборе объемно-планировочных решений хранилищ необходимо учитывать особый микроклимат хранилищ – низкая температура и высокая относительная влажность.

Применение теории тепломассопереноса в вопросе поддержания оптимальных тепловлажностных характеристик микроклимата при хранении сочного растительного сырья является нестандартной и недостаточно изученной задачей.

Основываясь на обобщенном теплофизическом подходе с применением теплофизических методов анализа можно объединить качественные и количественные факторы процесса хранения сочного растительного сырья и на научной основе решить основную практическую задачу – снизить потери сырья при хранении.

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.

Насыпь хранящейся продукции необходимо рассматривать как открытую гетерогенную систему, состоящую из сочного растительного сырья (поверхность продукции), воздуха и влаги. Данная система имеет характерную особенность – способность поддерживать и саморегулировать свой влажностный режим, что позволяет описать эту систему законами термодинамики нестационарных процессов и применить одно уравнение вместо системы уравнений описывающих гетерогенную систему. В этом уравнении определяющей величиной является полный потенциал состояния влаги в системе – потенциал влажности. Такой подход к анализу процессов тепломассообмена в насыпи сочного растительного сырья позволяет однозначно количественно характеризовать интенсивность испарения влаги биологически активной продукции единой величиной градиентом потенциалов влажности поверхности сырья и влажного воздуха.

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.

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  $\theta$  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  $\theta$  в области низких положительных температур (ниже 10 °С). 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; аналитическое определение коэффициента

влагообмена  $\alpha_0$  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.

Теоретические и практические результаты исследований используются при чтении лекций, проведении курсового и дипломного проектирования со студентами Тольяттинского государственного университета по дисциплинам «Вентиляция промышленных зданий», «Энергетическая оценка объектов теплогазоснабжения и вентиляции».

Область исследования соответствует требованиям паспорта научной специальности ВАК 05.23.03 – Теплоснабжение, вентиляция, кондиционирование воздуха, газоснабжение и освещение, п.1: «Совершенствование, оптимизация и повышение надежности систем теплогазоснабжения, отопления, вентиляции и кондиционирования, методов их расчета и проектирования. Использование нетрадиционных источников энергии».

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.

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 планировании 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, 2010г.; на II научно технической конференции студентов, магистрантов, аспирантов, ТГУ, 2012г.; на международной научно-практической конференции «Строительство-2012», Ростов на Дону, 2012г; опубликованы в виде докладов на конференциях: на VII международной научно-практической конференции «Научная индустрия европейского континента-2011», Чехия, 2011г.; на VIII международной научно-практической конференции «Ключевые аспекты научной деятельности – 2012», Польша, 2012г.; на X международной научно-практической конференции «Перспективные научные исследования – 2014», Болгария, 2014г.

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 трех приложений. Список использованной литературы включает 118 источников, в том числе 19 иностранных источников. Иллюстрационный материал содержит 55 рисунков, 20 таблиц в тексте, 3 приложения.

## ГЛАВА 1. СОВРЕМЕННЫЙ ПОДХОД К СОЗДАНИЮ СИСТЕМ ОБЕСПЕЧЕНИЯ МИКРОКЛИМАТА ХРАНИЛИЩ

### 1.1 Параметры микроклимат овощекартофелехранилищ и режимы работы систем обеспечения параметров микроклимата

#### 1.1.1 Физико-механические и теплофизические характеристики сочного растительного сырья

Сочное растительное сырье (СРС) – это ряд сельскохозяйственных культур, имеющих в своем составе большое количество воды, составляющее более 75 % по массе (таблица 1.1). При рассмотрении процессов теплообмена в период хранения СРС важнейшими физико-механическими характеристиками является: плотность, пористость, удельная поверхность.

Таблица 1.1 – Содержание воды и сухих веществ в СРС [15]

Вид сырья	Вода, %	Сухое вещество, %
Картофель	75,0	25,0
Капуста белокочанная	89,0...93,9	11,0...6,1
Свекла столовая	82,5...88,0	17,5...12,0
Морковь	86,0...91,0	14,0...9,0
Лук репчатый (луковицы)	85,0...88,0	15,0...12,0

Насыпная плотность СРС равна [25, 46, 72, 115]: для картофеля  $\rho_n = 680 \text{ кг/м}^3$ , для свеклы и моркови  $\rho_n = 600 \text{ кг/м}^3$ , для капусты значения  $\rho_n$  колеблются от 400 у плотных, и до 150...250  $\text{кг/м}^3$  у рыхлых кочанов. Физическая плотность клубней картофеля в среднем равна  $\rho_\phi = 1100 \text{ кг/м}^3$ , корнеплодов свеклы и моркови -  $\rho_\phi = 1060 \text{ кг/м}^3$  [46]. Физическая плотность листьев капусты составляет  $\rho_{\phi л} = 960...980 \text{ кг/м}^3$ , кочанов -  $\rho_\phi = 560...920 \text{ кг/м}^3$  [99].

Пористость характеризует объем свободного пространства 1  $\text{м}^3$  насыпи. Пористость насыпей ( $\Pi = 1 - \rho_n/\rho_\phi$ ) составляет у картофеля 0,38... 0,43, у

свеклы и моркови 0,45...0,50, у лука 0,35...0,37. Увядание сырья и усадка насыпей уменьшает значения пористости на 25...35 %. Значения пористости прямо пропорциональны количеству примесей в насыпи.

Удельная поверхность тонны картофеля составляет 150 м<sup>2</sup>/т. У других видов СРС: 150...170 м<sup>2</sup>/т – морковь; 65 м<sup>2</sup>/т – капуста; 120...130 м<sup>2</sup>/т – столовая свекла; 150 м<sup>2</sup>/т – лук. Площадь соприкосновения продуктов сферической формы пренебрегают, вследствие ее незначительности. Из общей удельной поверхности продукта следует выделять активную поверхность, через которую происходит тепломассообмен с окружающей средой. Поверхность тепловлагообмена СРС и продуваемого воздуха можно разбить на два характерных участка: «влажный» – отдающий тепло и испаряющий с поверхности влагу,  $\varepsilon_u S_y$ ; «сухой» - воздух поглощает только явную теплоту  $S_y(1 - \varepsilon_u)$ . При смоченной водой или снятой кожуре коэффициент испарительной способности СРС  $\varepsilon_u = 1,0$ ; для периода покоя клубней  $\varepsilon_u = 0,009...0,012$ ; у луковиц  $\varepsilon_u = 0,002...0,003$ ; у свеклы  $\varepsilon_u = 0,20...0,03$ ; у моркови  $\varepsilon_u = 0,35...0,45$ ; у капусты  $\varepsilon_u = 0,37...0,45$  [44].

При хранении СРС высота насыпей при использовании систем активной вентиляции (САВ) составляет: для картофеля  $h \leq 5...6$  м; для моркови и капусты  $h \leq 2,8$  м; для столовой свеклы  $h \leq 4...5$  м; для лука  $h \leq 3,6...4,0$  м. В практике хранения имеется опыт хранения СРС с высотой насыпи 7,5...9,0 м. [43, 62, 103, 104]. Высота насыпи картофеля  $h$  может достигать 20 м для здоровых клубней [38].

Результаты натурных исследований показали, что в европейской части России средний размер клубней картофеля, закладываемых на хранение, близок к  $d_{cp} = 5,0 \pm 0,5$  см [18].

Аэродинамическое сопротивление слоя СРС является одной из основных характеристик, влияющих на выбор режима эксплуатации системы вентиляции в хранилище. Аэродинамическое сопротивление насыпи СРС зависит от режима течения воздуха – линейно от скорости воздуха при

ламинарном течении, и нелинейно при переходном и турбулентном течении. Ламинарный режим в насыпи наблюдается в цикле естественной конвекции (естественная вентиляция), переходный и турбулентный – при использовании механизированных систем вентиляции [114].

Результаты проведенных экспериментальных исследований аэродинамического сопротивления насыпи клубней картофеля высотой 3,0 м, приведены на рисунке 1.1 [18]. Усадка насыпи приводит к увеличению аэродинамического сопротивления примерно на 10 %: Экспериментальные данные гидравлического сопротивления насыпи картофеля  $\Delta p_0$ , Па/м, выражаются линейными зависимостями (до и после усадки соответственно):

$$\Delta p_0 = 125u_\phi; \Delta p_0^1 = 135u_\phi, \quad (1.1)$$

где  $\Delta p_0$ ,  $\Delta p_0^1$  – аэродинамическое сопротивление насыпи картофеля до усадки и после усадки соответственно, Па/м;  $u_\phi$  – скорость движения воздуха по свободному сечению, без клубней, м/с.

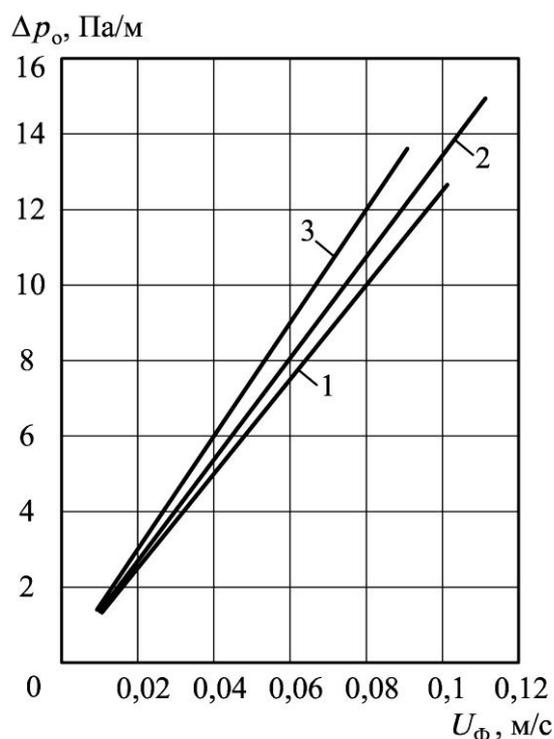


Рисунок 1.1 – Аэродинамическое сопротивление насыпи клубней: 1 – до усадки [18]; 2 – после усадки [18]; 3 – по данным [25]

Влияние засоренности слоя клубней механическими примесями на потери давления выявлено И.Л. Волкиным [25, 26]:

$$\Delta p_o = K / Re \text{ при } Re < 330, \quad (1.2)$$

$$\Delta p_o = K / Re^m \text{ при } 330 < Re \leq 1000.$$

где  $K$  и  $m$  – коэффициенты, представленные в таблице 1.2.

Таблица 1.2 - Значения коэффициентов  $K$  и  $m$  в формуле 1.2

Засоренность, %	$10^{-4}K$	$m$
0	7,90	0,778
5	7,57	0,68
10	4,92	0,56
15	3,47	0,44
20	2,60	0,25

При определении значений  $Re$  за характерный размер принят эквивалентный (гидравлический) диаметр каналов насыпи:

$$d = 4\Pi d_{cp} / 6(1 - \Pi). \quad (1.3)$$

На рисунке 1.2 показано аэродинамическое сопротивление проходу воздуха насыпи моркови высотой 1 м, Па/м.

Аэродинамическое сопротивление насыпи капусты высотой 1 м, Па/м, для крупных и мелких кочанов и для среднереализуемой в практике хранения насыпи кочанов приведено на рисунке 1.3. На рисунке 1.4 даны значения для свеклы сахарной и столовой. Размерность расхода воздуха  $L$ ,  $\text{м}^3/(\text{м}^2\text{ч})$ , показывает количество воздуха, поступающего в течение часа в насыпь, отнесенное к  $1 \text{ м}^2$  насыпи.

Потери давления, связанные с подачей воздуха в насыпь, обычно составляет не более 10 % от общих потерь давления в вентиляционных сетях, следовательно, усадка насыпи не приведет к разрегулировке системы вентиляции.

Значения теплофизических показателей сочного растительного сырья в существенной степени зависят от содержания сухих веществ  $n_{св}$ , %, [23, 30, 46, 95]. Удельная теплоемкость сухих веществ СРС  $c_{св} = 1,2$  кДж/(кг·°С), теплопроводность сухих веществ  $\lambda_{св} = 0,255$  Вт/(м·°С). Значения массовой теплоемкости  $c_k$ , коэффициентов теплопроводности  $\lambda_k$  и температуропроводности  $a_k$  приведены в таблице 1.3.

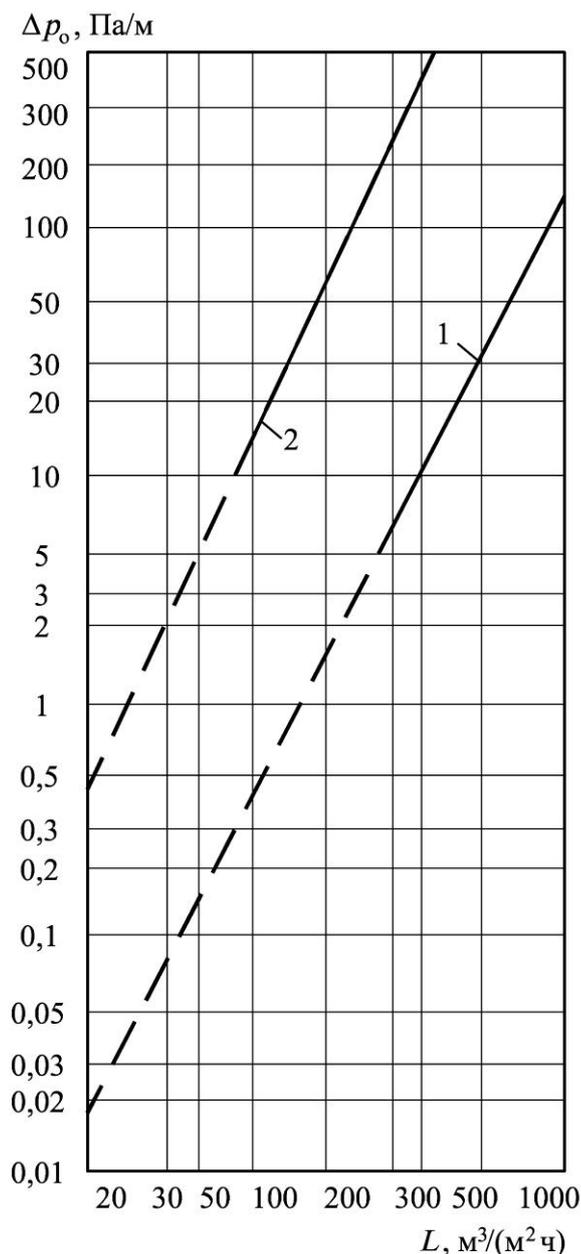


Рисунок 1.2 – Аэродинамическое сопротивление насыпи моркови [25, 26]: 1 – для насыпи без механических примесей; 2 – то же, с механическими примесями

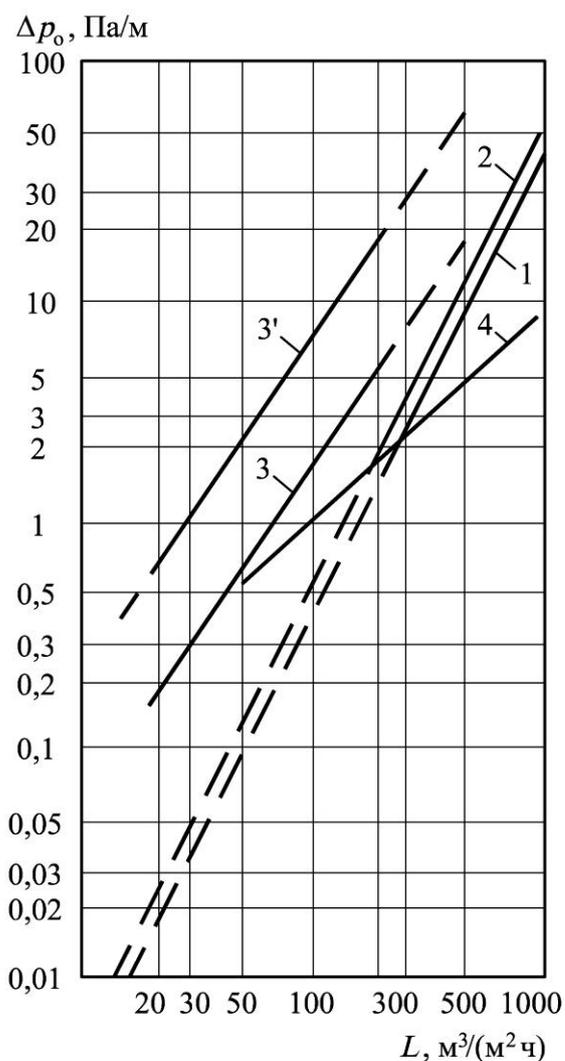


Рисунок 1.3 – Аэродинамическое сопротивление насыпи капусты: 1 – для крупных кочанов; 2 – для кочанов массой 0,5...0,6 кг [25, 26]; 3 – по экспериментальным данным авторов в начале хранения; 3' – то же в конце хранения (через 5 месяцев); 4 – для насыпи лука

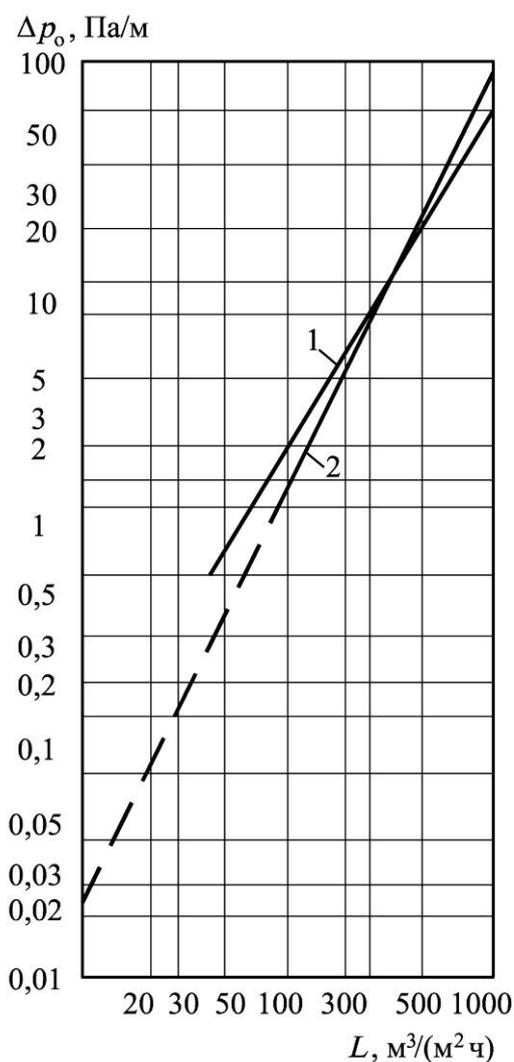


Рисунок 1.4 – Аэродинамическое сопротивление свеклы: 1 – столовой [72]; 2 – сахарной [25, 26]

Таблица 1.3 – Значения  $c_k$ ,  $\lambda_k$  и  $a_k$  для СРС

Продукция	$c_k$ , кДж/(кг·°С)	$\lambda_k$ , Вт/(м·°С)	$a_k$ , м <sup>2</sup> /с
Картофель	3,3...3,8	0,52...0,66	12,27...15,9
Капуста	3,49...3,97	0,34	12,2...13,9
Морковь	3,61...3,82	0,48...0,66	12,7...15,9
Свекла столовая	3,61...3,82	0,48...0,66	12,0...18,0
Лук	3,78	0,50...0,60	13,9

Различие величин коэффициентов, представленных в таблице 1.3, обусловлено изменением количества сухих веществ в продукции.

Объемная теплоемкость насыпи СРС в силу  $\rho_{\phi} \gg \rho_{\text{в}}, c_{\text{к}} \gg c_{\text{в}}$  с достаточной для инженерных расчетов точностью составляет:

$$c_{\text{н}} = c_{\text{к}} \rho_{\phi} (1 - \Pi). \quad (1.4)$$

В процессе хранения в продукции продолжают сложными биохимическими процессами, от которых напрямую зависит сохранность продукции. Центральной реакцией является образование воды, путем переноса водорода субстратов на молекулярный кислород. Процесс полного аэробного окисления выражается уравнением [7, 66, 68]:



где  $\Delta G = -2820$  кДж – изменение свободной энергии, представляющее собой изменение свободной энергии системы  $\Delta G$ , которая может быть использована для совершения работы:  $\Delta G = \Delta U + p\Delta V + T\Delta S$ , где  $\Delta U$  – изменение внутренней энергии системы;  $p\Delta V$  – работа, полученная или совершенная системой;  $T\Delta S$  – теплота, полученная или отданная системой в окружающую среду.

В процессе хранения СРС выделяет теплоту, в результате чего температура поверхности продукции выше, чем окружающего воздуха.

Давление насыщения водяного пара вблизи поверхности хранящейся продукции выше, чем в окружающем воздухе [35, 44, 55, 66, 104, 116]. Процессы испарения влаги с поверхности СРС происходят даже при  $\phi_{\text{в}} \geq 100\%$ , вследствие выделения теплоты при дыхании [46, 66].

Удельные явные тепловыделения СРС [13, 18] для насыпей клубней картофеля в основной период хранения  $q_{\text{СРС}} = 12 \text{ Вт/м}^3 = 17,6 \text{ Вт/т}$ ; для насыпи кочанной капусты  $q_{\text{СРС}} = 3,9 \dots 4,7 \text{ Вт/м}^3 = 9,7 \dots 11,7 \text{ Вт/т}$ ; для моркови и свеклы столовой:  $q_{\text{СРС}} = 7,3 \text{ Вт/м}^3 = 10,4 \text{ Вт/т}$  и  $q_{\text{СРС}} = 5,3 \text{ Вт/м}^3 = 9,0 \text{ Вт/т}$ , соответственно.

При использовании машинной уборки значения явных тепловыделений рекомендуются меньше, чем при ручном способе уборки и составляют для кочанов, клубней, моркови и свеклы столовой  $q_{\text{СРС}} = 7,0; 8,6; 8,5; 7,3$  Вт/т, соответственно [72].

В процессе хранения СРС выделяет влагу. Влаговыведения в процессе хранения среднереализуемых в практике хранения насыпей картофеля [15] составляют  $j_{\text{СРС}} = 10$  г/(т·ч), капусты  $j_{\text{СРС}} = 20,3$  г/(т·ч), моркови  $j_{\text{СРС}} = 8,8$  г/(т·ч), свеклы столовой  $j_{\text{СРС}} = 7,6$  г/(т·ч).

Коэффициент теплоотдачи  $\alpha_t$ , Вт/(м<sup>3</sup>·°С), является основной характеристикой теплообмена в пористой среде. Зависимость для определения коэффициента теплоотдачи в диапазоне скоростей воздуха в межклубневом пространстве  $u$  до 0,3 м/с, характеризуется следующей зависимостью [18]:

$$\alpha_t = 30 + 1400 u . \quad (1.6)$$

Оптимальный влажностный режим насыпи СРС – это режим сформированный без внешних теплопритоков, поддерживаемый теплотой дыхания и испарительной способностью продукта [44]. Равновесная относительная влажность воздуха  $\varphi_p$  над поверхностью СРС определяется по коэффициенту депрессии раствора [46]:

$$\varepsilon_k = p_{\text{рн}} / p_{\text{пр}} = 103 / (103 + \Delta t_3), \quad (1.7)$$

где  $p_{\text{рн}}$  и  $p_{\text{пр}}$  – соответственно, насыщающие упругости пара над чистой водой и над раствором, Па;  $\Delta t_3$  – понижение температуры замерзания клеточного сока: для клубней  $\Delta t_3 = 1,3$  °С; для других овощей – от 1,0 до 2,5 °С.

Значения  $\varepsilon_k$  по (1.7) лежат в пределах 0,985...0,995, что согласуется с данными отечественных и зарубежных авторов [104]: для СРС  $\varepsilon_k = 0,990...995$  ( $\varphi_p = 99,0...99,5$  %), но на практике при хранении всех видов СРС рекомендуемые значения равновесной относительной влажности при

хранении  $\varphi_{\text{в}}$  ниже значений равновесной влажности  $\varphi_{\text{р}}$ , например для картофеля, моркови и свеклы  $\varphi_{\text{в}} = 90...95 \%$ ; у капусты  $\varphi_{\text{в}} = 95...97 \%$ .

Оптимальная скорость движения воздуха в насыпи СРС должна находиться в диапазоне  $0,04...0,2$  м/с, для предотвращения излишнего вырывания продуваемым воздухом влаги с поверхности сырья подвижность воздуха необходимо ограничивать до  $0,4...0,5$  м/с [29, 68, 117].

Сохранение технологически требуемого температурного режима насыпи СРС высотой  $h$  достигается минимальными скоростями воздуха  $u_{\text{min}}$  и минимальными удельными расходами воздуха  $L_{\text{min}}$ , приводимыми в таблице 1.4 [18].

Таблица 1.4 – Значения  $u_{\text{min}}$  и  $L_{\text{min}}$  при охлаждении насыпи клубней

$h$ , м	$u_{\text{min}}$ , м/с	$L_{\text{min}}$ , м <sup>3</sup> /(ч·м <sup>2</sup> )
до 1,0	0,075	110
1,0...2,0	0,10	145
2,5	0,15	215
4,0...5,5	0,25	360
более 5,5	более 0,35	500

При решении вопроса совместного хранения различных видов СРС, можно основываться на коэффициенте испарительной способности  $\varepsilon_u$ .

Коэффициент  $\varepsilon_u$  определяется отношением количества влаги испаряющейся с поверхности натурального продукта, к количеству влаги испаряющейся с поверхности продукта смоченного водой, при постоянной подвижности воздуха, температуры и влажности окружающего воздуха. Средненные значения коэффициента  $\varepsilon_u$  приведены в таблице 1.5 [44].

Экспериментально показано, что хранение одного вида продукции разделенного по сортам снижает потери при хранении – отходы за 6,5 месяцев снизились на 4 %, а убыль массы на 3,8 % [16].

Таблица 1.5 – Коэффициенты испарительной способности плодоовощной продукции

Сырье	Коэффициент, $\epsilon_u$	Сырье	Коэффициент, $\epsilon_u$
Яблоки сортов:		Картофель	0,009...0,012
летних	0,028	Морковь	0,350...0,450
зимних	0,013	Свекла:	
Груши	0,027	столовая	0,250
Сливы	0,023	сахарная неполивная	0,275
Персики	0,240	сахарная поливная	0,375
Абрикосы	0,250	Лук репчатый	0,003
Лимоны	0,070	Капуста белокочанная	0,370...0,450
Вишня, черешня	0,170		

Характеристики различных видов сочного растительного сырья изучены достаточно полно. Полученные экспериментальным путем зависимости, определяющие аэродинамическое сопротивление насыпи проходящему воздуху, позволяют с высокой степенью точности проводить регулировку систем вентиляции при эксплуатации овощехранилищ. Вызывают затруднения нахождение зависимостей теплофизических характеристик, которые в первую очередь оказывают влияние на расчет режимов работы систем вентиляции хранилищ СРС. Теплофизические характеристики зависят от сорта продукции, степени травмированности, способа хранения, используемого вида вентилирования, и как правило, носят частный характер.

### 1.1.2 Способы хранения и поддержания параметров микроклимата при хранении биологически активной продукции

Способы хранения и поддержания параметров микроклимата при хранении сочного растительного сырья зависят от объемов хранящейся продукции.

Самые простые, с технологической точки зрения, способы хранения небольших партий продукции осуществляются в погребах и подпольях. Микроклимат при хранении продукции в погребах и подпольях обеспечивается, как правило, естественными системами вентиляции.

Подполье представляет собой объем здания между полом жилого здания и землей с высотой 1,2...1,5 м. Температурно-влажностный режим подпольев нестабилен, подача теплоты осуществляется теплопритоками от перекрытия, холод и наружный воздух подаются через продухи расположенные в наружных стенах.

Погреба являются частью жилого дома или представляют собой отдельные сооружения. Обеспечение теплового режима погребов осуществляется ограждающими конструкциями, соприкасающимися с грунтом, тепловое состояние которого близко к оптимальным физиологическим параметрам хранения большинства видов СРС. Влажностный режим носит саморегулируемый характер, относительная влажность стремится к 100 %, т.е. близка к равновесной.

Массовое хранение СРС осуществляется в стационарных хранилищах и в полевых сооружениях. В автономных полевых сооружениях (бурты и траншеи) в России храниться 40...50 % [79], в Германии 50...75 % [107].

Массовое использование буртов в полевых условиях в автономном режиме эксплуатации ограничено в связи с отсутствием систематизированных данных по динамике микроклимата. Одним из основных недостатков буртов с естественными системами вентиляции является нерегулируемый теплообмен с наружным воздухом и сложностью

удаления влаги из насыпи продукции. Ограниченное применение буртов связано с большими затратами теплоизоляционных материалов, недостаточным воздухообменом ( $L_m < 4 \text{ м}^3/(\text{т}\cdot\text{ч})$ ) и большими затратами ручного труда [79].

При работе систем активной вентиляции в буртах подача воздуха в слой хранящейся продукции осуществляется через напольные устройства, выполненные в виде треугольных в поперечном сечении, щелевидных коробов. Принципиальная схема постоянной буртовой площадки показана на рисунках 1.5, 1.6.

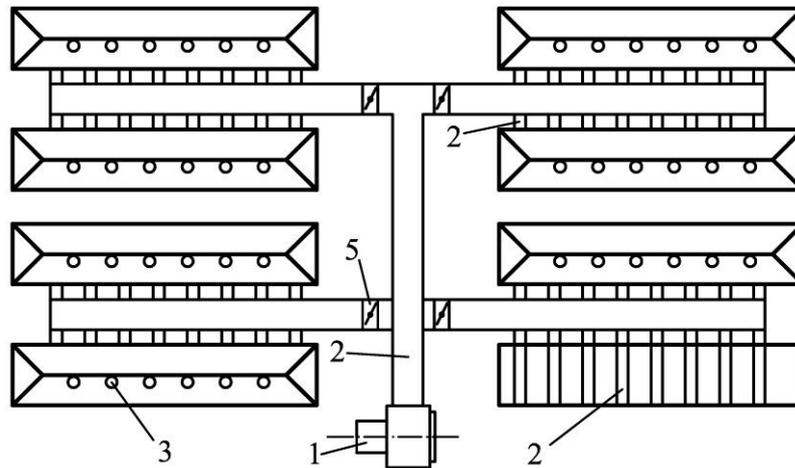


Рисунок 1.5 – Бурт с системой активной вентиляции [15]:  
1 – вентилятор; 2 – приточный воздуховод; 3 – вытяжной воздуховод; 4 – канал подачи воздуха в насыпь; 5 – регулирующее устройство [100]

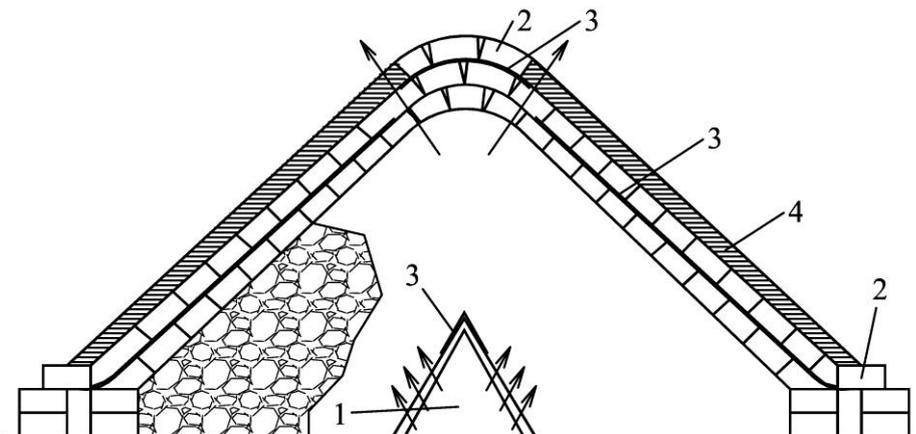


Рисунок 1.6 – Разрез бурта с системой активной вентиляции [15]:  
1 – воздухораспределительное устройство; 2 – тюки соломы; 3 – пленка; 4 – торф

Хранение крупных партий сочного растительного сырья осуществляется в стационарных хранилищах. Как правило, они проектируются и возводятся одноэтажными, прямоугольной формы, с пролетами одинаковой высоты и ширины, иногда с чердаком.

В стационарных хранилищах может применяться хранение в регулируемой газовой среде (РГС), что способствует затормаживанию процесса дыхания хранящейся продукции при увеличении концентрации  $\text{CO}_2$  ( $K_{\text{CO}_2}$ ) и понижении концентрации  $\text{O}_2$  ( $K_{\text{O}_2}$ ).

Рекомендации по использованию РГС в стационарных хранилищах не оборудованных искусственным охлаждением в нормах отсутствуют [72, 101].

Ширина пролетов хранилища, как правило, кратна 6, 12 или 18 метров с шагом колонн 6 или 3 метра. Высота помещений принимается наименьшей из принятой высоты хранения продукции и габаритов используемого оборудования, и обычно принимается равной 3,6; 4,8 или 6,0 метров. Воздушная прослойка между хранящейся продукцией и наружными ограждающими конструкциями играет роль температурного стабилизатора, защищает продукцию от подмораживания. Высота воздушной прослойки сверху насыпи принимается равной 0,8...1,0 м. Расстояния от наружных стен до края закровов ограничивается применяемыми средствами механизации и составляет 6,0 м. Фрагмент плана картофелехранилища показан на рисунке 1.7.

В стационарных хранилищах применяют различные системы вентиляции, зависящие от способа закладки продукции на хранение: естественная, общеобменная или активная вентиляция (рисунок 1.8).

Размеры приточных и вытяжных воздуховодов при использовании естественных систем вентиляции (рисунок 1.8, а), определяются аэродинамическим расчетом. Воздухообмен зависит от располагаемого давления, которое равно  $\Delta p_e = 10h(\rho_n - \rho_b)$ , Па. Увеличение интенсивности воздухообмена в насыпи достигается установкой в шахматном или коридорном порядке деревянных решетчатых коробов с шагом не более

2,5...3,0 м. Поперечное сечение коробов принимается не менее 0,2x0,2 м. Практическая невозможность оперативного регулирования процессов тепло- и влагообмена между продукцией и воздухом и необходимость уменьшения высоты слоя хранящейся продукции до  $h_H = 0,8...1,0$  м сдерживает массовое применение естественных систем вентиляции.

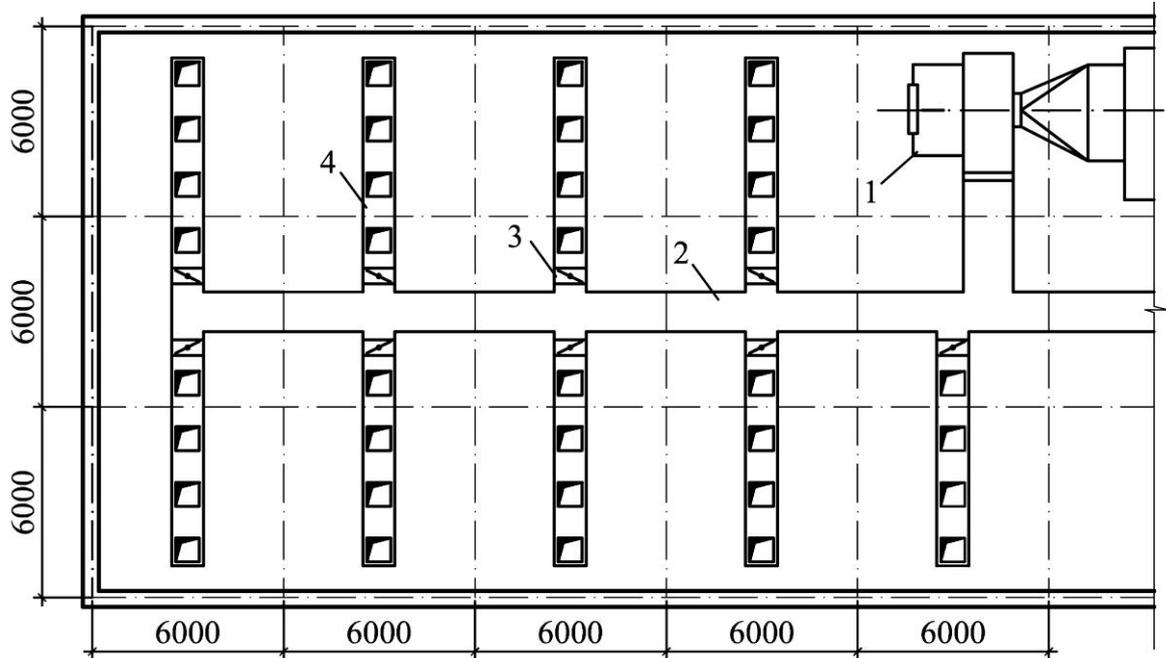


Рисунок 1.7 – Стационарное хранилище [15]:

1 – вентилятор; 2 – магистральный канал; 3 – шибер; 4 – распределительный канал

При хранении продукции в контейнерах в стационарных хранилищах применяют общеобменные системы вентиляции (рисунок 1.8, б). Продукция загружается в контейнеры непосредственно при уборке урожая.

Комплексное использование контейнеров с продукцией при транспортировке в овощехранилища, хранении и поставки на реализацию обеспечивает большую сохранность продукции и снижает затраты на погрузочно-разгрузочные работы.

Активная вентиляция (рисунок 1.8, в), применяемая в стационарных хранилищах, обеспечивает большую сохранность продукции. Это достигается оперативным регулированием тепловлажностного режима насыпи.

Рассмотренные способы хранения применяют в зависимости от объемов продукции, подлежащей хранению.

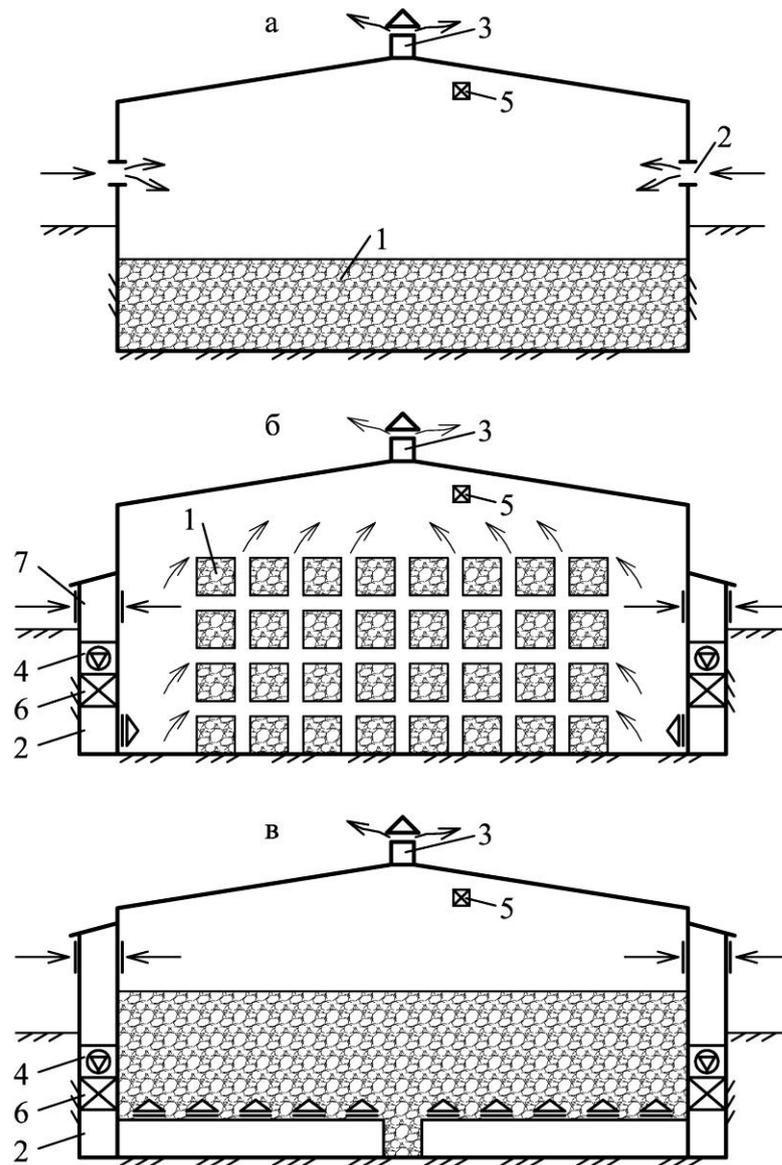


Рисунок 1.8 – Принципиальная схема устройства вентиляции в хранилище: естественная (а), общеобменная (б), активная (в) [15]: 1 – сырье; 2,3,7 – приточные, вытяжные и рециркуляционные воздуховоды соответственно; 5 – воздушно-отопительный агрегат; 6 – оборудование для обработки воздуха.

В настоящее время перспективным направлением является хранение крупных партий продукции в контейнерах или навалом при использовании стационарных хранилищ и бурты с активной вентиляцией. Сохранность продукции при использовании таких методов хранения повышается при правильном выборе типа вентиляции, определении режимов работы систем вентиляции при хранении, учитывающих текущие теплотехнические характеристики хранящейся продукции.

### 1.1.3 Обобщенные теплофизические модели тепломассообмена в слое сочного растительного сырья

Теплофизические модели, применяемые для решения задачи формирования температурно-влажностных полей в насыпях СРС, имеют большое число переменных, не допускают их простой интерпретации для инженерных расчетов.

Решение задач по поддержанию заданных температурно-влажностных параметров в насыпях СРС основано на эмпирических зависимостях, которые носят частный характер, или на приближенных аналитических расчетах, проведенных без комплексного учета внешних факторов: наличие биологических тепло- и влаговыделений СРС; непостоянство температуры каркаса по высоте.

Имеющиеся в литературе многочисленные методики расчетов не учитывают биологические выделения явной теплоты в насыпях, например, [2, 28, 34, 73, 90, 91, 95, 105, 112], другие учитывают их частично [52].

В исследованиях [5] предлагается упрощенная методика расчета производительности систем активной вентиляции картофелехранилищ по балансу явной теплоты в насыпях с учетом биологических тепловыделений:

$$L_m = \frac{q_v G}{c_b (t_{cp} - t_{bo}^{cp})} \quad (1.8)$$

Применение этого метода к нестационарному режиму охлаждения вызывает необходимость введения поправочного коэффициента к величине  $L_m$  до 3,0.

Ю.П. Калугина [52], приняв постоянство температуры по высоте насыпи картофеля ( $t_{ко} = \text{const}$ ), учла биологические тепловыделения в конечном решении путем введения «расчетной» теплоемкости  $c_{кр}$ , полученной пересчетом теплоемкости клубней  $c_k$ :

$$c_{кр} = c_k + \frac{q_v \tau}{(t_{ко} - t_{кк})} - \frac{q_v \tau i}{(t_{ко} - t_{кк})} \quad (1.9)$$

Непостоянство теплофизических характеристик сырья в течении периода хранения приводит к завышению величины теплоемкости  $c_{кр}$  до 20 %.

В работах [2, 33, 52, 96] необоснованно принимается допущение об отсутствии переноса теплоты в насыпях сочного растительного сырья естественной конвекцией. Слой считается изотропным параллелепипедом с равномерно распределенными по объему источниками теплоты. Решение поставленной таким образом задачи можно свести к известному решению А.В. Лыкова для пластин [64].

Естественная конвекция, вызванная биологическими тепловыделениями СРС является причиной нарастающего по высоте профиля температур, который принимается линейным [47, 106]. Учет начального градиента температуры в насыпи приводит к уменьшению до 20 % времени охлаждения [47].

Совместное решение системы балансовых уравнений тепло- и массопереноса в насыпи картофеля с постоянной начальной температурой  $t_{к0} = \text{const}$  при учете явных тепловыделений  $q_0$  и добавление уравнения переноса влаги настолько усложнило решение, что удовлетворительной сходимости численных и экспериментальных результатов добиться не удалось [108].

Учет конвективной составляющей теплопроводности в продольном и поперечном направлениях насыпи приводит к дальнейшему усложнению модели и неопределенностям конечных практических решений [6].

Н.И. Гамаюнов [31] приводит следующие выводы: отсутствие экспериментальной проверки численных решений и учета начального градиента температуры по высоте слоя, неточность задания коэффициентов  $\alpha_t$  и  $\alpha_d$  не позволяют считать обоснованными рекомендуемые введения в модель конвективных составляющих теплообмена. Практическая ценность решения зависит от точности полученных из опыта коэффициентов переноса. Выбор математической модели должен соответствовать степени точности их

определения. Чем с меньшей достоверностью известны коэффициенты переноса, тем проще должна быть математическая модель.

В работе [39] дополнительно вводятся коэффициенты теплопроводности  $\lambda_k$  и теплоемкости  $c_k$  продукции, коэффициента формы клубней, числа  $Bi$  при отсутствии экспериментальной проверки основных параметров переноса  $\alpha_t$  и  $\alpha_d$ , что усложнило решение задачи и не привело к более точным результатам. В конечном итоге решение сведено к известным зависимостям при  $t_{ко} = \text{const}$  и  $q_v = 0$  [49].

Получены решения задачи формирования температурных полей в насыпях биологически активной продукции при постоянной начальной температуре слоя ( $t_{ко} = \text{const}$ ) с учетом явных тепловыделений и реальной теплопроводности сырья [20], которые не подтверждены экспериментально.

При всей полезности общих аналитических решений по тепломассопереносу в слое биологически активной продукции они еще не удовлетворяют потребностям практики. В результате предпринимаются попытки логических построений на основе обобщения опытных данных.

Предложена графическая зависимость времени охлаждения слоя картофеля высотой  $h = 4,8$  м при различных скоростях воздуха в насыпи при постоянстве явных тепловыделений ( $q_v = \text{const}$ ) и постоянной начальной температуре слоя ( $t_{ко} = \text{const}$ ) [113].

Экспериментально выявлена скорость распространения фронта охлаждения насыпей картофеля и овощей при снижении их температуры наполовину [111].

Зависимости, характеризующие поля влажности в слое СРС получены без учета саморегулирования равновесной относительной влажности  $\varphi_p$  [2, 28, 39, 52, 108].

Распределение температуры и относительной влажности воздуха по высоте слоя пищевых продуктов путем решения системы балансовых уравнений дано в [28].

В литературе можно встретить конкретные экспериментальные зависимости интенсивности процесса испарения влаги с поверхности сочного растительного сырья (для картофеля) [90, 105, 112].

Основные закономерности термодинамической теории профессора В.З. Жадана, дают количественные характеристики интенсивности испарения влаги в слое СРС [44, 45, 46]. Влагообмен в насыпи СРС рассматривается как процесс ассимиляции продуваемым воздухом выделяемой влаги и явной теплоты в процессе дыхания. Эта интерпретация процесса влагообмена в слое сырья позволяет решать вопросы расчета интенсивности тепловлагообмена применяя  $I-d$ -диаграмму. Количественно процесс влагообмена характеризуется следующим равенством:

$$W = Q / \varepsilon_t, \quad (1.10)$$

где  $W$  – количество испаряющейся с поверхности СРС влаги, кг;

$Q$  – теплопритоки от продукции к вентилируемому воздуху, кДж;

$\varepsilon_t$  – тепловлажностная характеристика процесса, кДж/кг.

В (1.10) тепловлажностная характеристика изменения состояния воздуха в насыпи  $\varepsilon_t$ , определяется выражением:

$$\varepsilon_t = 6385 - 147t, \text{ при } 0 \leq t \leq 15 \text{ } ^\circ\text{C}; \quad (1.11)$$

$$\varepsilon_t = 6385 - 1,21t^2 - 335t, \text{ при } -25 \leq t \leq 0 \text{ } ^\circ\text{C}, \quad (1.12)$$

где  $t$  – средняя температура воздуха в насыпи,  $^\circ\text{C}$ .

Изменение влажности воздуха в насыпи характеризуется следующей зависимостью:

$$\varphi_{\text{в}} = \varphi_{\text{р}} = \text{const}, \quad (1.13)$$

показывающей отсутствие насыщения воздуха по высоте охлаждаемой насыпи  $(1 - \varphi_{\text{в}}) = \text{const}$  (рисунок 1.9).

Многие исследователи [1, 18, 27, 50, 93, 96] указывают на универсальность зависимости (1.10) при нахождении потерь влаги в СРС.

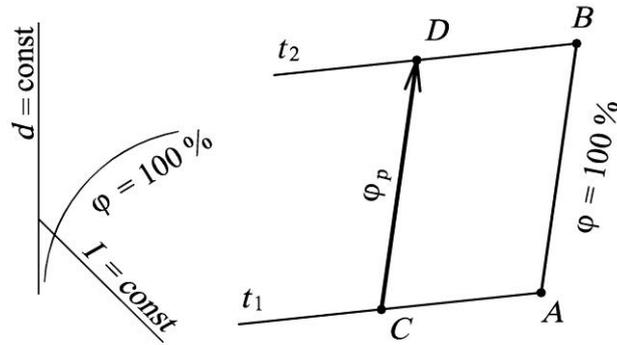


Рисунок 1.9 – Процесс изменения тепловлажностной характеристики воздуха проходящего через насыпь:  $AB$  – эквидистанта линии  $CD$  на линии  $\varphi = 100\%$ ;  $CD$  – процесс в насыпи

В результате дискуссии ведущих ученых страны по тепломассообмену и холодильной технике, зависимость (1.10) признана справедливой для равновесных процессов тепломассообмена в СРС. Отсутствие соблюдения равенства (1.13) в корректирующем слое не снижает практической ценности формулы (1.10).

Перенос явной и скрытой теплоты между продуваемым воздухом и продукцией происходит в одном направлении (рисунок 1.10), что является основной особенностью тепло-массопереноса в насыпи СРС. Воздух, поступающий в насыпь, проходит через корректирующий слой, в котором он увлажняется до равновесных значений, при этом испаряющаяся влага способствует снижению температуры продукции, что подтверждено экспериментально для капусты [18, 98] и картофеля [46, 106] (рисунок 1.11).

Давление насыщения водяного пара на поверхности СРС равно предельному давлению при температуре сырья, т.е. относительная влажность у поверхности  $\varphi_{\text{пов}} \cong 100\%$ . Экспериментально доказано равенство равновесной относительной влажности и относительной влажности воздуха по всей высоте основного слоя насыпи СРС  $\varphi_{\text{в}} \cong \varphi_{\text{р}}$  [18, 28, 44, 93].

Постоянные потери влаги сырьем при хранении вызваны неизбежной ассимиляцией влаги продуваемым воздухом. Эта особенность объясняется тем, что температура поверхности сырья  $t_{\text{пов}}$  больше температуры продуваемого воздуха  $t_{\text{в}}$  из-за наличия теплоты дыхания, в результате чего

упругость пара воздуха выше чем у поверхности сырья даже при полном насыщении. Вся явная теплота, вносимая в насыпь хранящейся продукции продуваемым воздухом в результате обработки продукции переходит в скрытую, тем самым способствует возрастанию потерь при хранении сырья.

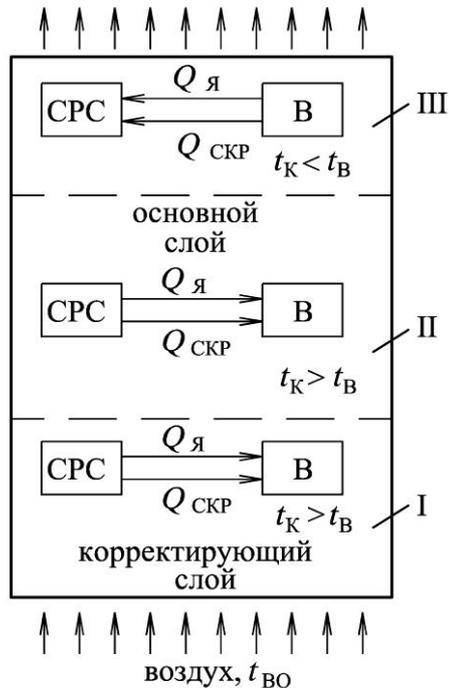


Рисунок 1.10 – Процессы теплообмена в слоях хранящейся продукции: I – корректирующий слой; II – основной слой; III – верхний слой (охлаждение воздуха, процессы  $CD$  или  $CD_1$  на рисунке 1.12)

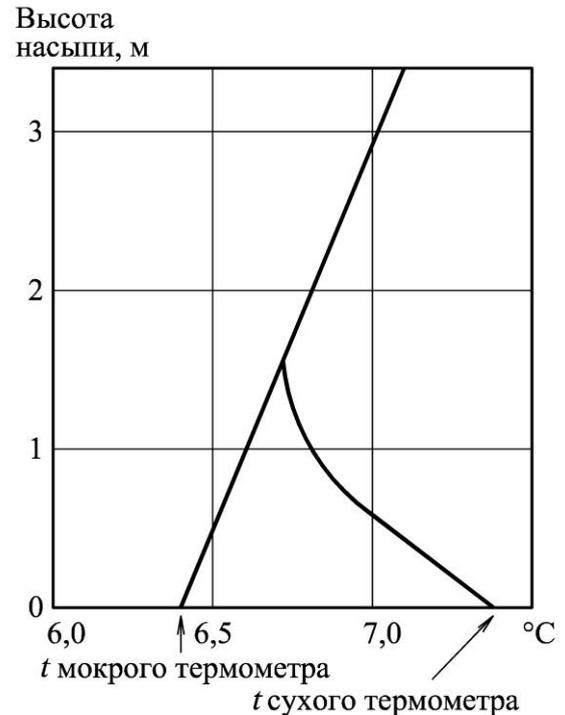


Рисунок 1.11 – Стационарный режим при охлаждении насыпи:  $\varphi_{в.о.} = 87\%$ ;  $L = 34 \text{ м}^3/(\text{м}^2\text{ч})$

Когда вентиляция в хранилище выключена, температура продукции в верхнем слое (III слой, рисунок 1.10) может стать ниже, чем температура внутри основного слоя, что приведет к охлаждению воздуха и, возможно, конденсации влаги на поверхности сырья при возобновлении работы системы вентиляции (процесс  $CD$ , рисунок 1.12).

Изменение тепловлажностной характеристики продуваемого воздуха на  $I-d$ –диаграмме приведено на рисунке 1.12.

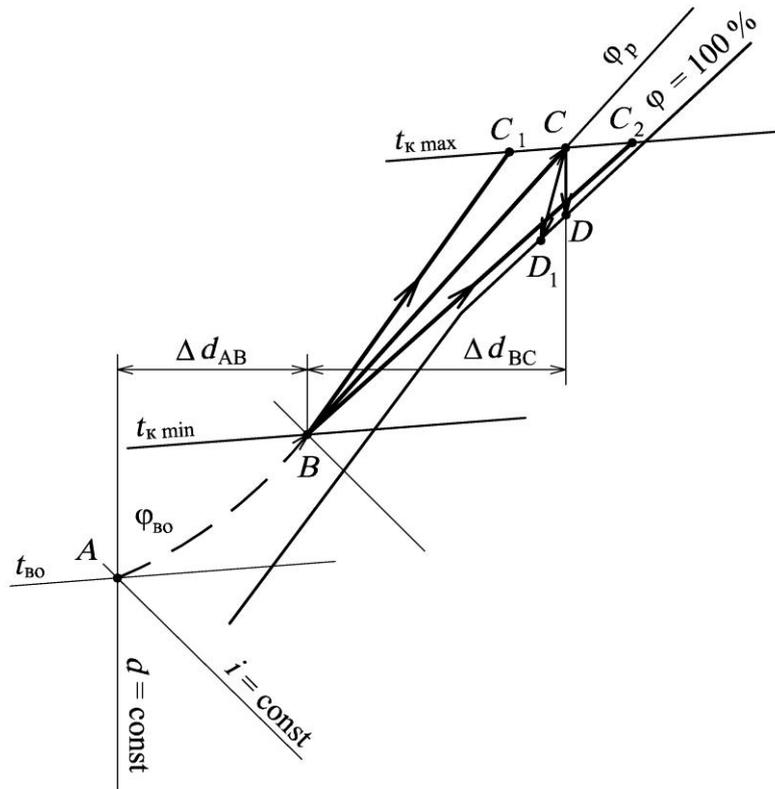


Рисунок 1.12 – Изменение состояния продуваемого воздуха в насыпи сочного растительного сырья

Процесс  $AB$  характеризует тепловлажностную обработку воздуха в корректирующем слое, в котором происходит увлажнение от  $\phi_{bo}$  до  $\phi_b \cong \phi_p$  с одновременным нагревом от  $t_{bo}$  до температуры нижней части основного слоя  $t_{k \min}$ . Процесс  $BC$  описывает процесс изменения тепловлажностной характеристики в основном слое, который эквидистантен соответствующему участку линии полного насыщения  $\phi = 100\%$ . Продуваемый через верхний слой воздух может достичь состояния полного насыщения (процесс  $CD$ ) или привести к выпадению конденсата (процесс  $CD_1$ ). Из насыпи воздух выходит с параметрами точки  $C$ .

Невозможность отклонения процесса  $BC$  от соответствующего эквидистантой линии полного насыщения  $\phi_p = \text{const}$ , т.е. невозможность процессов  $BC_1$  или  $BC_2$  на рисунке 1.12, охарактеризовано профессором В.З. Жаданом [46, с.67...68]: «...возникает физически необъяснимое противоречие между приращением влагосодержания воздуха (его осушающей способностью) и причиной, вызывающей это явление

(дефицитом влагосодержания воздуха): большому приращению влагосодержания воздуха будет отвечать малый дефицит влагосодержания и наоборот, чего быть не может».

Потери продукции составляют:

$$W = (\Delta d_{AB} + \Delta d_{BC}) \cdot L \cdot \rho_v. \quad (1.14)$$

Довести потери до биологически оправданных ( $\Delta d_{AB} \cdot L \cdot \rho_v$ ) возможно при предварительной обработке наружного воздуха.

Неясность в определении движущей силы тепломассопереноса ограничивает применение *I-d*-диаграммы для расчета процессов тепломассообмена в слое сочного растительного сырья, что оказывает определяющее влияние на режимы работы, производительность и конструктивные особенности систем обеспечения параметров микроклимата овощекартофелехранилищ.

#### 1.1.4 Режимы работы систем активной вентиляции в хранилищах

Для создания оптимального по условиям хранения температурно-влажностного режима применяют одно из двух основных направлений конструирования систем вентиляции:

1. Раздельная ассимиляция искусственными источниками холода внешних теплопритоков в хранилище и физиологической теплоты дыхания, выделяемой продукцией;

2. Применение активной вентиляции насыпи с использованием естественного холода.

Для массового хранения основных продовольственных овощей: картофеля, капусты, свеклы и моркови, более характерен второй способ как более дешевый, не требующий дорогостоящего холодильного оборудования и более простой в эксплуатации, что особенно важно в условиях сельскохозяйственного производства.

Также технологические режимы хранения СРС зависят от биологических особенностей сорта, состояния продукта в убранном урожае и типа хранилища. При хранении картофеля и овощей применяют различные системы вентиляции: естественная, общеобменная и активная (рисунок 1.8).

Естественные системы вентиляции применяются при хранении небольших объемов продукции, а также при хранении в буртах и стационарных хранилищах. В буртах с естественной вентиляцией холодный воздух неорганизованно поступает в насыпь, ассимилирует тепло- и влаговыделения продукции и удаляется в атмосферу через вытяжные короба. Основным недостатком буртов с естественной вентиляцией заключается в заниженном воздухообмене ( $L_m < 4 \text{ м}^3/(\text{т}\cdot\text{ч})$ ) [77, 118]. В буртах с неорганизованным воздухообменом для поддержания оптимальной температуры сырья необходимо ограничить высоту насыпи: для картофеля и свеклы до 1,0...1,2 м [18, 46], для капусты до 0,8 м [18, 100].

Общеобменные системы вентиляции с механическим побуждением (рисунок 1.8б) применяется главным образом при контейнерном хранении. Охлаждение продукции осуществляется за счет «омывания» контейнеров воздухом. Основным недостатком такой схемы является формирование нормируемых температурно-влажностных параметров воздушной среды в объеме воздуха хранилища, а не в массе продукции каждого контейнера. Кратность воздухообмена в контейнерных хранилищах в период охлаждения принимается по [72] в зависимости от загруженности хранилища и составляет  $n = 8...12 \text{ ч}^{-1}$ , в основной период хранения  $n = 4...6 \text{ ч}^{-1}$ . Управление микроклиматом в массе продукции при контейнерном хранении путем регулирования скорости фильтрации и изменения кратности воздухообмена неэффективно из-за незначительной скорости в межклубневом пространстве.

В ряде стран Западной Европы, в США и Канаде широко используются контейнеры с плотными воздухонепроницаемыми стенками и двойным (решетчатым и сплошным) дном. Размещенная в них продукция продувается

воздухом следующим образом. В помещении предусматривают размещение приточных воздуховодов у стен во всю их высоту. В стенках воздуховодов устраивают отверстия, совпадающие со щелями между сплошным и решетчатым дном контейнеров. Контейнеры устанавливают впритык к воздуховодам. Воздух через щели в решетчатом дне поступает в контейнеры и удаляется через специальные зазоры в стенках (рисунок 1.13), то есть происходит активная вентиляция продукции в контейнере.

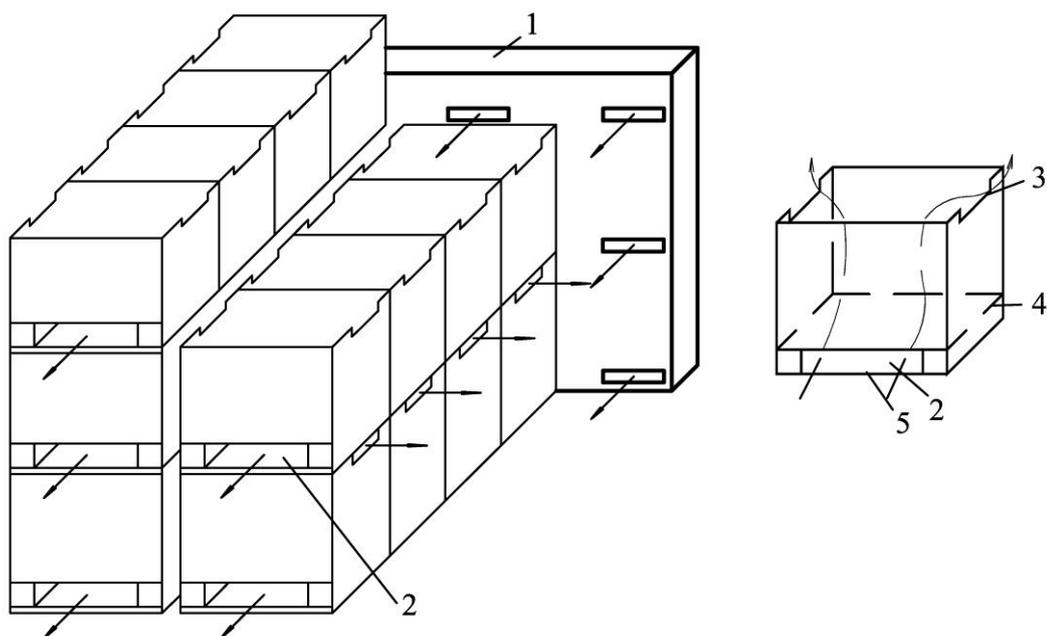


Рисунок 1.13 – Воздухораспределение в хранилище с активной вентиляцией при контейнерном способе хранения [15]: 1 – приточный канал; 2 – подача воздуха в контейнер; 3 – выход воздуха из контейнера; 4 – решетка; 5 – цельное дно контейнера

Подача воздуха в хранилищах с системами активной вентиляции может осуществляться в направлениях относительно насыпи «снизу вверх» и «сверху вниз».

При схеме вентиляции «снизу вверх» воздух из распределительных каналов поступает в насыпь продукции через решетчатые полы, специальные напольные раздающие короба или подпольные каналы с решетчатыми покрытиями. Скорость воздуха на выходе из канала в насыпь картофеля и овощей не должна превышать 1,0 м/с [16].

В случае подачи воздуха по схеме «сверху вниз», как правило, устанавливаются реверсивные системы активной вентиляции (РСАВ), в

которых происходит поочередное изменение подачи воздуха в насыпь сырья «сверху вниз» и «снизу вверх» рисунок 1.14.

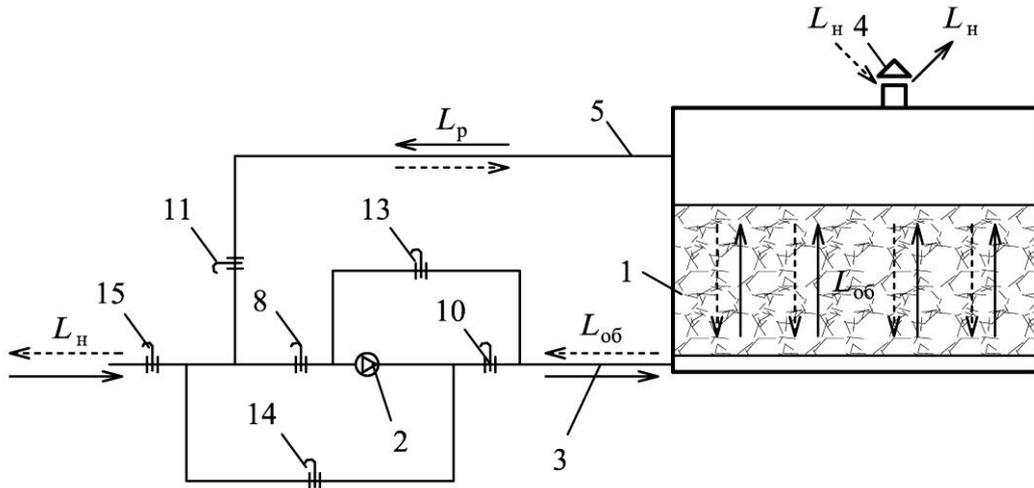


Рисунок 1.14 – Реверсивный способ работы системы активной вентиляции [15].

Направление подачи воздуха: → «сверху вверх»; -----→ «сверху вниз»

*Продувка «снизу вверх»* (рисунок 1.14). В насыпь СРС 1 вентилятором 2 по приточному воздуховоду 3 подается охлаждающий продукцию воздух. В период охлаждения происходит прямоточная (без рециркуляции) подача наружного воздуха в насыпь с расходом  $L_{об}$ , который полностью удаляется в атмосферу через вытяжную шахту 4. При этом регулирующая арматура (дроссели, шиберы) на приточных воздуховодах 15, 8, 10 открыта, на остальных воздуховодах 11, 13, 14 закрыта. Происходит прямоточная (без рециркуляции) подача приточного воздуха в насыпь.

В основной период хранения приготовление приточного воздуха осуществляется путем смешивания минимально необходимого количества наружного воздуха  $L_{н}$  с рециркуляционным  $L_{р}$ , забираемым из хранилища по рециркуляционному воздуховоду 5. В данном режиме эксплуатации РСAB работает вентилятор 2, регулирующая арматура 15, 8, 10, 11 открыта для прохода воздуха, клапаны 13, 14 закрыты. Прошедший через насыпь воздух в количестве  $L_{н}$  через вытяжную шахту 4 удаляется в атмосферу. Остальная часть  $L_{р} = (L_{об} - L_{н})$  направляется по рециркуляционному воздуховоду 5 для повторного использования.

*Продувка «сверху вниз»* (рисунок 1.14). В период охлаждения (в насыпь поступает только наружный воздух в количестве  $L_{об}$ ) при работающем вентиляторе 2 атмосферный воздух забирается через вытяжную шахту 4, проходит через насыпь 1, по воздуховодам - байпасам и удаляется в атмосферу. Открыты следующие дроссели: 15, 14, 13; закрыты 8, 10, 11. Основной период хранения характеризуется смешиванием наружного  $L_n$  и рециркуляционного  $L_p$  воздуха перед поступлением его в насыпь в свободной от продукции верхней части объема хранилища. Открыты дроссели (шиберы) 15, 14, 13, 11, закрыты - 8, 10.

Профессором В.И. Бодровым разработана методика расчета режимов работы систем активной вентиляции для всех периодов хранения: лечебный; охлаждения; основной [16].

*Лечебный период* не рассматривается, поскольку его цели носят преимущественно биологический характер. Он осуществляется путем аэрации насыпи наружным воздухом любой положительной температуры.

*В период охлаждения* режимы работы САВ нормируются биологически оптимальным темпом охлаждения насыпи  $\Delta z_{опт} = 0,02 \dots 0,04$  °С/ч. Время работы САВ в течение суток характеризуется коэффициентом использования вентиляции:  $K_v = \Delta \tau_v / 24$ , где  $\Delta \tau_v$  – время работы систем вентиляции в сутки, ч. [16].

$$K_v = 2 \frac{1 + 0,25\eta_{эф}}{1 + 1,5L_{эф}}, \quad (1.15)$$

где  $\eta_{эф} = 10^4 \Delta z_{опт} / q_{СРС}$ , м<sup>3</sup> °С/кДж, – коэффициент эффективности охлаждения, учитывающий отношение оптимальной скорости охлаждения к объему внутренних тепловыделений, интервал численных значений равен 1...7;

$L_{эф} = L_v \Delta T_0 / q_{СРС}$ , м<sup>3</sup>°С/кДж, – приведенный к мощности тепловыделений и начальным температурным условиям ( $\Delta T_0 = t_{к.о} - t_{в.о}$ ) расход воздуха.

Оптимальные значения приведенного расхода на 1 кубический метр насыпи СРС, м<sup>3</sup>/(м<sup>3</sup>ч), лежат в пределах:

$$L_{v \text{ опт}} \geq (3,8 q_{\text{СРС}} + 1,1 \cdot 10^4 \Delta z_{\text{опт}}) / \Delta T_0. \quad (1.16)$$

Величина  $L_{v \text{ опт}}$  должна быть ограничена при высоте насыпи от 3,0 до 6,0 м значением [16]:

$$L_{v \text{ опт}} < 717/h = 120 \dots 240 \text{ м}^3/(\text{м}^3\text{ч}). \quad (1.17)$$

Целью работы систем активной вентиляции в *основной период хранения* является обеспечение оптимальной температуры продукции и относительной влажности воздуха в межклубневом пространстве.

Необходимый расход воздуха при непрерывной вентиляции определяется условием  $\Delta T_0 = 2 \text{ }^\circ\text{C}$  и равен:

$$L_{v \text{ непр}} = 0,4 q_{\text{СРС}}. \quad (1.18)$$

Циклическая работа вентиляции предусматривает периодическое охлаждение. При выключенной вентиляции темп разогрева максимален в верхних слоях насыпи. Естественная конвекция, охлаждая нижние слои, приводит к неизбежной стратификации температуры по высоте.

Практически имеющее место колебание температуры поступающего в насыпь воздуха  $t_{\text{во}}$ , средней температуры его в хранилище  $t'_{\text{хр}}$ , недостаточная точность их контроля во избежание вредных последствий избыточного вентилирования и усушки продукции делают предпочтительными оптимальные режимы, соответствующие средним значениям  $K_{\text{в}}$  [18]:

$$K'_{\text{в опт}} = (0,27 \dots 0,4) \frac{q_{\text{СРС}}}{L_v} = 0,33 \frac{q_{\text{СРС}}}{L_v}; t_{\text{во}} > t'_{\text{хр}}; \quad (1.19)$$

$$K''_{\text{в опт}} = (0,45 \dots 0,65) \frac{q_{\text{СРС}}}{L_v} = 0,55 \frac{q_{\text{СРС}}}{L_v}; t_{\text{во}} < t'_{\text{хр}}. \quad (1.20)$$

Приведенные зависимости позволяют определить общее время работы вентиляции для снятия теплоизбытков. Нахождение циклическости работы САВ в течение суток связано с вопросами обеспечения влажностного режима насыпи. В процессе вентиляции пониженная влажность подаваемого воздуха увеличивает естественную убыль.

Оперативная коррекция режимов работы картофелехранилищ, в основной период хранения, при отличных от оптимальных условий хранения

( $t'_{xp} \neq 1,5 \text{ }^\circ\text{C}$ ) может быть проведена по зависимостям [16]:

$$K'_B = 0,8 \frac{q_{CPC}}{(4 - t'_{xp})L_v} - 3,4 \frac{2 - 0,5t'_{xp}}{L_v h}, \text{ при } t'_{xp} \leq 3 \text{ }^\circ\text{C}; \quad (1.21)$$

$$K''_B = 1,3 \frac{q_{CPC}}{\Delta T_o L_v}, \text{ при } t'_{xp} > 3 \text{ }^\circ\text{C}. \quad (1.22)$$

В действующих картофелехранилищах системы активной вентиляции подают в насыпь расход воздуха  $L_v$ . Зная его конкретную величину, находят значения  $K_B$  и время работы систем вентиляции в сутки для основного периода и периода охлаждения. Найденное время может быть не равно оптимальному, но будет достаточным для обеспечения температурного режима рассматриваемой насыпи в оба периода хранения.

Длительное непрерывное вентилирование (более 4...6 ч.) нарушает равновесную влажность не только в корректирующем слое, но и по всей высоте насыпи. Возможное некоторое увеличение нормируемой естественной убыли в этом случае компенсируется уменьшением влияния неблагоприятных последствий, вызванных нарушением технологических температурных параметров в насыпи.

В период охлаждения нет оснований для появления зон конденсации во всех слоях насыпи CPC [15].

Для исключения перетоков теплоты из слоя, обрабатываемого системой вентиляции в первую очередь, в следующие слои насыпи по ходу движения воздуха, следует уменьшить время продувки до наступления условия прохождения тепловым фронтом середины высоты насыпи. При этом ассимилируется теплота наиболее нагретых слоев и экономится до 50 % времени работы системы вентиляции:

$$K_B^p = 0,5K_B = 0,5\Delta\tau_B / 24. \quad (1.23)$$

В технической литературе недостаточно данных по одновременной автоматизации температурных и влажностных параметров воздушной среды

овощекартофелехранилищ. Как правило, расчет ведется для достижения оптимальных температурных параметров в хранилище.

Рассмотрены и определены режимы вентиляции хранилищ в зависимости от периода хранения и типа вентиляции – реверсивная или обычная. Данные методики не учитывают влажностный режим насыпи и количественные значения выделения влаги при хранении и ассимиляции влаги системой активной вентиляции и требуют уточнения.

## 1.2. Процессы тепломассообмена при хранении сочного растительного сырья

### 1.2.1 Движущие силы тепломассообмена биологически активной продукции

В процессе хранения СРС свойства продукта зависят от вида и энергии связи с материалом, биологических и биохимических процессов, температурно-влажностных условий. Для определения оптимальных условий хранения необходимо комплексное изучение параметров, которые влияют на интенсивность процессов переноса теплоты и влаги, т.е. приводят к потерям продукции при хранении.

Описание широкого класса явлений переноса, представляет собой ряд дифференциальных уравнений, объединяющих зависимости между термодинамическими силами (градиенты потенциалов) и соответствующими потоками (энергии, вещества) [78]:

$$c_i \rho_0 \left( \frac{\delta \theta_i}{\delta \tau} + \vec{\omega} \nabla \theta_i \right) = \operatorname{div} \sum_{k=1}^n L_{ik} n_k \nabla \theta_k + I_i \quad (1.24)$$

где  $c_i \rho_0$  – обобщенная емкость соответствующего потенциала  $\theta_i$ ;  $\vec{\omega}$  – вектор скорости;  $I_i$  – источник вещества или энергии;  $L_{ik}$  – кинетические коэффициенты переноса;  $\tau$  – время;  $n_k$  – коэффициент пропорциональности между силой и градиентом потенциала.

Число уравнений (1.24), ограничивается двумя, т.к. в нашем случае рассматривается только потоки теплоты и массы. За соответствующие потенциалы переноса теплоты и влаги принимаются температура и влагосодержание:

$$\begin{cases} c_p \rho_0 \frac{\partial T}{\partial \tau} = -\operatorname{div}(j_q) + r_0 I_{mi}; \\ \rho_0 \frac{\partial u_i}{\partial \tau} = -\operatorname{div}(j_m) + r_0 I_{mi}, \end{cases} \quad (1.25)$$

где  $j_q$  и  $j_m$  – удельные потоки тепла и массы соответственно;  $i$  – индекс обозначающий состояние вещества, при  $i = 1$  – парообразное, при  $i = 2$  – конденсированное.

Источники массы в силу сохранения энергии определяются по формуле А.В. Лыкова [63, 64, 65]:

$$I_{m1} = -I_{m2} = I_m = \varepsilon \rho_0 \frac{\partial u}{\partial \tau}, \quad (1.26)$$

где  $\varepsilon$  – критерий фазового превращения.

В СРС невозможно отделить движение жидкости от движения пара, оба процесса взаимосвязаны. Взаимосвязь выражена в фазовом переходе вещества. На процесс фазового превращения не всегда оказывает влияние термодинамическая природа – возможны процессы сорбции и десорбции влаги в капиллярах при постоянной температуре.

Определяя величины потоков тепла и влаги по уравнениям:

$$\begin{cases} j_q = -\lambda \nabla T; \\ j_m = -a_m \rho_0 \nabla u - a_m^T \rho_0 \nabla T, \end{cases} \quad (1.27)$$

А.В.Лыковым получена следующая система уравнений [63, 64, 65]:

$$\begin{cases} c_p \rho_0 \frac{\partial T}{\partial \tau} = \lambda \nabla^2 T + \varepsilon r_0 \rho_0 \frac{\partial u}{\partial \tau}; \\ \frac{\partial u}{\partial \tau} = a_m (\nabla^2 u + \delta_T \nabla^2 T), \end{cases} \quad (1.28)$$

где  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности;  $a_m$  – коэффициент диффузии влаги;  $a_m^T$  – коэффициент термодиффузии;  $\delta$  – относительный коэффициент термодиффузии, являющийся функцией влагосодержания ( $\delta = a_m^T / a_m$ ).

Для решения системы уравнений (1.28) необходимо принять краевые условия в виде начального распределения влагосодержания и температуры и граничные условия, характеризующие законы внешнего теплообмена на поверхности сырья.

Определение удельного потока влаги в виде системы уравнений (1.28)

приводит к необходимости выражения граничных условий влагообмена через величину равновесного влагосодержания  $u_p$  в следующем виде:

$$j_m = \beta \rho_0 (u_{II} - u_p), \quad (1.29)$$

где  $\beta$  – коэффициент массообмена, отнесенный к разности влагосодержаний;  $u_{II}$  – влагосодержание на поверхности тела.

Неудобство применения на практике выражения (1.29) связано с тем, что с уменьшением влагосодержания  $u_{II}$  при постоянном равновесном влагосодержании коэффициент массообмена  $\beta$  резко возрастает, его изменения могут достигать весьма больших величин – до 1200 % [63].

Плотность потока массы жидкости испаряющейся с поверхности хранящегося продукта можно определить с помощью эмпирической формулы Дальтона [6, 28, 63]:

$$j_p = \frac{\beta_p (p'_p - p_o)}{p_6} \cdot 101,3 \cdot 10^3, \quad (1.30)$$

где  $j_p$  – плотность потока массы;  $\beta_p$  – коэффициент массообмена, отнесенный к размерности парциального давления пара;  $p'_p$  – парциальное давление пара на поверхности жидкости при 100% насыщении;  $p_o$  – парциальное давление пара в газовой среде;  $p_6$  – барометрическое давление.

Для нахождения коэффициента массообмена  $\beta_p$ , А.В. Нестеренко предложил использовать следующие зависимости [70]:

$$Nu_m = 0,66 (Ar \cdot Pr_m)^{0,26}; \quad (1.31)$$

$$Nu_m = 0,0248 \cdot Re^{0,9} Pr_m^{0,33} Gu^{0,135}. \quad (1.32)$$

Выражения (1.31, 1.32) справедливы при  $Re = 2,2 \cdot 10^4 \dots 3,15 \cdot 10^5$ . Зависимость (1.31) определяет коэффициент массообмена при условии свободной конвекции, зависимость (1.32) – при вынужденной конвекции.

Основным недостатком применения выражений (1.30...1.32) является невозможность учета физических условий на поверхности продукта. Использование уравнения (1.30) в области низких температур вызывает трудности, связанные с высокой погрешностью при определении парциального давления пара. Также применение уравнения (1.30) не позволяет рассчитать интенсивность массообмена при конденсации пара, поскольку выражение (1.32) учитывает только процесс испарения жидкости с плоской поверхности. Выражение (1.30) при определении потока влаги, переносимого от слоя хранящегося СРС к воздуху, неприменимо, т.к. оно характеризует стационарный процесс влагообмена, а при хранении СРС парциальные давления  $p'_n$  и  $p_o$  имеют переменные значения по высоте слоя.

Ф. Леви предложил для определения количества испаряемой влаги с поверхности продукта использовать зависимость, основанную на психрометрическом методе [109, 110]:

$$g = 0,622 \frac{\alpha}{\mu c_p} \cdot \frac{P_s - \Phi P_0}{P_0} F \tau. \quad (1.33)$$

Сложность применения на практике данного метода, основанного на понятии адиабатического насыщения, связана с определением психрометрического коэффициента. Получить правильные значения коэффициента и объяснить качественный характер его изменения, в зависимости от различных факторов, не представляется возможным [36].

Г.Б. Чижов [92] исследуя зависимость (1.33), указывает на то, что эта зависимость весьма неопределенна, т.к. пока найдено очень немного числовых значений «коэффициента сопротивления испарению»  $\mu > 1$ .

Психрометрический метод имеет и другие недостатки. Один из них заключается в том, что температура продукта, с которого происходит испарение влаги, должна быть принята ниже температуры окружающего или продуваемого воздуха, что в практике хранения СРС практически не бывает. Также теория психрометрического метода не в состоянии объяснить факт испарения влаги при относительной влажности, стремящейся к 100 %.

Область применения психрометрического метода ограничивается рамками конвективного теплообмена и применима к описанию процессов испарения влаги со свободной поверхности при условии, что температура поверхности ниже температуры окружающего воздуха.

Метод тепловлажностных характеристик в отличие от психрометрического метода более близок к реальным условиям хранения биологически активной продукции, т.к. температурный диапазон в процессе влагоотдачи не ограничивается условием – температура поверхности продукта ниже температуры продуваемого воздуха. Метод основан на применении тепловлажностной теории профессора В.З. Жадана [48] и выражается зависимостью 1.10.

Основная особенность расчетов с применением данной теории заключается в определении тепловлажностной характеристики процесса, для определения которой необходимо использовать эмпирические зависимости вида  $\varepsilon_t = \varepsilon_t(t_0)$ . Для возможности применения этих зависимостей В.З. Жаданом [44] доказана гипотеза, подтвержденная экспериментально [47], о постоянстве относительной влажности в слое хранящейся продукции, при условии отвода теплоты и влаги.

Парциальное давление водяного пара, выбранное для определения характеристики интенсивности переноса влаги в психрометрическом методе и методе тепловлажностных характеристик, не может служить в качестве такой характеристики, т.к. оно справедливо в изотермических условиях. При хранении СРС поле температур не стационарно по высоте насыпи.

Для возможности описания процесса испарения влаги с поверхности хранящейся продукции в неизотермических условиях, М.А. Волков [28] предложил определять плотность потока влаги по следующей зависимости:

$$j_m = \beta_m \Delta \psi, \quad (1.34)$$

где  $\beta_m$  – коэффициент массообмена, отнесенный к размерности потенциала вещества;  $\Delta \psi$  – изменение обобщенной движущей силы взаимосвязанного

тепломассообмена.

Движущая сила обобщенного тепломассообмена представляет собой сумму «свободной» массообменной силы и силы «термодинамического принуждения»:

$$\Delta\psi = (\psi_0 - \psi) = (\mu_0 - \mu) + \Theta'_T(T_0 - T), \quad (1.35)$$

где  $\mu_0$  – начальный потенциал вещества;  $\mu$  – конечный потенциал вещества;  $\Theta'_T$  – температурный коэффициент химического потенциала.

Физический смысл потенциала вещества определяется Гиббсом как внешняя работа, производимая системой при обратимом изменении ее массы на единицу и определяется по зависимости [6, 23, 28]:

$$\mu = RT \ln \varphi. \quad (1.36)$$

Теоретические и экспериментальные проблемы при определении свободной энергии затрудняют использование выражения (1.34). М. Джоунс [37], представил зависимость изменения свободной энергии Гиббса в следующем виде:

$$\ln K = -\Delta H^\circ/RT + \Delta S^\circ/R. \quad (1.37)$$

Применение зависимости (1.37) теряет смысл, если ошибка эксперимента более 0,5 %, что ограничивает применение градиента потенциала вещества для расчета процессов массопереноса в слое СРС.

Рассмотренные методы расчета тепломассообмена, базирующиеся на различных методах и понятиях не могут с достаточной точностью описать процессы, происходящие при хранении биологически активной продукции. Описание процессов тепломассообмена при использовании указанных зависимостей требует определения ряда параметров, нахождение которых крайне затруднительно на практике.

В настоящее время отсутствуют методики расчета процессов тепломассообмена в слое хранящегося сочного растительного сырья, которые отвечали бы требованиям простоты при их применении и инженерной степени точности при расчете.

### 1.2.2. Потенциал влажности как движущая сила тепломассопереноса

Теория потенциала влажности была разработана профессором А.В. Лыковым [64]. В термодинамике принят ряд функций, характеризующий состояние отдельных фаз и компонентов влажного материала: внутренняя энергия, энтальпия, свободная энергия. Расчет изменения состояния влажного материала связан с выбором некоторой функции  $Z_i$ , которая определяется относительно изменения ряда независимых переменных:

$$d\Phi_i = \frac{\partial\Phi_i}{\partial S_i} dS_i + \frac{\partial\Phi_i}{\partial V_i} dV_i + \frac{\partial\Phi_i}{\partial m_i} dm_i, \quad (1.38)$$

где  $Z$  – независимая переменная;  $V$  – объем фазы или компонента;  $m$  – масса фазы или компонента.

На основании выражения (1.38), запишем изменение свободной энергии  $i$ -ой фазы, используя в качестве независимой переменной температуру этой фазы:

$$dF_i = \frac{\partial F_i}{\partial T_i} dT_i + \frac{\partial F_i}{\partial V_i} dV_i + \frac{\partial F_i}{\partial m_i} dm_i, \quad (1.39)$$

где  $\frac{\partial F_i}{\partial T_i} = -S_i$  – энтропия фазы;  $\frac{\partial F_i}{\partial V_i} = P_i$  – давление фазы;  $\frac{\partial F_i}{\partial m_i} = \mu_i$  – химический потенциал фазы.

С учетом расшифровки слагаемых правой части уравнения (1.39), его можно записать в виде:

$$dF_i = -S_i dT_i - P_i dV_i + \mu_i dm_i. \quad (1.40)$$

Полученное выражение – одна из форм записи энергии Гиббса для открытой фазы. С его помощью можно определить свойство каждой фазы влаги в материале. При этом изменение свободной энергии всей системы определяется суммой изменений свободных энергий всех фаз влаги присутствующих в материале.

Влага в материале находится в различных агрегатных состояниях. Изменение свободной энергии каждой фазы влаги в материале определяется следующим образом:

$$dF_{\text{п}} = -S_{\text{п}}dT_{\text{п}} - P_{\text{п}}dV_{\text{п}} + \mu_{\text{п}}dm_{\text{п}}, \quad (1.41)$$

где  $S_{\text{п}}$  – энтропия пара;  $P_{\text{п}}$  – давление пара;  $\mu_{\text{п}}$  – химический потенциал пара;

$$dF_{\text{л}} = -S_{\text{л}}dT_{\text{л}} - P_{\text{л}}dV_{\text{л}} + \mu_{\text{л}}dm_{\text{л}}, \quad (1.42)$$

где  $S_{\text{л}}$  – энтропия льда;  $P_{\text{л}}$  – давление льда;  $\mu_{\text{л}}$  – химический потенциал льда;

$$dF_{\text{ж}} = -S_{\text{ж}}dT_{\text{ж}} - P_{\text{ж}}dV_{\text{ж}} + \mu_{\text{ж}}dm_{\text{ж}} + \sum \mu_{\text{ж}j}dm_{\text{ж}j}, \quad (1.43)$$

где  $S_{\text{ж}}$  – энтропия воды;  $P_{\text{ж}}$  – давление воды;  $\mu_{\text{ж}}$  – химический потенциал воды.

Определение свободной энергии жидкой фазы (уравнение 1.43) отличается наличием в ней растворенных веществ, характеризуемых химическим потенциалом жидкой влаги  $\mu_{\text{ж}j}$ , вызванной наличием в ней растворенных веществ. Свободная энергия сухой части воздуха может определяться по зависимости (1.40), но ввиду ее малой величины ей обычно пренебрегают. Движение влаги в материале медленное, потому принимаем, что температура всех фаз одинакова.

На изменение свободной энергии каждой фазы материала может оказывать влияние различные силовые поля. Действие гравитационного поля на жидкую и твердую фазу влаги можно учесть, добавлением в правую часть уравнений (1.42) и (1.43) следующего слагаемого:  $\Theta_{\Gamma}dm$ , где  $\Theta_{\Gamma}$  – потенциал гравитационного поля. Влиянием гравитационного поля на парообразную влагу пренебрегают.

Плотность жидкой фазы влаги  $\rho_{\text{ж}}$  практически постоянна, поэтому можем преобразовать второе слагаемое правой части уравнения (1.43), следующим образом:

$$P_{\text{ж}} dV_{\text{ж}} = \frac{P_{\text{ж}}}{\rho_{\text{ж}}} dV_{\text{ж}} \rho_{\text{ж}} = \frac{P_{\text{ж}}}{\rho_{\text{ж}}} dm_{\text{ж}}. \quad (1.44)$$

Учитывая влияние гравитационного поля и используя полученные преобразования (1.43), запишем уравнение полного термодинамического потенциала в следующем виде [10, 11]:

$$dF_{\text{ж}} = -S_{\text{ж}} dT_{\text{ж}} + \left( -\frac{P_{\text{ж}}}{\rho_{\text{ж}}} + \mu_{\text{ж}} + \sum \mu_{\text{ж}j} + \Theta_{\Gamma} \right) dm_{\text{ж}}. \quad (1.45)$$

Выражение в скобках, в правой части равенства (1.45), представляет собой полный термодинамический потенциал состояния вещества, в данном случае влаги в жидком состоянии.

Потенциалы фаз всех пограничных слоев, а также потенциалы жидкой, парообразной фазы и льда равны в любой точке влажного материала. Уравнения, характеризующие состояние всех агрегатных состояний влаги в материале можно заменить одним уравнением:

$$dF_{\text{вл}} = -S_{\text{вл}} dT + \theta dm_{\text{вл}}. \quad (1.46)$$

Величина  $\theta$  в выражении (1.46), представляет собой общий потенциал влаги для всех ее агрегатных состояний. Потенциал влажности в вопросе переноса влаги играет такую же роль, как температура в вопросе переноса теплоты. Разность потенциалов влажности определяет возможность, направление и пределы влажностного равновесия, влага переносится от вещества с более высоким потенциалом, к веществу с более низким потенциалом.

Количественное определение потенциала влажности связано с определением химического потенциала, давления, плотности и силы действия различных полей, в которых может находиться исследуемое тело.

Измерение давления отдельных фаз влаги, особенно на поверхности связано со значительными сложностями, а измерение химического потенциала непосредственно в опыте не предоставляется возможным. Для определения потенциала влажности удобно использовать шкалу, которая

определяется равновесной влажностью фильтровальной бумаги, находящейся в контакте и в состоянии влажностного равновесия с исследуемым материалом. Градуировка шкалы потенциала влажности осуществляется в градусах влажности °В. За минимальное значение потенциала влажности принято сухое состояние фильтровальной бумаги – 0 °В, за максимальное – максимально возможная гигроскопическая влажность – 100 °В, при эталонной температуре.

Понятие потенциала влажности нашло применение в расчете влажностного режима многослойных ограждающих конструкций.

Потенциал влажности наружного климата является собирательным показателем воздействий наружных факторов на ограждение:

$$\theta = f(t, \varphi, q_p, i, v, u) \text{ и направление ветра,} \quad (1.47)$$

где  $q_p$  – солнечная радиация, Вт/(м<sup>2</sup>ч).

Для количественной оценки влияния комплекса факторов (1.47) на потенциал влажности, В.Н. Богословским и Б.В. Абрамовым [8] были проведены экспериментальные исследования, в результате получены следующие зависимости представленные в таблице 1.6

Таблица 1.6 – Значения потенциала влажности

Диапазон температур, °С	$\theta, \text{ }^\circ \text{В}$	Номер формулы
менее –20	$-3,81 + 0,195t + 0,164\varphi - 0,0027q_p - 0,035V$	(1.48)
$-20 \leq t \leq -10$	$6,027 + 0,227t + 0,046\varphi - 0,00143q_p - 0,0483V$	(1.49)
$-10 < t \leq 0$	$2,86 + 0,219t + 0,09651\varphi - 0,00349q_p - 0,0081V$	(1.50)
$0 < t \leq 10$	$-4,01 + 0,488t + 0,169\varphi - 0,00468q_p + 0,0165V$	(1.51)
$10 < t \leq 20$	$-13,6 + 1,22t + 0,214\varphi - 0,0026q_p + 0,022V$	(1.52)

С.В. Корниенко [56] приводит шкалу потенциала влажности, применяемую для моделирования процессов влагообмена в ограждающих конструкциях зданий.

Определенное значение потенциала влажности  $\theta$  характеризует множество сочетаний температур  $t_v$  и относительной влажности воздуха  $\varphi_v$ .

Профессор В.Н. Богословский и доцент А.Н. Гвоздков нанесли линии постоянных потенциалов влажности на  $I-d$ -диаграмму (рисунок 1.15) на основании зависимости между потенциалом влажности и упругостью водяного пара при различных температурах полученных экспериментально [9, 32]. Построение графических зависимостей  $\theta$  авторами [9, 32] не было объяснено с термодинамической позиции и не имеет математической обработки.

Для термодинамического обоснования характера направления кривых  $\theta = \text{const}$  М.Н. Кучеренко [59, 60] были проведены аналитические исследования, в результате которых были определены эмпирические зависимости:

$$\theta = 1,244e^{0,219d} \quad (20 < d \leq 30 \text{ и } \varphi < 80\%); \quad (1.53)$$

$$\theta = 6,78e^{0,131d} \quad (0 < d \leq 20 \text{ и } \varphi < 80\%); \quad (1.54)$$

$$\lg \theta = 0,096d + 0,082; \quad (20 < d \leq 30 \text{ и } \varphi > 80\%); \quad (1.55)$$

$$\lg \theta = 0,057d + 0,829. \quad (0 < d \leq 20 \text{ и } \varphi > 80\%). \quad (1.56)$$

Применение зависимостей (1.53...1.56) значительно упрощает расчеты процессов тепломассопереноса при сушке растительного сырья и дает возможность построить изотермы сорбции-десорбции в координатах  $w_{\text{тр}} - \theta$  [61].

По аналогии с теплопроводностью и другими физическими явлениями, поток влаги с поверхности влажного материала пропорционален градиенту потенциала влажности:

$$j_{\theta} = \alpha_{\theta} (\theta_{\text{пов}} - \theta_{\text{в}}), \quad (1.57)$$

где  $\theta_{\text{пов}}$  – потенциал влажности на поверхности материала, °В;  $\theta_{\text{в}}$  – потенциал влажности продувочного воздуха, °В;  $\alpha_{\theta}$  – коэффициент влагопереноса, кг/(кг·ч·°В).

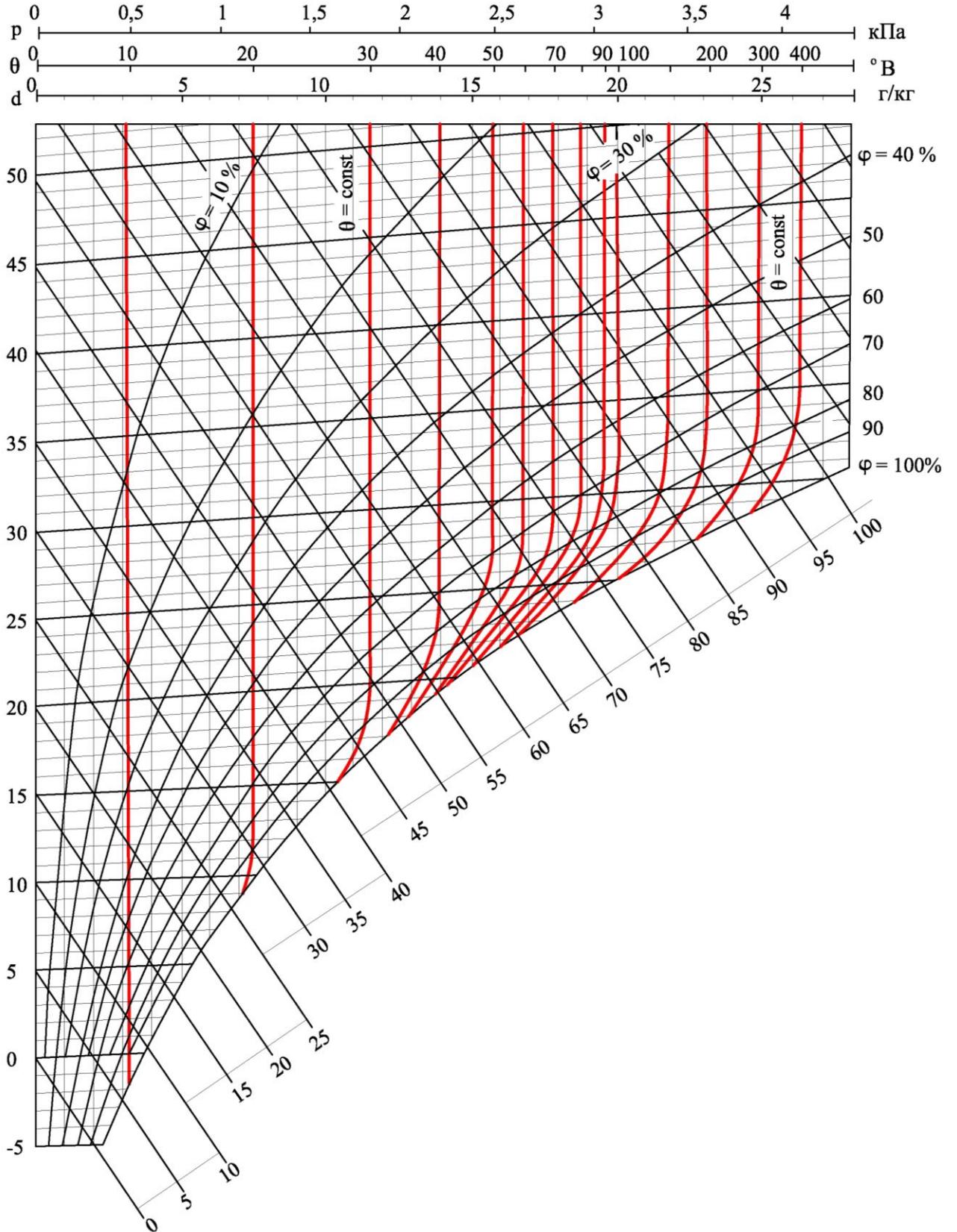


Рисунок 1.15 –  $I-d-\theta$ -диаграмма (В.Н. Богословский, А.Н. Гвоздков [9])

Выражение (1.57) позволяет определить количественно влагообмен между продукцией и продуваемым воздухом и применять  $I-d-\theta$ -диаграмму в расчете тепловлажностного состояния хранящейся продукции.

Решение задачи тепломассообмена, нахождение количественных значений влаготочков основанное на понятии потенциал влажности обладает рядом достоинств. Основное из них - это возможность описания процесса одним уравнением, которое применимо как в изотермических, так и в неизотермических условиях [9, 32]. Применение понятия потенциал влажности при описании процессов тепломассопереноса в слое хранящегося растительного сырья позволяет уточнить существующие методики и режимные карты работы систем активной вентиляции, при этом достигается большая сохранность продукции при хранении.

Точность расчетов, базирующихся на понятии потенциал влажности, достигается комплексным учетом всех факторов влияющих на перенос влаги. Для практического применения методики основанной на понятии потенциал влажности при расчетах процессов тепломассообмена в слое хранящегося сочного растительного сырья необходим анализ  $I-d-\theta$ -диаграммы в области низких температур (от 0 до 10 °C), т.к. основное время хранения протекает в этом температурном диапазоне.

## Выводы по главе 1

1. Анализ научной, технической, специальной и справочной отечественной и зарубежной литературы показал:

– наиболее перспективным в настоящее время является хранение сочного растительного сырья в стационарных хранилищах с использованием систем искусственной вентиляции. Применение естественных систем вентиляции не обеспечивает поддержание требуемых параметров микроклимата;

– существующие методики расчета режимов работы систем вентиляции при хранении не учитывают влажностный режим насыпи и требуют уточнения.

– в настоящее время отсутствуют методики расчета процессов тепломассообмена в слое хранящегося сочного растительного сырья, позволяющие однозначно определить количественные и качественные показатели процессов тепломассопереноса в системе «влажный воздух – слой биологически активного сырья».

2. Повышение сохранности продукции возможно за счет выбора режимов работы систем обеспечения микроклимата, учитывающих тепловлажностные характеристики хранящейся продукции.

3. Расчет режимов работы систем обеспечения микроклимата при хранении сочного растительного сырья связан с динамикой изменения температурного и влажностного полей в насыпи. Наибольшую точность определения режимов работы и тепловлажностных параметров продуваемого воздуха можно достичь, основывая расчеты на теории потенциала влажности, которая комплексно учитывает все факторы, влияющие на процессы тепломассообмена.

4. Для практических инженерных расчетов динамики процессов тепломассопереноса на основе полного термодинамического потенциала фаз (потенциала влажности) необходим анализ  $I-d-\theta$ -диаграммы в области низких положительных температур (от 0 до 10 °С).

5. На основе анализа состояния исследований и практики по обеспечению параметров микроклимата при хранении сочного растительного сырья сформулирована цель и поставлены задачи исследований.

ГЛАВА 2. ГРАФО-АНАЛИТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ  
ИНТЕНСИВНОСТИ ВЛАГООБМЕНА В СЛОЕ БИОЛОГИЧЕСКИ  
АКТИВНОГО СЫРЬЯ С ПРИМЕНЕНИЕМ  $I-d-\theta$ -ДИАГРАММЫ

2.1. Тепловой баланс хранилища

Потоки теплоты, влаги, движение наружного и рециркуляционного воздуха в хранилище сочного растительного сырья, оборудованного САВ приведено на рисунке 2.1. Обслуживаемой зоной хранилищ является насыпь или штабель контейнеров СРС с равномерно распределенными по объему источниками теплоты  $q_i$  и влаги  $j_i$ .

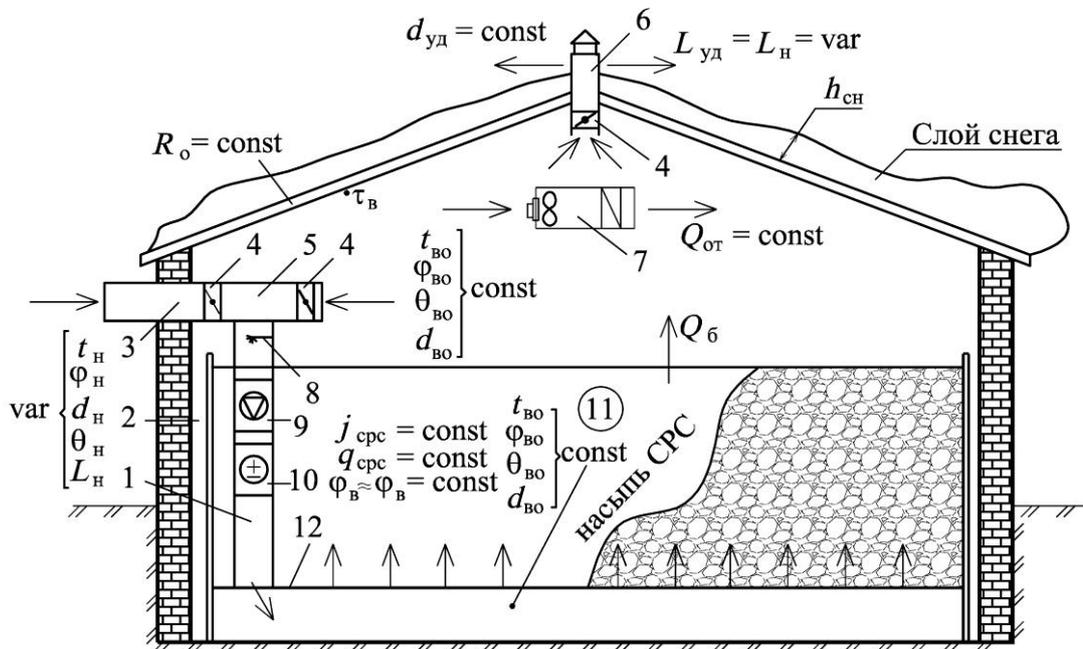


Рисунок 2.1 – Теплофизическая модель хранилища СРС:

- 1- воздуховод для подачи подготовленного воздуха в насыпь; 2 – воздушная прослойка; 3 – воздуховод для забора уличного воздуха; 4 – воздушный клапан с электроприводом; 5 – воздуховод для забора внутреннего воздуха для рециркуляции; 6 – вытяжной воздуховод; 7 – воздушный отопительный агрегат; 8 – увлажнитель воздуха; 9 – вентилятор; 10 – оборудование для нагрева или охлаждения воздуха; 11 – насыпь СРС; 12 – устройство для равномерной подачи воздуха в слой СРС

Технологические параметры микроклимата ( $t$ ,  $\phi$ ,  $u$ , газовый состав) в хранилищах СРС обеспечиваются системами поддержания параметров микроклимата. Слагаемые теплового, влажностного и газового балансов в

хранилище биологически активной продукции могут быть равны нулю, быть положительными или отрицательными в зависимости от периода года.

Нахождение воздухообмена ( $L$ , м<sup>3</sup>/ч) производится по следующим зависимостям:

для борьбы с явными теплоизбытками

$$L = Q_{\text{я}} / c_{\text{в}} (t_{\text{уд}} - t_{\text{пр}}) \rho_{\text{в}}; \quad (2.1)$$

для борьбы с избытками влаги

$$L = G_{\text{вл}} / \rho_{\text{в}} (d_{\text{уд}} - d_{\text{пр}}); \quad (2.2)$$

одновременное удаление теплоты и влаги

$$L = Q_{\text{п}} / \rho_{\text{в}} (I_{\text{уд}} - I_{\text{пр}}), \quad (2.3)$$

и не в полной мере отражают физическую сущность явления, т.к. относятся к помещению в целом, а не к насыпи продукции.

Хранилища СРС характеризуются наличием постоянно действующих биологических тепло и влаговыделений хранящегося СРС. Расчет теплофизических характеристик наружных ограждающих конструкций производимый по аналогии с промышленными и гражданскими зданиями по СП [85] приводит к значительным погрешностям в расчетах, т.к. не учитывает характерные особенности формирования микроклимата хранилищ биологически активной продукции – низкую температуру  $t_{\text{в}}$  и высокую относительную влажность  $\phi_{\text{в}}$ . Это положение подтверждается отечественными [18, 22, 29, 40, 41, 42, 44, 46, 51, 53, 74, 75, 76] и зарубежными исследователями [102, 119]. Относительный уровень энергетической эффективности гражданских и промышленных зданий при минимуме энергозатрат в настоящее время оценивается показателем тепловой эффективности [67, 88, 89]:

$$\eta = \frac{\sqrt[3]{F^2 H^2 ABC}}{FH(A/Y + B/X) + XYS}, \quad (2.4)$$

где  $F$  – общая полезная площадь здания, м<sup>2</sup>;  $H$  – высота здания, м;  $X$  – длина здания, м;  $Y$  – ширина здания, м;  $A$ ,  $B$  – теплопотери вертикальных

ограждающих конструкций размером  $X$  и  $Y$  в основании, определяемые при расчетных температурах  $t_n$  и  $t_b$ , Вт/м<sup>2</sup>;  $C$  – теплопотери горизонтальных ограждающих конструкций здания, определяемые при расчетных температурах  $t_n$  и  $t_b$ , Вт/м<sup>2</sup>.

Выражение (2.4) характеризует параметр энергоэффективности в зависимости от теплотехнических характеристик и геометрических размеров наружных ограждающих конструкций здания, но не учитывает технологические особенности и биологическую активность продукции.

Наиболее полно особенности нормирования наружных ограждений овощекартофелехранилищ обоснованы в [13, 14, 18, 87].

Внешние ограждающие конструкции служат главным образом для защиты от нестационарных атмосферных воздействий. Сопротивление теплопередачи принимается не меньше требуемого [85]:

$$R_o^{TP} = n(t_b - t_n) / \alpha_g \Delta t^H, \quad (2.5)$$

где  $\alpha_g \Delta t^H = q^H$  – нормируемый тепловой поток через ограждение, Вт/м<sup>2</sup>.

В холодный период года в неотапливаемых хранилищах СРС возможно отказаться от включения системы вентиляции для ассимиляции избытков тепла ( $Q_6$ ) постоянно выделяющихся сырьем в процессе дыхания, при условии достижения такого удельного теплового потока наружными ограждающими конструкциями который предотвратит подмораживание сырья ( $\sum Q = 0$ ) при расчетной температуре наружного воздуха.

Имеющиеся биологические тепловыделения и принятое объемно планировочное решение хранилища учитываются в принятом за основу нормирования сопротивления теплопередачи наружных ограждающих конструкций удельном тепловом потоке  $q_6^H$  [15]:

$$R_o^{TP} = (t_b - t_n) / q_6^H; \quad (2.6)$$

$$q_6^H = (1 - m)Q_6 / F, \quad (2.7)$$

где  $F = F_{ct} + F_n$  – площадь надземных стен и покрытия, м<sup>2</sup>;  $m$  – доля потерь теплоты через полы и подземные и обвалованные части животноводческих

зданий и хранилищ,  $m = 0,03 \dots 0,05$  для надземных зданий;  $m = 0,08 \dots 0,10$  для зданий заглубленных на глубину  $0,50 \dots 0,65$  от высоты стен;  $m = 0,25 \dots 0,30$  для буртов находящихся в земле.

Количество теплоты выделяемой в хранилище, с загрузкой  $G_p$ , т:

$$Q_6^{\text{CPC}} = q_{\text{CPC}} G_p, \quad (2.8)$$

где  $q_{\text{CPC}}$  – удельные явные тепловыделения CPC [13, 18], Вт/т.

Специфические условия микроклимата хранилищ сочного растительного сырья (низкая  $t_b$ , высокая  $\phi_b$ ) не дают получить достаточную точность определения перепада температур  $\Delta t_n = t_b - t_{\text{т.р}}$  и коэффициента теплообмена на внутренней поверхности ограждения  $\alpha_b$  [15], согласно СНиП [85]. Предложенный метод нормирования теплопередачи наружных ограждений не требует определять  $\Delta t_n$  и  $\alpha_b$ , что является его достоинством.

Величина сопротивления теплопередачи ограждающей конструкции  $R_o$  незначительно зависит от значения  $\alpha_b$ , что видно из анализа следующей зависимости:

$$R_o = 1/\alpha_b + \sum \delta/\lambda + R_{\text{в.п}} + 1/\alpha_n. \quad (2.9)$$

Непостоянство значений подвижности воздуха  $u_b$ , температуры  $t_b$  и  $\tau_b$ , и влияние способа складирования сырья на лучистую составляющую теплообмена приводит к затруднениям определения коэффициента  $R_o$  по методике предложенной в [11]. На несоответствие расчетных значений коэффициента  $\alpha_b$  в хранилищах CPC указывается во многих работах [3, 17, 22, 28, 106].

Толщина утеплителя наружных стен определяется путем подстановки в (2.7) вместо  $R_o$  величины  $R_o^{\text{т.р}}$ , найденной по (2.6). Действительное сопротивление теплопередаче наружных ограждающих конструкций  $R_{\text{ост}}^{\text{д}}$ , увеличивается на величину невязки расчетной и фактической толщины наружной ограждающей конструкции.

Сопротивление теплопередаче покрытия  $R_{\text{оп}}$  определяется по формуле:

$$R_{0П}^{TP} = (F_{ст} + F_{п}) / (F_{ст} / R_{0ст}^D + F_{п} / R_{0п}). \quad (2.10)$$

Преимуществом предложенной методики определения величины  $R_0^{TP}$  для хранилищ СРС является увязка функционального назначения зданий с теплофизическими показателями хранящегося СРС. Величина  $R_0^{TP}$  учитывает наличие теплоты дыхания  $q_{СРС}$  и объемно – планировочное решение хранилища  $F$ . Уменьшение площади надземных стен с максимальным их заглублением и увеличение вместимости помещений уменьшают величину  $R_0^{TP}$ .

Расчет сопротивления теплопередачи по данной методике вызывает увеличение  $R_0^{TP}$ , что способствует снижению вероятности появления конденсата на внутренней поверхности наружных ограждающих конструкций, что согласуется с последними нормативными документами [85].

Максимальные теплотраты на нагрев наружного воздуха:

$$Q_b = c_b G_{н.мин} (t_n^1 - t_n). \quad (2.11)$$

Необходимость нагрева подаваемого в хранилище воздуха в холодный период года, для ассимиляции избытков влаги не позволяет отказаться от применения систем отопления.

Температура наружного воздуха  $t_n^1$ , по достижении которой необходим нагрев воздуха определяется по следующему выражению[15]:

$$t_n^1 = t_b - \frac{Q_0}{F/R_0^{TP} + c_b G_{н.мин}}. \quad (2.12)$$

Расход тепла на подогрев подаваемого в хранилище воздуха увеличивается от 0 до  $Q_b$  при понижении температуры наружного воздуха от  $t_n^1$  до  $t_n$ , если  $t_n > t_n^1$ , в хранилище происходит накопление теплоизбытков (рисунок 2.2), которые необходимо ассимилировать продувкой воздуха с расходом  $G_{об}$ . Доля подаваемого в хранилище воздуха возрастает от  $G_{мин}$  при

$t_n^1$  до  $G_{н.маx} = G_{об}$ , когда  $t_n \geq t_b$ , а доля рециркуляционного воздуха соответственно уменьшается.

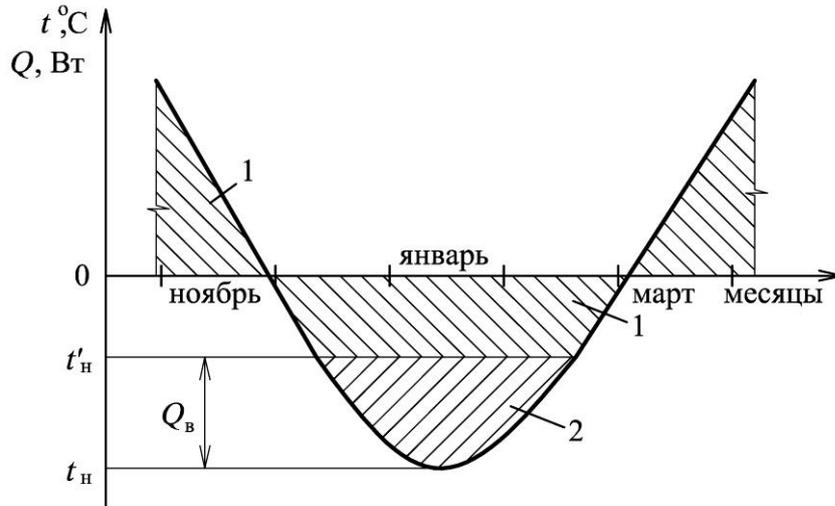


Рисунок 2.2 – Динамика тепловых балансов хранилища биологически активной продукции: 1 – теплоизбытков; 2 – теплонедостатков

Зависимость осредненного коэффициента теплопередачи  $K_{cp} = 1/R_{o,cp}$  от вида хранящейся продукции и отношения массы продукции к суммарной площади всех наружных ограждений  $G_F = G_p/F$ , т/м<sup>2</sup>, приведена на рисунке 2.3 [119].

При неполной загрузке хранилища продукцией, или при реализации продукции в течение года  $G_d$ , и создания запаса при возможном снижении температуры наружного воздуха  $t_n$  ниже расчетной необходимо предусмотреть дополнительные системы отопления мощностью:

$$Q_{от}^д = (G_p - G_d)q_{срс} = G_p(1 - a)q_{срс}, \quad (2.13)$$

где  $a$  – коэффициент степени загрузки хранилища,  $a = n_d / n_p$ ,  $a = G_d / G_p$ .

В условиях недозагрузки хранилища температура наружного воздуха, при достижении которой необходим нагрев подаваемого в хранилище воздуха рассчитывается по зависимости:

$$t_n^{1a} = t_b - aQ_0 / (F / R_o^{тp} + c_b G_{н.мин}). \quad (2.14)$$

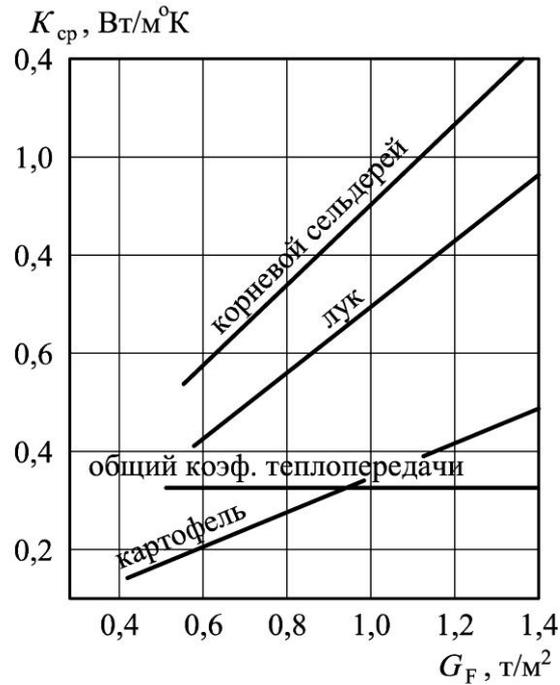


Рисунок 2.3 – Осредненный коэффициент теплопередачи [119]

В зависимости 2.14 минимальное количество наружного воздуха  $G_{н,мин}$  постоянно при любой степени загрузки хранилища  $a$ .

В рассчитанные по приведенной методике теплотехнические характеристики наружных ограждений сельскохозяйственных зданий не требуют предусматривать аварийный резерв мощности систем отопления помещений, т.к. значения  $R_0^{тр}$  практически в два раза превышают рекомендуемые типовыми проектами.

При рассмотрении теплофизической модели хранилища с позиции потенциала влажности, влажный воздух характеризуется дополнительным параметром – потенциалом влажности: наружный воздух –  $\theta_n = var$ ; внутренний воздух –  $\theta_{во} = const$ . Для инженерных расчетов режимов работы систем обеспечения параметров микроклимата необходимо иметь возможность аналитического или графического определения значений потенциала влажности воздуха в любом элементе системы обеспечения параметров микроклимата, а также непосредственно в насыпи (штабеле) хранящейся продукции.

## 2.2. Графо-аналитические исследования $I-d-\theta$ -диаграммы в области низких температур и ее применение в расчетах процессов теплообмена в слое сочного растительного сырья

### 2.2.1. Графо-аналитические исследования $I-d-\theta$ -диаграммы в области низких температур

В начале 80-х годов в лаборатории кондиционирования воздуха МИСИ им. В.В.Куйбышева под руководством профессора В.Н. Богословского были проведены экспериментальные исследования для получения количественных результатов при расчете процессов теплообмена на основе теории потенциала влажности. На основании полученных соотношений параметров влажного воздуха и шкалы потенциала влажности построена зависимость между потенциалом влажности и упругостью водяного пара в воздухе при различных температурах (рисунок 2.4). Для инженерного применения линии постоянных потенциалов влажности нанесены на  $I-d$ -диаграмму влажного воздуха (рисунок 1.15) [9, 32].

Линии постоянных потенциалов  $\theta = \text{const}$  параллельны линиям постоянных влагосодержаний на всей области значений относительной влажности менее 65 % (рисунок 1.15). В области значений относительной влажности более 65 %, линии постоянных потенциалов искривляются в сторону уменьшения давления водяного пара в воздухе [А.2, А.3].

Линии  $\varphi = \text{const}$ , показывающие насыщение воздуха влагой относительно предельного при данной температуре, являются кривыми, построенными на основании зависимости давления насыщения водяного пара от температуры. Линии постоянных потенциалов также являются кривыми, но их нанесение на  $I-d$ -диаграмму не объяснено авторами [9, 32].

Аналитические исследования [59, 60] термодинамически обосновывают нанесение линий  $\theta = \text{const}$  на  $I-d$ -диаграмму в области температур более 10 °С. Данная работа дала возможность использовать

$I-d-\theta$ -диаграмму для инженерного расчета процесса сушки растительного сырья и позволила графически определить значения потенциала влажности  $\theta$  воздуха в слое сырья.

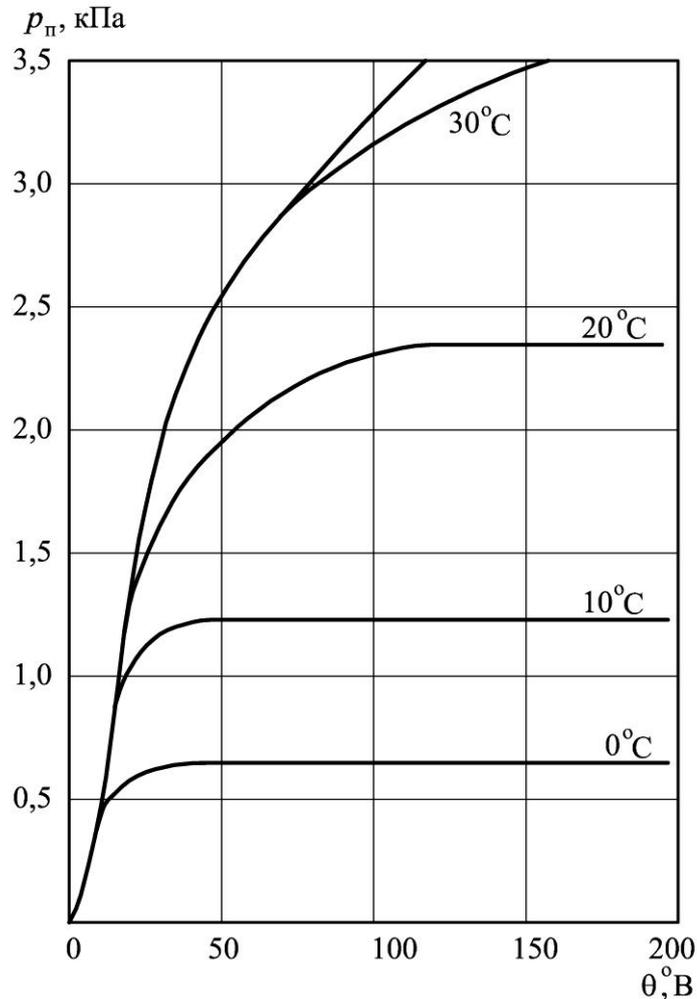


Рисунок 2.4 – Зависимость между потенциалом влажности воздуха и уругостью водяного пара в воздухе [9, 32]

Для описания процессов тепломассовлагообмена в области низких положительных температур нами были проведены следующие аналитические исследования.

Рассмотрим зависимости между потенциалом влажности воздуха и уругостью водяного пара в воздухе при различных температурах (рисунок 2.4). Как видно из представленного рисунка, для каждой температуры воздуха существует такое значение уругости водяного пара, по достижении которого на характеристику потенциала влажности не оказывает влияние значения уругости водяного пара. Величина этого предельного давления

представляет собой давление насыщения водяного пара в воздухе, т.е. состояние при котором относительная влажность  $\varphi = 100\%$ . При достижении давления насыщения, характеристика потенциала влажности описывается линией параллельной оси абсцисс ( $\theta$ ). Давление насыщения водяного пара зависит только от температуры воздуха и определено экспериментально [21]. Каждой температуре соответствует определенное давление парообразования и сублимации, называемое давлением насыщения. Связь между давлением насыщенного водяного пара  $p_{\text{п}}$ , кПа, над плоской поверхностью воды или льда и температурой определяется по формуле [21]:

$$p_{\text{пн}} = 0,6112 \cdot \exp\left[\frac{\alpha_{\text{в}} \cdot t}{\beta_{\text{в}} + t}\right], \quad (2.15)$$

где  $\alpha_{\text{в}}$ ,  $\beta_{\text{в}}$  – постоянные для воды,  $\alpha_{\text{в}} = 17,504$ ,  $\beta_{\text{в}} = 241,2$  °С;  $t$  – температура плоской поверхности воды, °С

Используя зависимость (2.15) определим давление насыщения для ряда температур 0...23 °С с шагом в 1 градус. Значения представлены в таблице 2.1.

Таблица 2.1 – Расчетные значения давления насыщения водяного пара

	Температура воздуха, °С											
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Давление насыщения, $p_{\text{п}}$ , кПа	0,611	0,657	0,706	0,758	0,813	0,872	0,935	1,001	1,072	1,147	1,227	1,311
	Температура воздуха, °С											
	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23
Давление насыщения, $p_{\text{п}}$ , кПа	1,401	1,496	1,597	1,703	1,816	1,935	2,061	2,194	2,335	2,483	2,640	2,805

Используя полученные значения и зависимость между потенциалом влажности воздуха и упругостью водяного пара (рисунок 2.4) построим кривые постоянных температур с шагом в один градус.

Полученные зависимости представлены на рисунке 2.5.

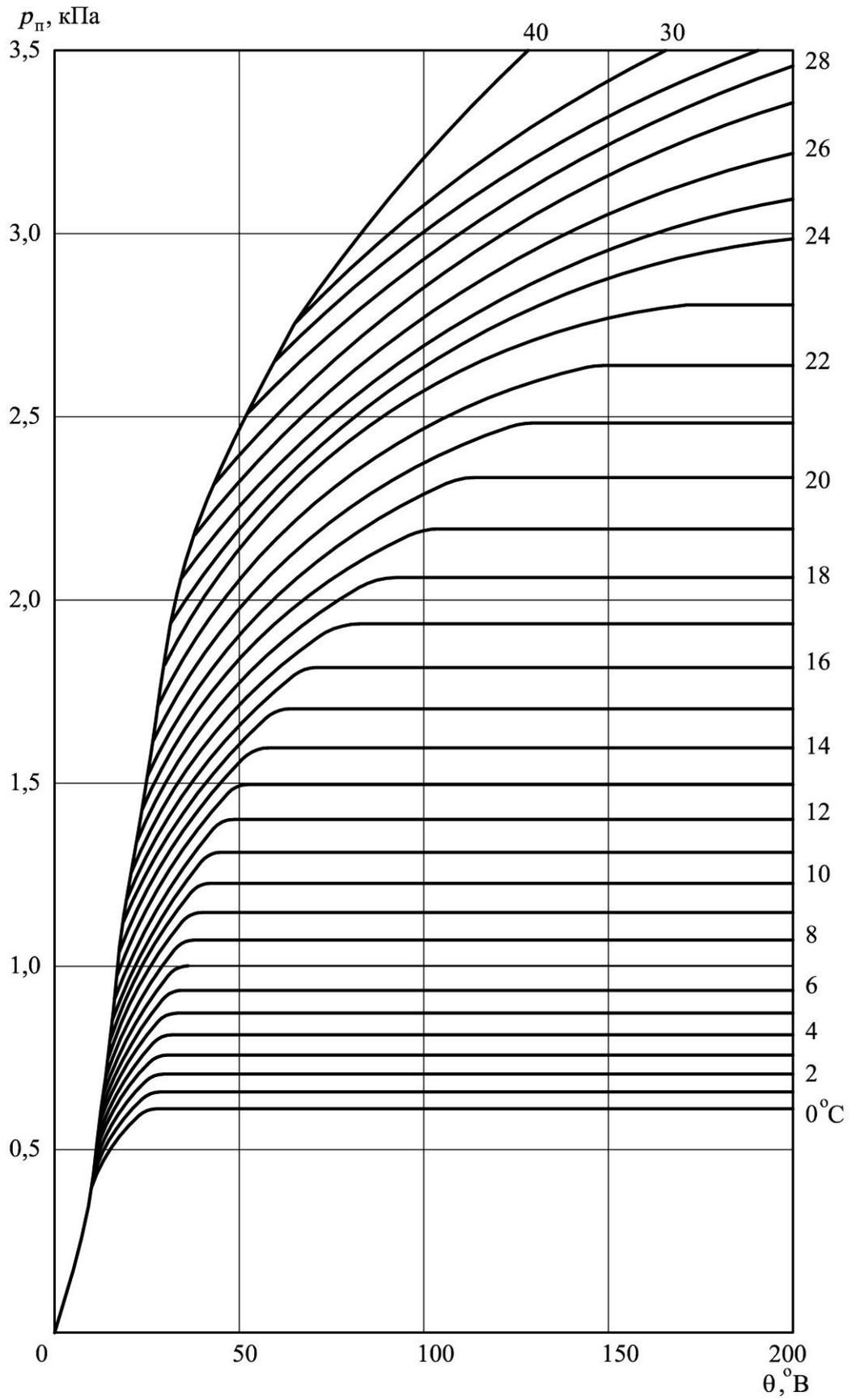


Рисунок 2.5 – Зависимость между потенциалом влажности воздуха и упругостью водяного пара в воздухе, для ряда температур с шагом в 1  $^{\circ}\text{C}$

Анализ представленных графиков, показывает, что кривая характеризующая зависимость давления пара в воздухе от потенциала влажности при определенной температуре можно условно разбить на три характерных участка (рисунок 2.6).

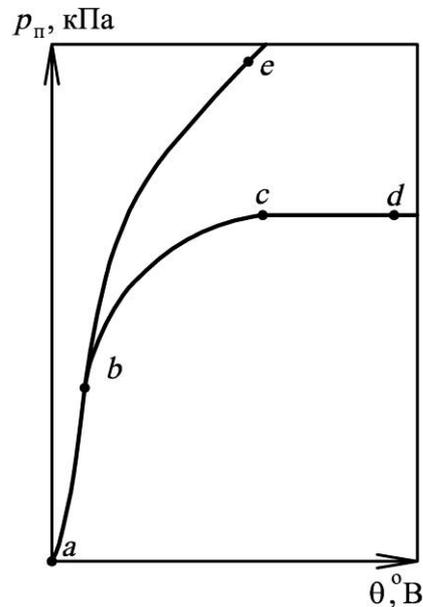


Рисунок 2.6 – Характерные участки кривой  $p_n = f(\theta, t)$

Первый участок (кривая  $a-b-e$ ), на этом участке кривой температура не оказывает влияния на зависимость  $p_n$ , упругость водяного пара зависит от  $\theta$ .

Второй участок (кривая  $bc$ ), значения  $p_n$  имеет определенную зависимость от  $\theta$ , на которую также оказывает влияние температура.

Третий участок (прямая  $c-d$ ) на характеристику потенциала влажности  $\theta$  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 луче  $ac$ .

Значения  $p_n$  точки  $b$  при любой температуре находятся в диапазоне относительной влажности  $\varphi \approx 65\%$ . На зависимость  $p_n$  от  $\theta$  не оказывает влияние температура при  $\varphi \geq 65\%$ , что также видно на рисунке 1.15.

В результате аппроксимации кривых в области  $b$ - $c$ , представленных на рисунке 2.5, получим:

$$p_{\Pi} = a_{t1} \cdot (1 - e^{-b_{t1} \cdot \theta}), \text{ при } 0 \leq t \leq 5 \text{ и } 65 < \varphi \leq 100; \quad (2.16)$$

$$p_{\Pi} = a_{t2} + b_{t2} \cdot r_t^{\theta}, \text{ при } t > 5 \text{ и } 65 < \varphi \leq 100, \quad (2.17)$$

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 (рисунок 2.7... 2.11).

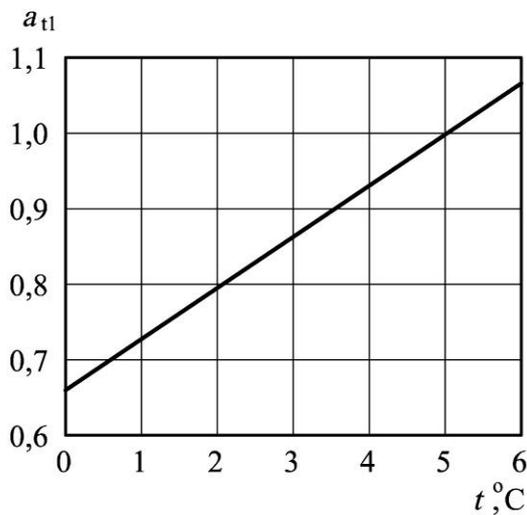


Рисунок 2.7 – Зависимость коэффициента  $a_{t1}$  от температуры воздуха

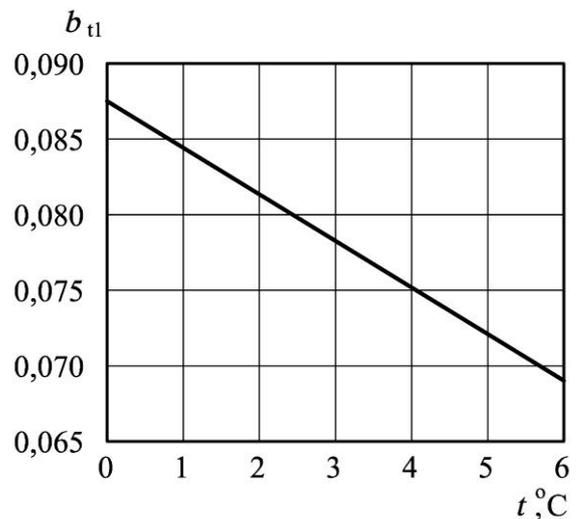


Рисунок 2.8 – Зависимость коэффициента  $b_{t1}$  от температуры воздуха

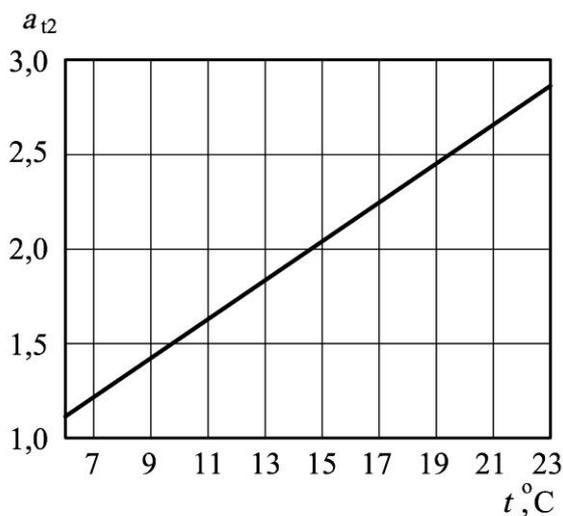


Рисунок 2.9 – Зависимость коэффициента  $a_{t2}$  от температуры воздуха

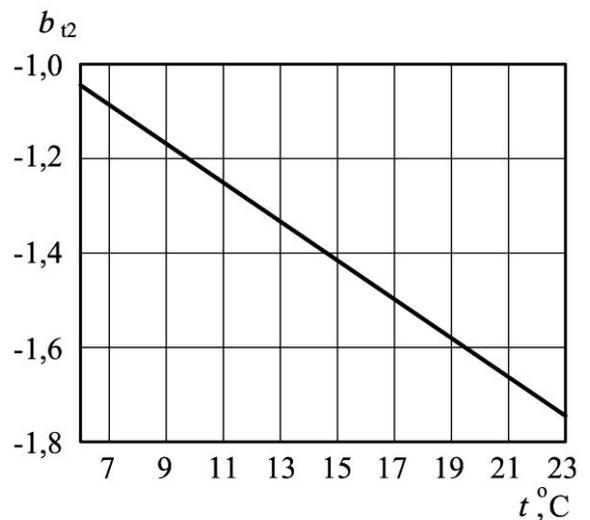


Рисунок 2.10 – Зависимость коэффициента  $b_{t2}$  от температуры воздуха

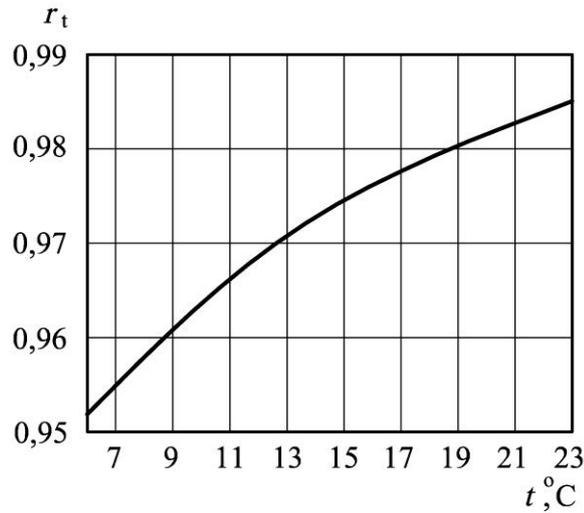


Рисунок 2.11 – Зависимость коэффициента  $r_t$  от температуры воздуха

Аппроксимация построенных кривых дала следующий результат:

$$a_{t1} = 0,66 + 0,067 \cdot t; \quad (2.18)$$

$$b_{t1} = 0,088 - 0,0033 \cdot t; \quad (2.19)$$

$$a_{t2} = 0,46 + 0,11 \cdot t; \quad (2.20)$$

$$b_{t2} = -0,81 - 0,04 \cdot t; \quad (2.21)$$

$$r_t = 0,91 \cdot t^{0,027}. \quad (2.22)$$

Подставим полученные зависимости в формулы (2.16) и (2.17):

$$p_{\Pi} = 0,66 + 0,067 \cdot t \cdot \left(1 - e^{(-0,088 + 0,0033 \cdot t)\theta}\right), \text{ при } 0 \leq t \leq 5 \text{ и } 65 < \varphi \leq 100; \quad (2.23)$$

$$p_{\Pi} = 0,46 + 0,11 \cdot t + (-0,81 - 0,04 \cdot t) \cdot (0,91 \cdot t^{0,027})^{\theta}, \quad (2.24)$$

при  $t > 5$  и  $65 < \varphi \leq 100$ .

Полученные уравнения (2.23, 2.24) математически описывают изменение упругости водяного пара в воздухе от изменения температуры и потенциала влажности воздуха.

В результате проведения аппроксимации кривой представленной на рисунке 2.5, в области  $a-e$ , получены уравнением вида:

$$p_{\Pi} = 0,023 + 0,017 \cdot \theta^{1,34}; \text{ при } p_{\Pi} \leq 0,4 \text{ кПа и } \varphi < 65 \% ; \quad (2.25)$$

$$p_{\text{н}} = 4,15 \cdot \ln(0,46 \cdot \ln(\theta)) ; \text{ при } p_{\text{н}} > 0,4 \text{ кПа и } \varphi < 65 \% . \quad (2.26)$$

Используя полученные зависимости (2.23...2.26) нанесем линии постоянных значений потенциала влажности на  $I-d$ -диаграмму (рисунок 2.12).

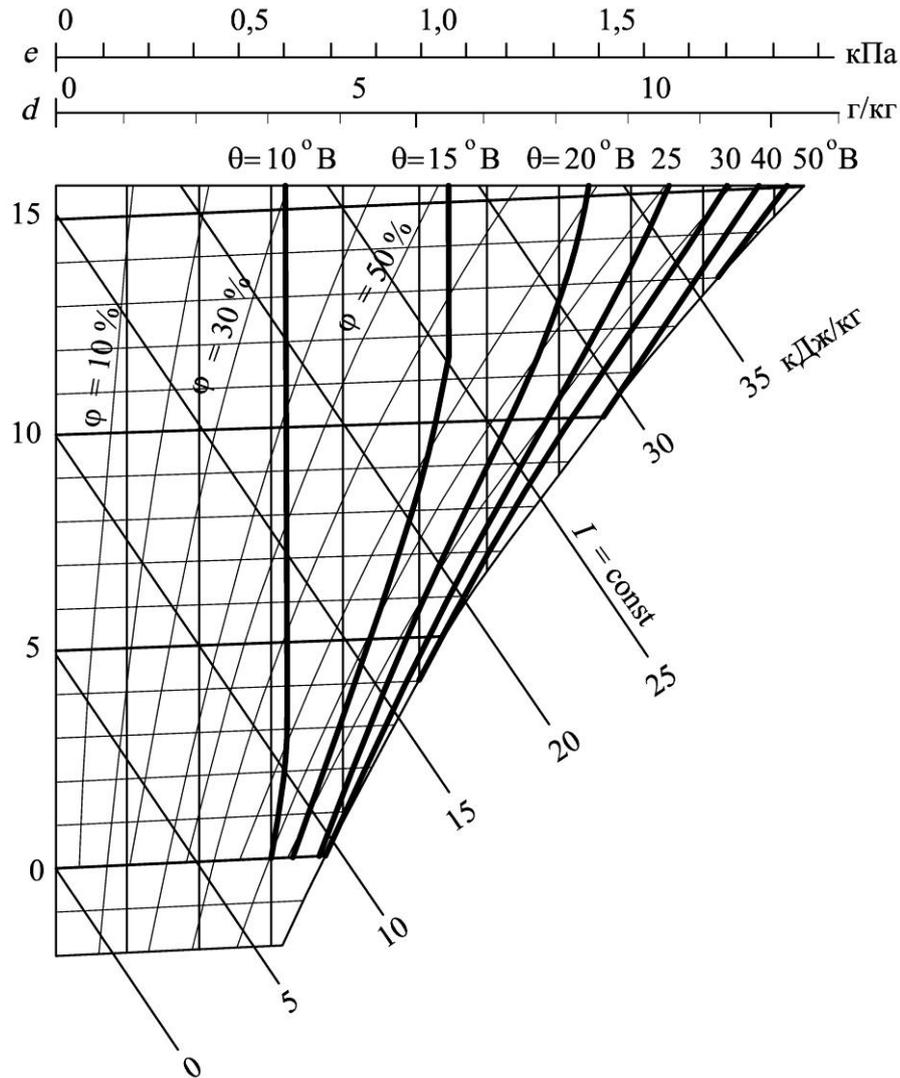


Рисунок 2.12 – Уточненная  $I-d-\theta$ -диаграмма

Полученные аналитические зависимости (2.23...2.26) и  $I-d-\theta$ -диаграмма (рисунок 2.12) могут быть использованы в расчетах процессов тепломассовлагообмена при хранении сочного растительного сырья.

### 2.2.2. Построение процессов тепломассообмена на $I-d-\theta$ -диаграмме при различных способах обработки приточного воздуха

Интенсивность тепломассообмена оказывает основное влияние на выбор способа обработки наружного воздуха. Классическая теплофизическая модель тепломассообмена в слое хранящегося растительного сырья, основанная на  $I-d$ -диаграмме влажного воздуха, представлена в [19].

Применение теории потенциала влажности к оценке сорбирующей способности воздуха в процессе хранения сочного растительного сырья позволяет уточнить теплофизическую модель тепломассообмена в слое хранящейся продукции. Анализ соотношений объемов наружного и рециркуляционного воздуха в течение периода хранения и их влияние на потери продукции в зависимости от способов предварительной обработки воздуха проведем с использованием  $I-d-\theta$ -диаграммы. В зависимости от параметров наружного воздуха получены различные варианты обработки воздуха с учетом интенсивности влажопотока в системе «продуваемый воздух – сочное растительное сырье», определяемой разностью потенциалов влажности.

Если параметры наружного воздуха находятся на продолжении прямой ПУ, характеризующей процесс изменения тепловлажностной характеристики продуваемого воздуха, в сторону уменьшения значений относительной влажности и потенциала влажности, например точка Н с параметрами  $t_H, \varphi_H, d_H, I_H, \theta_H$  (рисунок 2.13), то обработка воздуха перед подачей в хранилище не требуется. Определенное количество наружного воздуха смешивается с удаляемым в пропорции УП/ПН и с параметрами точки П –  $t_P, \varphi_P, d_P, I_P, \theta_P$  поступает в насыпь. В результате смешивания приточного воздуха с рециркуляционным меняются параметры подаваемого в насыпь воздуха, достигая оптимальных значений - точка П:  $t_P > t_H, \varphi_P > \varphi_H, d_P > d_H, I_P > I_H, \theta_P > \theta_H$ . Сорбирующий потенциал воздуха уменьшается на величину разности потенциалов  $\Delta\theta_{ПН} = \theta_P - \theta_H > 0$ . Интенсивность влажопотока определяется

разностью потенциалов  $\Delta\theta_{\text{ПУ}} = \theta_{\text{У}} - \theta_{\text{П}} > 0$ , при этом потери продукции при хранении становятся минимальными, определяемыми дыханием продукции.

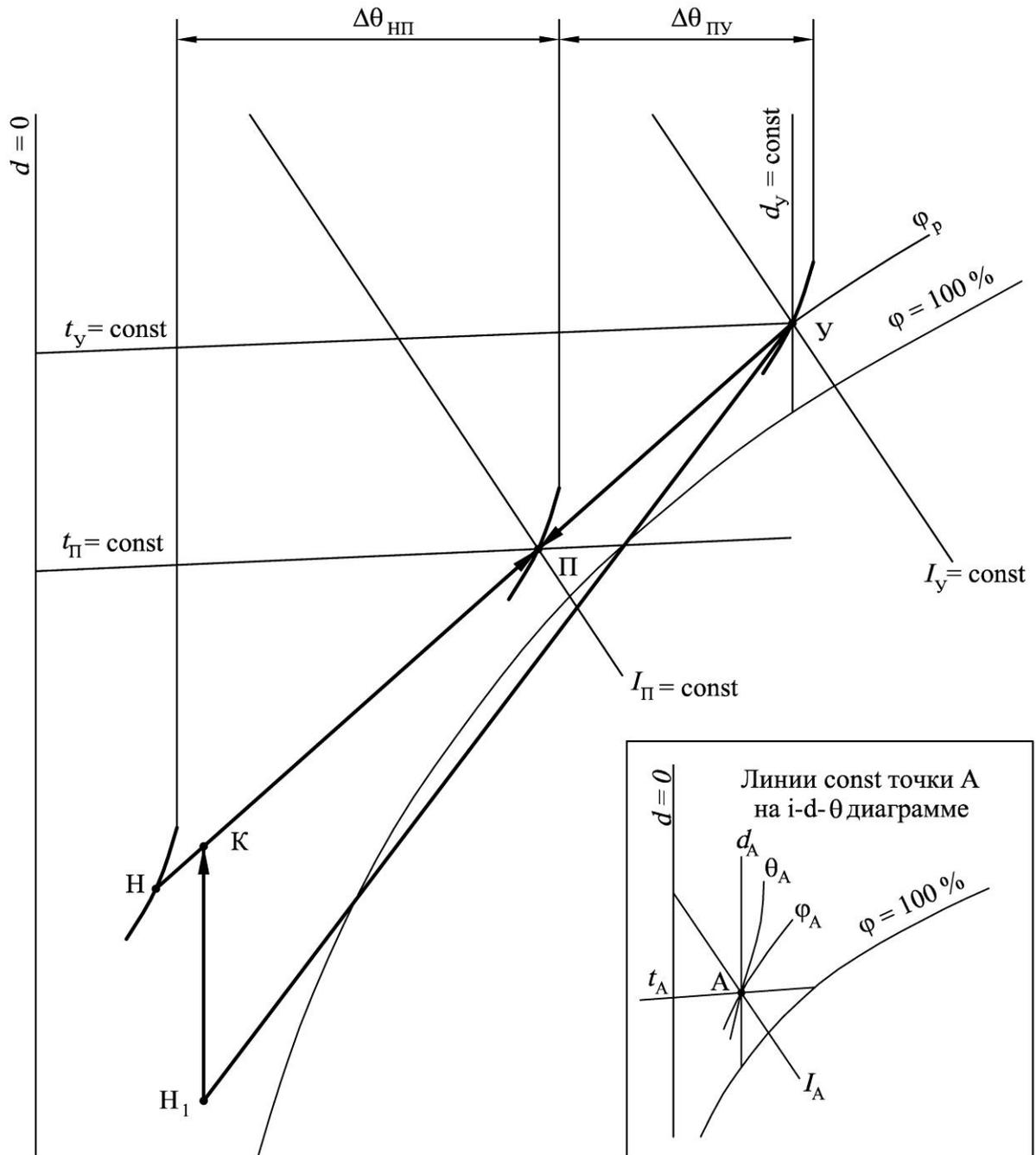


Рисунок 2.13 – Процесс подготовки воздуха на  $I$ - $d$ - $\theta$ -диаграмме (вариант 1)

Если параметры наружного воздуха находятся ниже продолжения прямой ПУ, например точка  $H_1$  (рисунок 2.13), то необходим дополнительный нагрев от точки  $H_1$  до точки  $K$ , лежащей на прямой принадлежащей линии ПУ. Отсутствие предварительного подогрева может

повлечь частичную конденсацию водяных паров из смеси воздуха (процесс  $H_1-Y$ ) и возможное поступление в насыпь капельной влаги, что недопустимо.

Если параметры наружного воздуха находятся в области ограниченной линией  $I_{\Pi} = \text{const}$  и изотермой  $t_{\Pi}$ , например точка  $H_2$  с параметрами  $t_{H_2}$ ,  $\varphi_{H_2}$ ,  $d_{H_2}$ ,  $I_{H_2}$ ,  $\theta_{H_2}$  (рисунок 2.14), то необходимо охлаждение наружного воздуха – процесс  $H_2-K_1$  или изоэнтальпийный процесс  $H_2-K_2$  для достижения параметров, лежащих на продолжении прямой ПУ, для минимизации потерь продукции вызванных усушкой.

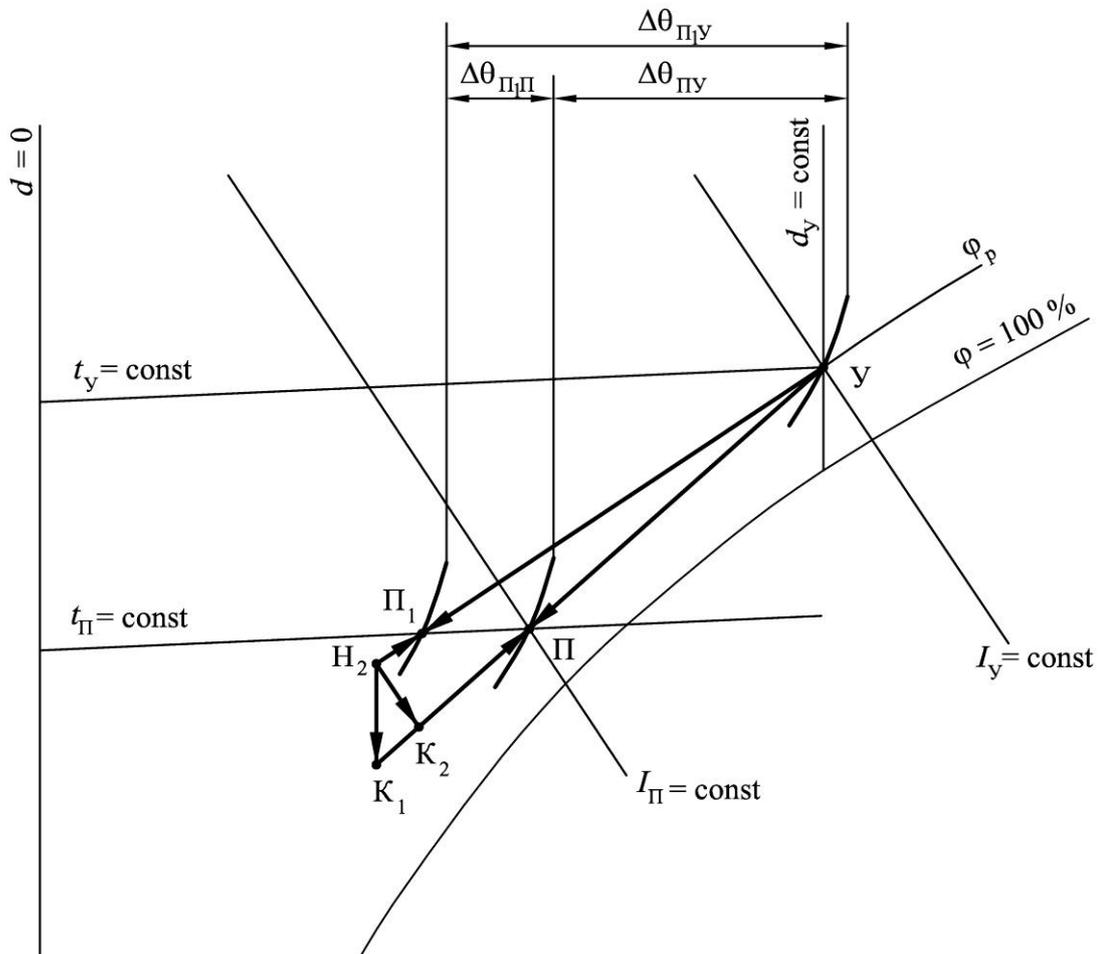


Рисунок 2.14 – Процесс подготовки воздуха на  $I-d-\theta$ -диаграмме (вариант 2)

Отказ от искусственного охлаждения и смешивание наружного воздуха параметрами точки  $H_2$  с воздухом удаляемым из хранилища с параметрами точки  $Y$  приведет к увеличению доли наружного воздуха для достижения условия оптимальной температуры подаваемого в хранилище воздуха – точка  $\Pi_1$ , лежащая на изотерме  $t_{\Pi}$ . В результате интенсивность влагопотока

$\Delta\theta_{\text{ПУ}}$  возрастет на величину  $\Delta\theta_{\text{ПП}} = \theta_{\text{П}} - \theta_{\text{П}}$ , относительно интенсивности влагопотока определяемого дыханием сырья  $\Delta\theta_{\text{ПУ}}$ , что приведет к дополнительной усушке продукции и потерям.

Если параметры наружного воздуха находятся левее линии ПУ и ограничены изотермами  $t_{\text{П}}$  и  $t_{\text{У}}$ , например точка  $\text{Н}_3$  с параметрами  $t_{\text{Н}_3}$ ,  $\varphi_{\text{Н}_3}$ ,  $d_{\text{Н}_3}$ ,  $I_{\text{Н}_3}$ ,  $\theta_{\text{Н}_3}$  (рисунок 2.15), то возможно подавать в хранилище не обработанный наружный воздух - процесс  $\text{Н}_3\text{--У}$ , который ассимилирует влагу из насыпи сырья с интенсивностью определяемой разностью потенциалов  $\Delta\theta_{\text{Н}_3\text{У}} = \theta_{\text{У}} - \theta_{\text{Н}_3} > 0$ , может не достичь величины равновесной влажности  $\varphi_{\text{р}}$  и процесс отклониться от  $\text{Н}_3\text{--У}$  и станет  $\text{Н}_3\text{--У}_1$ , а потери продукции возрастут и будут определяться разностью потенциалов влажности  $\Delta\theta_{\text{УУ}_1} = \theta_{\text{У}_1} - \theta_{\text{У}}$ .

Создание условий для снижения потерь до биологически оправданного уровня возможно применяя процесс охлаждения наружного воздуха – процесс  $\text{Н}_3\text{--К}_4$  или  $\text{Н}_3\text{--К}_3$  (если параметры наружного воздуха лежат правее линии  $I_{\text{П}}$ , например точка  $\text{Н}_4$ , то изоэнтальпийное охлаждение нежелательно, т.к. приведет к увеличению расхода подаваемого воздуха и отклонению от оптимальных температурно-влажностных условий хранения) с последующим смешением с удаляемым из хранилища воздухом.

Если параметры наружного воздуха ограничены изотермой  $t_{\text{У}}$  и изоэнтальпой  $I_{\text{У}}$ , например точка  $\text{Н}_5$  с параметрами  $t_{\text{Н}_5}$ ,  $\varphi_{\text{Н}_5}$ ,  $d_{\text{Н}_5}$ ,  $I_{\text{Н}_5}$ ,  $\theta_{\text{Н}_5}$  (рисунок 2.16), то подача в хранилище необработанного наружного воздуха недопустима, т.к. вызовет значительные потери от несоблюдения температурного режима (внесение с подаваемым воздухом дополнительной теплоты) и от усушки продукции ввиду возрастания разности потенциалов  $\Delta\theta_{\text{Н}_5\text{У}} = \theta_{\text{У}} - \theta_{\text{Н}_5} > \Delta\theta_{\text{ПУ}}$ . Рекомендуется охлаждение с применением холодильных машин – процесс  $\text{Н}_5\text{--К}_5$ , адиабатное охлаждение - процесс  $\text{Н}_6\text{--К}_6$  (процесс  $\text{Н}_6\text{--К}_6$  возможен, если параметры наружного воздуха лежат ниже изоэнтальпы  $I_{\text{П}}$ ), с последующим смешением с удаляемым из

хранилища воздухом. При определенных условиях (если параметры наружного воздуха лежат правее линии  $I_{\Pi} = \text{const}$ ) применение адиабатного охлаждения не желательно, например процесс  $H_7\text{--}\Pi_2$ , который приведет к увеличению расхода подаваемого воздуха и отклонению от оптимальных температурных условий хранения.

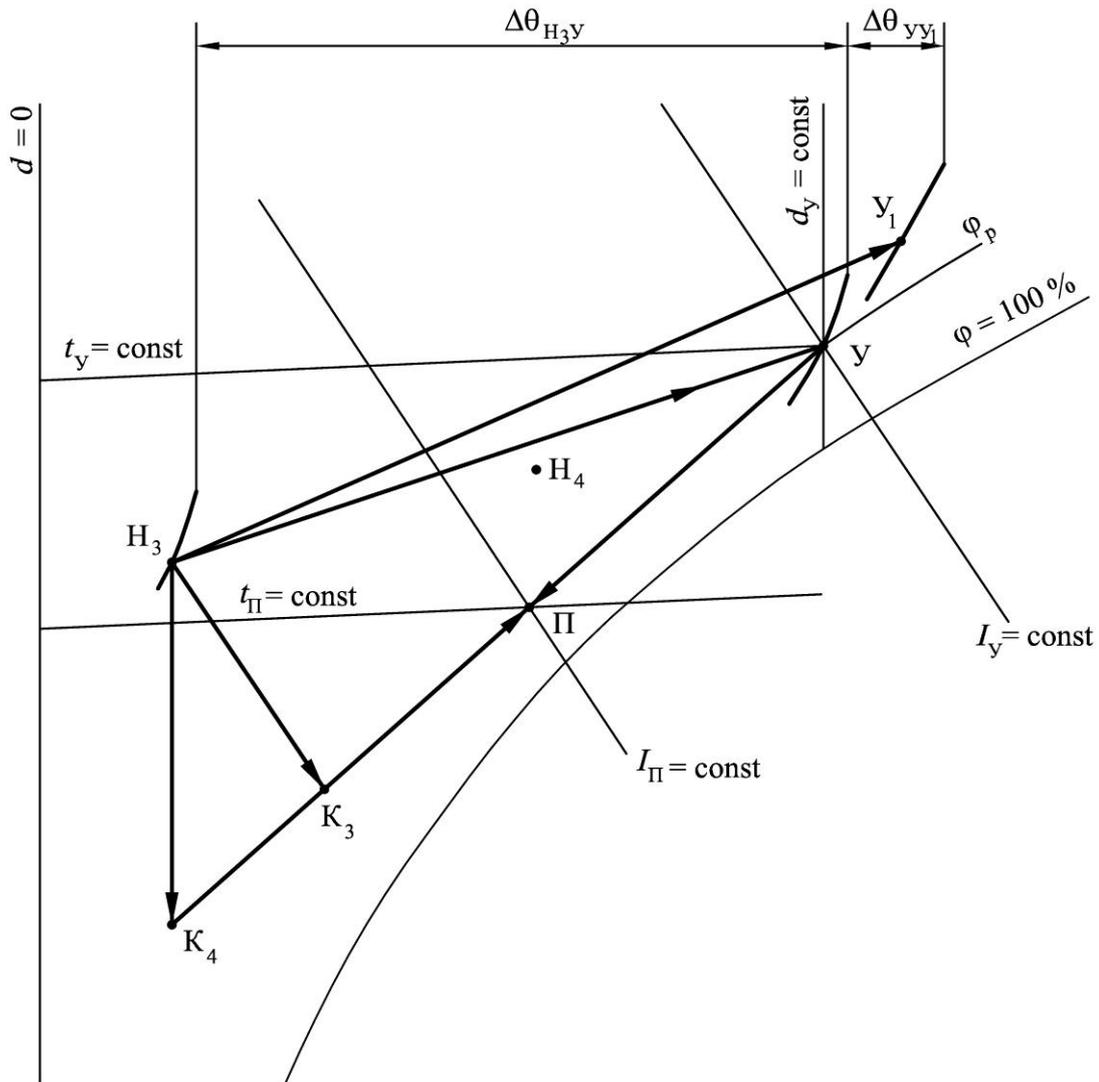


Рисунок 2.15 – Процесс подготовки воздуха на  $I$ - $d$ - $\theta$ -диаграмме (вариант 3)

Если параметры наружного воздуха ограничены линиями  $I_y = \text{const}$  и  $d_y = \text{const}$ , например точка  $H_8$  с параметрами  $t_{H8}$ ,  $\varphi_{H8}$ ,  $d_{H8}$ ,  $I_{H8}$ ,  $\theta_{H8}$  (рисунок 2.17), то удалить накопленную влагу из слоя хранящейся продукции

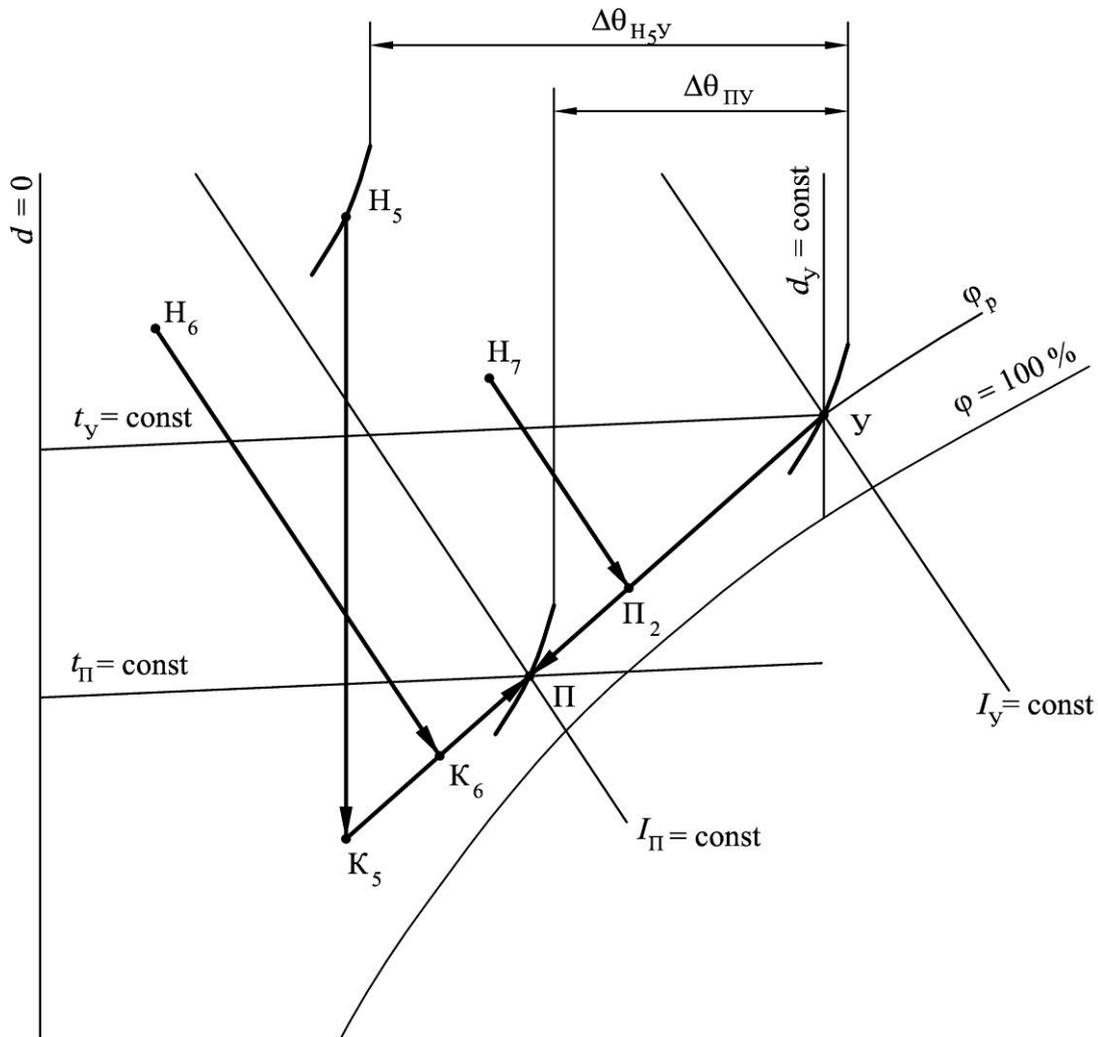


Рисунок 2.16 – Процесс подготовки воздуха на  $I-d-\theta$ -диаграмме (вариант 4)

возможно, т.к. потенциал влажности рассматриваемого участка ниже потенциала влажности удаляемого из насыпи воздуха  $\Delta\theta_{H5Y} > \Delta\theta_{\Pi Y} > 0$ , но ассимилировать тепло из насыпи предварительно неохлажденным наружным воздухом невозможно, применение холодильных машин обязательно. Например, для точки  $H_8$  возможен процесс охлаждения  $H_8-K_7$  с температурой поверхности воздухоохладителей выше температуры точки росы  $t_p$ , процесс  $H_9-K_7$  (параметры наружного воздуха находятся правее линии  $d_{K5} = \text{const}$ ) происходит с температурой поверхности воздухоохладителей ниже температуры точки росы  $t_p$ . Применение рециркуляции, перед подачей воздуха с параметрами точки С в секцию охлаждения экономит расход холода.

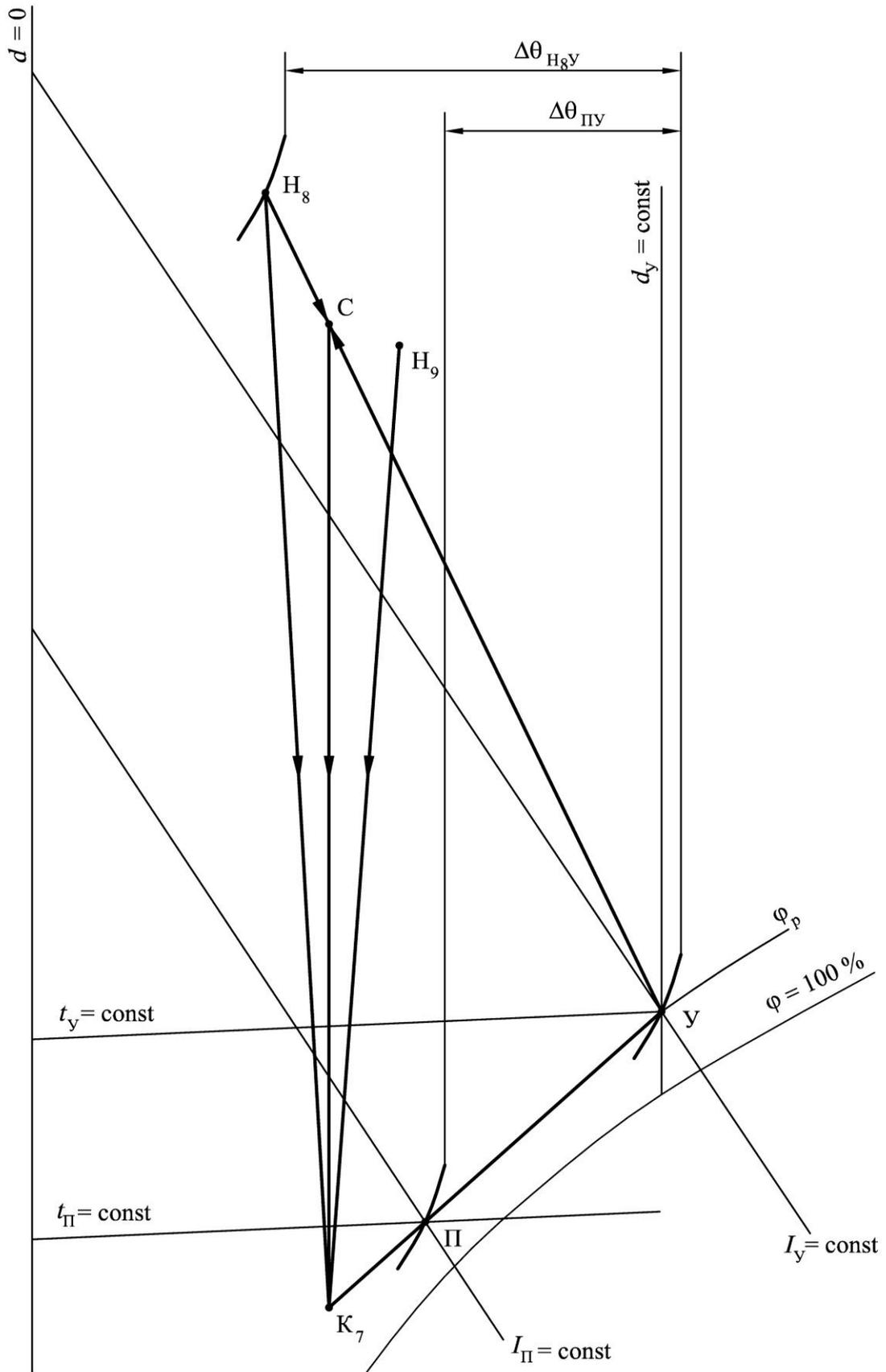


Рисунок 2.17 – Процесс подготовки воздуха на  $I-d-\theta$ -диаграмме (вариант 5)

Если параметры наружного воздуха находятся правее линии  $d_y = \text{const}$  (рисунок 2.17), то довести параметры подаваемого в хранилище воздуха до оптимальных возможно только при охлаждении с дальнейшей обработкой аналогично процессам для параметров наружного воздуха в области ограниченной линиями  $I_y = \text{const}$  и  $d_y = \text{const}$ .

Следует отметить, что рассмотренные процессы тепломассообмена при различных способах обработки приточного воздуха на  $I-d-\theta$ -диаграмме позволяют обрабатывать воздух с одной и той же последовательностью для характерных граничных условий параметров наружного воздуха [57, 58, 80, 81] с учетом интенсивности тепломассообменных процессов в хранилище характеризуемых потенциалом влажности.

Для повышения энергоэффективности хранилища, окончательное определение системы подготовки воздуха должно основываться на минимальных значениях расхода тепла, холода, электроэнергии и потерь хранящейся биологически активной продукции.

## Выводы по главе 2

1. На основе результатов графо-аналитических исследований получены математические зависимости (2.16...2.26) для определения потенциала влажности  $\theta$  от упругости водяного пара  $p_n$  в температурном диапазоне менее 10 °С и всем диапазоне значений относительной влажности.
2. Термодинамически обоснованный характер линий постоянных потенциалов влажности  $\theta = \text{const}$  на  $I-d$ -диаграмме в области низких температур более полно раскрывает возможности  $I-d-\theta$ -диаграммы для расчета режимов работы систем обеспечения микроклимата при хранении сочного растительного сырья.
3. Уточнена обобщенная теплофизическая модель тепломассообмена в слое сочного растительного сырья.
4. Предложенная теплофизическая модель процессов тепломассопереноса с использованием  $I-d-\theta$ -диаграммы позволяет рассчитать и оценить динамику переноса теплоты и влаги в системе «продуваемый воздух – хранящееся сочное растительное сырье».

## ГЛАВА 3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССА ТЕПЛОМАССОБМЕНА В СЛОЕ СОЧНОГО РАСТИТЕЛЬНОГО СЫРЬЯ

### 3.1. Методика и экспериментальная база исследований

Применение потенциала влажности как движущей силы тепломассопереноса при определении режимов работы САВ с помощью  $I-d-\theta$ -диаграммы является теоретико-экспериментальным. Выбор и обоснование методики эксперимента, создание экспериментальной базы исследований, должно решить следующие основные задачи:

- проверка положения о постоянстве равновесной влажности, потенциала влажности слоя и теплофизических процессов тепломассообмена в хранилищах при контейнерном способе хранения СРС;

- определение количественных значений характеристик процессов тепловлагообмена в штабеле СРС.

Определение оптимальных условий проведения натурального эксперимента и выбор достаточного числа опытов, для решения поставленных задач с требуемой точностью планировалось с учетом наличия биологической активности исследуемого объекта.

Планирование эксперимента включает в себя комплекс мероприятий, направленных на эффективную постановку минимального количества опытов.

Многообразие внутренних и внешних факторов, а также особенности планирования эксперимента связанные с исследуемым биологически активным объектом определили необходимость проведения натурального эксперимента.

Основная цель планирования эксперимента – достижение максимальной точности решения поставленной задачи при минимальном количестве опытов и сохранения достоверности результатов [4, 92].

Биологически активная продукция, участвующая в эксперименте, вызывает необходимость повтора опыта в количестве три раза [70].

### 3.2. Объекты и методы исследований при хранении сочного растительного сырья

Определение основного параметра регулирования систем активной вентиляции – времени работы вентиляции в течение суток, с определенными параметрами подаваемого в хранилище воздуха, определение равномерности распределения полей температуры, относительной влажности, потенциалов влажности, биологических тепловлаговывделений возможно только при комплексном учете этих параметров во всем объеме хранилища со среднестатистическими физико-механическими и теплофизическими свойствами хранящейся продукции.

Натурные исследования теплофизических условий хранения СРС при контейнерном хранении СРС проводились в хранилище ООО Агрофирма «Белозерки» Ставропольского района Самарской области. Загрузочные ворота обращены на С и Ю. Хранилище выполнено в виде единого объема с площадью пола  $400 \text{ м}^2$  и высотой 6 метров. В здании имеются проемы для загрузки сырья размером 4x3 м. Стены выполнены из железобетона. В хранилище имеется общеобменная система вентиляции. Подаваемый в хранилище воздух обрабатывается до оптимальных параметров в приточной камере и подается в хранилище через воздуховоды расположенные в нижней зоне по периметру здания. Воздух удаляется естественным путем через проемы, оборудованные створчатыми клапанами с электроприводами размерами 1x1м., расположенными в верхней части торцов здания. Для оптимизации расходов энергии на подготовку приточного воздуха в зимнее время, имеется возможность частичной рециркуляции воздуха с забором воздуха из верхней части хранилища.

Основные характеристики овощехранилища приведены в таблице 3.1.

Таблица 3.1 – Основные характеристики исследуемого хранилища СРС

№	Характеристика хранилища	Единица измерения	Значение
1.	Емкость хранилища	т	1280
2.	Этажность	-	одноэтажное
3.	Строительная высота	м	6,6
4.	Строительная площадь	м <sup>2</sup>	400
5.	Температура внутреннего воздуха	°С	0 ... 5
6.	Кратность воздухообмена	крат/ч	7

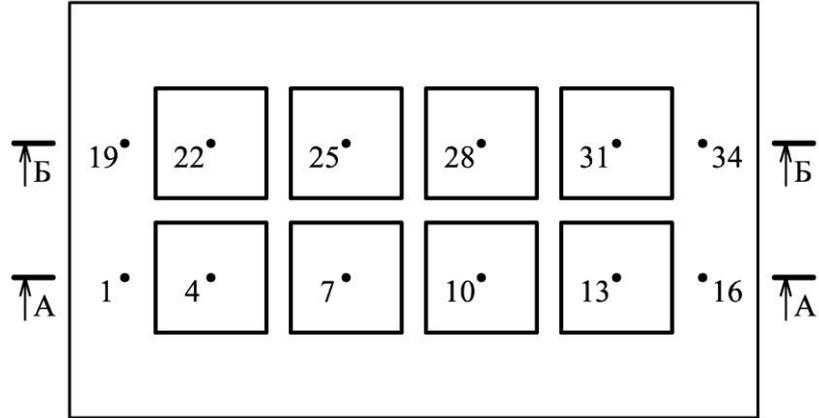
Основные характеристики контейнеров, применяемых на плодоовощной базе для хранения СРС приведены в таблице 3.2.

В середине хранилища выбраны два ряда контейнеров в количестве 24 контейнера с картофелем. В характерных зонах выбранных контейнеров и объема хранилища проводились замеры температуры и влажности в точках 1-36 на уровне середины высоты первого, второго и третьего контейнера по высоте и для каждого ряда. В центре каждого контейнера располагалась полая трубка диаметром 30 мм, через которую помещался зонд температуры-влажности прибора testo 435-2. По оси каждого ряда контейнеров на деревянных стойках фиксировалось геометрическое место установки зонда температуры-влажности прибора testo 435-2, таким образом, чтобы высота расположения сенсора зонда совпадала с серединой высоты контейнера в каждом ряду. Всего температура и влажность фиксировалась в 36 точках. На рисунке 3.1 показан план и разрез по первому и второму ряду контейнеров с указанием точек замера.

Таблица 3.2 – Характеристика контейнера при хранении СРС

№	Характеристика	Контейнер П-1290 (К-450)
1.	Длина, ширина, высота, мм	800, 800, 1000
2.	Полезный объем, м <sup>3</sup>	0,65
3.	Масса груза приходящегося на 1 м <sup>3</sup> камеры, т/м <sup>3</sup>	0,17...0,21
4.	Сырье закладываемое на хранение	Картофель
5.	Материал каркаса	Уголок металлический, дерево

а



б Разрез А-А (первый ряд)



в Разрез Б-Б (второй ряд)



Рисунок 3.1 – Отсек для проведения натурального эксперимента с указанием точек замеров находящихся в и вне контейнеров: а – план; б – разрез.

### 3.3. Оценка точности. Определение минимального количества измерений

Процесс измерения неизбежно сопровождается ошибками, которые вызваны несовершенством измерительных средств, нестабильностью условий проведения измерений, несовершенством самого метода и методики измерений, недостаточным опытом и несовершенством органов чувств человека, выполняющего измерения, а также другими факторами.

Погрешность это отклонение результата измерения от истинного значения измеряемой величины. По своему характеру (закономерностям проявления) погрешности измерения подразделяются на систематические, случайные и грубые промахи. Погрешность измерений определяется суммой величин случайной и систематической погрешности приборов.

Систематическая погрешность прибора  $\Delta_c$  равна сумме основной погрешности прибора и дополнительной  $\Delta_c = \Delta_1 + \Delta_{\text{доп}}$ . Дополнительная погрешность прибора складывается из суммы методической погрешности  $\Delta_{\text{мет}}$  и динамической  $\Delta_{\text{дин}}$ . Методическая погрешность прибора учитывает влияние условий измерения, в нашем случае  $\Delta_{\text{мет}} = 0$ , т.к. измерительные приборы используются при рекомендованных условиях работы.

Динамическая погрешность вносит корректировку, связанную со временем замера. При проведении натурального эксперимента время замера, для установления измеряемого показателя совпадает с рекомендованным, в результате  $\Delta_{\text{дин}} = 0$ . Итоговая систематическая погрешность приборов приведена в таблице 3.3.

Таблица 3.3 – Систематическая ошибка

Наименование измерительного прибора	$\Delta_1$ , %	Время установления показаний, с	$\Delta_c$ , %
Многофункциональный измерительный прибор testo 435-2 (измерение температуры)	3,0	50	3,0
Многофункциональный измерительный прибор testo 435-2 (измерение относительной влажности)	2,0	50	2,0

Случайная погрешность математически представлена как непрерывная случайная величина симметричная относительно нуля и независимо реализуемая в каждом измерении:

$$\Delta_{\text{сл}} = \pm \frac{\sum_{i=1}^n \Delta x_i}{n}, \quad (3.1)$$

где  $\Delta x_i$  – абсолютная погрешность каждого замера;  $n$  – общее число измерений.

Абсолютная погрешность рассчитывается по формуле:

$$\Delta x = x - x_{\text{ист}}, \quad (3.2)$$

где  $x$  – величина замера;  $x_{\text{ист}}$  – истинное значение измеряемой величины.

При проведении натурального эксперимента за истинное значение измеряемой величины приняты среднеарифметические значения измеренных величин.

На основании проведенных предварительных замеров температуры и относительной влажности воздуха (таблица 3.4) выполнен расчет случайной погрешности (таблица 3.5).

Таблица 3.4 – Предварительные результаты измерений

Наименование параметра	Ед. изм.	Номер замера				
		1	2	3	4	5
Температура	°С	4,3	4,2	4,1	4,2	3,8
Относительная влажность	%	81,5	81,0	81,0	81,5	81,0

Продолжение таблицы 3.4

Наименование параметра	Ед. изм.	Номер замера					$x_{\text{ср}}$
		6	7	8	9	10	
Температура	°С	3,9	4,1	4	3,8	4,1	4,05
Относительная влажность	%	82,0	81,5	81,5	80,5	81,5	81,3

Таблица 3.5 – Случайная ошибка

Наименование измерительного прибора	$\Delta x_1$	$\Delta x_2$	$\Delta x_3$	$\Delta x_4$	$\Delta x_5$
Многофункциональный измерительный прибор testo 435-2 (измерение температуры)	0,25	0,15	0,05	0,15	-0,25
Многофункциональный измерительный прибор testo 435-2 (измерение относительной влажности)	0,2	-0,3	-0,3	0,2	-0,3

Продолжение таблицы 3.5

Наименование измерительного прибора	$\Delta x_6$	$\Delta x_7$	$\Delta x_8$	$\Delta x_9$	$\Delta x_{10}$	$\Delta_{сл}$
Многофункциональный измерительный прибор testo 435-2 (измерение температуры)	-0,15	0,05	-0,05	-0,25	0,05	0,14 °С
Многофункциональный измерительный прибор testo 435-2 (измерение относительной влажности)	0,7	0,2	0,2	-0,8	0,2	0,34 %

Случайная ошибка для многофункционального измерительного прибора testo 435-2 при измерении температуры равняется  $\Delta_{сл} = \pm 0,14$  °С, что составляет 3,45 %. Общая погрешность измерения температуры воздуха многофункциональным измерительным прибором testo 435-2 составляет  $\Delta = \pm 6,45$  %. Случайная ошибка для многофункционального измерительного прибора testo 435-2 при измерении относительной влажности равняется  $\Delta_{сл} = \pm 0,34$  %, что составляет 0,42 %. Общая погрешность измерения относительной влажности воздуха многофункциональным измерительным прибором testo 435-2 составляет  $\Delta = \pm 2,42$  %.

Осредненное значение замера  $\bar{x}$  в  $\sqrt{n}$  раз более точно оценивает замер, чем математическое ожидание  $M_x$ , что является основанием для увеличения числа измерений. Для расчета характеристик одномерной случайной

величины проведем оценку значения  $\bar{x}$ , дисперсии  $s^2$  и среднеквадратичного отклонения  $s$  по зависимости:

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}; \quad (3.3)$$

$$s^2 = \frac{1}{n-1} \cdot \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2; \quad (3.4)$$

$$s = \sqrt{s^2}. \quad (3.5)$$

Количество замеров должно удовлетворять следующему равенству:

$$n \geq \left( \frac{t_{qv} \cdot s}{\beta_0} \right)^2, \quad (3.6)$$

где  $t_{qv}$  – распределение Стьюдента, находится по [4] с учетом числа степеней свободы  $\nu = n - 1$ , уровня значимости  $q = (1 - \alpha) \cdot 100\%$ ;  $\beta_0$  – доверительный интервал;  $\alpha$  – доверительная вероятность.

Применение значения  $x$  возможно при условии равенства нулю комбинации центральных моментов  $A$  и  $E$ :

$$A = \frac{1}{s^3 \cdot (n-1)} \cdot \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^3; \quad (3.7)$$

$$E = \frac{1}{s^4 \cdot (n-1)} \cdot \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^4. \quad (3.8)$$

Если комбинация центральных моментов не равна нулю, необходима оценка собственной дисперсии:

$$D(A) = \frac{6(n-1)}{(n+1)(n+3)}; \quad (3.9)$$

$$D(E) = \frac{24n(n-2)(n-3)}{(n+1)^2(n+3)(n+5)}. \quad (3.10)$$

Распределение считается нормальным при соблюдении неравенств:

$$|A| \leq 3\sqrt{D(A)}; \quad (3.11)$$

$$|E| \leq 5\sqrt{D(E)}. \quad ($$

Оценка нормального распределения моментов произведена на основе предварительных замеров (таблица 3.4) и представлена в таблице 3.6.

Расчет минимального количества измерений произведен с учетом следующих заданных параметров: доверительная вероятность  $\alpha = 0,95$ ; доверительный интервал  $\beta_0 = 0,2; 0,5; 0,04$  для измерения температуры, относительной влажности и скорости воздуха соответственно, приведен в таблице 3.7.

Таблица 3.6 – Оценка распределения измеренных величин

Наименование параметра	$s^2$	$s$	$A$	$E$	$D(A)$	$D(E)$	$3\sqrt{D(A)}$	$5\sqrt{D(E)}$
Температура	0,029	0,172	-0,26	1,70	0,45	0,57	2,01	3,77
Относительная влажность	0,178	0,422	-0,31	2,40	0,45	0,57	2,01	3,77

Таблица 3.7 – Количество измерений

Наименование параметра	$q, \%$	$\nu$	$t_{qv}$	$s$	$\beta_0$	$\left(\frac{t_{qv} \cdot s}{\beta_0}\right)^2$	$n$
Температура	5	4	2,57	0,172	0,2 °C	4,86	5
Относительная влажность	5	4	2,57	0,422	0,50 %	4,70	5

### 3.4. Анализ результатов экспериментальных исследований

Результаты замеров температуры, относительной влажности и рассчитанные значения потенциала влажности по уточненной  $I-d-\theta$ -диаграмме (рисунок 2.12) в двух рядах штабелей в 36 точках приведены в приложении А. Для построения наглядных рисунков в двумерной плоскости полей температуры, относительной влажности и потенциала влажности в хранилище, значения замеров усреднены по принципу т. 1 - т. 19, т. 2 - т. 20 ... т. 17 - т. 35, т. 18 - т. 36. Полученные осредненные срезы температуры, относительной влажности и потенциала влажности в камере хранения по

каждому дню проведения эксперимента представлены на рисунках 3.2, 3.4, 3.6, 3.8, 3.10, 3.12. На основании осредненных данных по каждому дню проведения замеров с применением программно-вычислительного комплекса Origin 8.1 построены поля температуры, относительной влажности (приложение Б) и потенциала влажности (рисунки 3.3, 3.5, 3.7, 3.9, 3.11, 3.13) в камере хранения, которые наглядно характеризуют параметры микроклимата в хранилище на протяжении всего периода проведения эксперимента.

Натурные исследования показали соответствие теплофизических условий хранения в контейнерах с СРС с рекомендуемым в технической и нормативной литературе. Общий анализ полей температур и относительной влажности и потенциалов влажности на протяжении всего периода проведения натурных исследований показал неравномерность распределения исследуемых параметров в объеме хранилища, что вызвано различными температурно-влажностными условиями наружного климата и неспособностью приточной установки быстро реагировать на меняющиеся параметры наружного воздуха [А.4, А.7].

Установлено, что в исследуемом объеме наблюдается неравномерность полей температур и относительной влажности и потенциалов влажности. Значения температур, относительной влажности и потенциала влажности меняются в диапазонах 3,6...5,3 °С, 77,0...92,5 %, 14,0...21,9 °В соответственно.

Анализ исследования полей температур в штабеле и объеме камеры показал, что температура воздуха в контейнерном и свободном пространстве камеры отличается от температуры сырья в контейнере. Температура в насыпи сырья в контейнерах выше, чем в свободном пространстве, разница значений достигает 1,7 °С, и зависит от геометрического расположения контейнеров в хранилище. Максимальная разница наблюдается в верхнем ряду, что вызвано наличием постоянных тепло выделений хранящейся продукции в процессе дыхания.

$t_b= 4.2 \text{ } ^\circ\text{C}$	$t_b= 5.1 \text{ } ^\circ\text{C}$	$t_b= 5.0 \text{ } ^\circ\text{C}$	$t_b= 5.2 \text{ } ^\circ\text{C}$	$t_b= 4.7 \text{ } ^\circ\text{C}$	$t_b= 3.9 \text{ } ^\circ\text{C}$
$\varphi= 82.0 \text{ } \%$	$\varphi= 88.0 \text{ } \%$	$\varphi= 92.0 \text{ } \%$	$\varphi= 85.5 \text{ } \%$	$\varphi= 87.0 \text{ } \%$	$\varphi= 89.5 \text{ } \%$
$\theta= 15.9 \text{ } ^\circ\text{B}$	$\theta= 19.3 \text{ } ^\circ\text{B}$	$\theta= 21.4 \text{ } ^\circ\text{B}$	$\theta= 18.2 \text{ } ^\circ\text{B}$	$\theta= 18.5 \text{ } ^\circ\text{B}$	$\theta= 19.0 \text{ } ^\circ\text{B}$
$t_b= 4.0 \text{ } ^\circ\text{C}$	$t_b= 5.0 \text{ } ^\circ\text{C}$	$t_b= 5.0 \text{ } ^\circ\text{C}$	$t_b= 5.0 \text{ } ^\circ\text{C}$	$t_b= 4.7 \text{ } ^\circ\text{C}$	$t_b= 4.0 \text{ } ^\circ\text{C}$
$\varphi= 82.0 \text{ } \%$	$\varphi= 87.0 \text{ } \%$	$\varphi= 86.5 \text{ } \%$	$\varphi= 85.0 \text{ } \%$	$\varphi= 87.0 \text{ } \%$	$\varphi= 86.5 \text{ } \%$
$\theta= 15.8 \text{ } ^\circ\text{B}$	$\theta= 18.7 \text{ } ^\circ\text{B}$	$\theta= 18.4 \text{ } ^\circ\text{B}$	$\theta= 17.7 \text{ } ^\circ\text{B}$	$\theta= 18.4 \text{ } ^\circ\text{B}$	$\theta= 17.6 \text{ } ^\circ\text{B}$
$t_b= 4.1 \text{ } ^\circ\text{C}$	$t_b= 4.6 \text{ } ^\circ\text{C}$	$t_b= 4.7 \text{ } ^\circ\text{C}$	$t_b= 4.8 \text{ } ^\circ\text{C}$	$t_b= 4.4 \text{ } ^\circ\text{C}$	$t_b= 3.6 \text{ } ^\circ\text{C}$
$\varphi= 79.0 \text{ } \%$	$\varphi= 83.5 \text{ } \%$	$\varphi= 85.5 \text{ } \%$	$\varphi= 85.0 \text{ } \%$	$\varphi= 77.0 \text{ } \%$	$\varphi= 83.0 \text{ } \%$
$\theta= 14.7 \text{ } ^\circ\text{B}$	$\theta= 16.8 \text{ } ^\circ\text{B}$	$\theta= 17.7 \text{ } ^\circ\text{B}$	$\theta= 17.6 \text{ } ^\circ\text{B}$	$\theta= 14.2 \text{ } ^\circ\text{B}$	$\theta= 15.9 \text{ } ^\circ\text{B}$

Рисунок 3.2 – Температурно-влажностное распределение хранилище 02.11.2013 г.

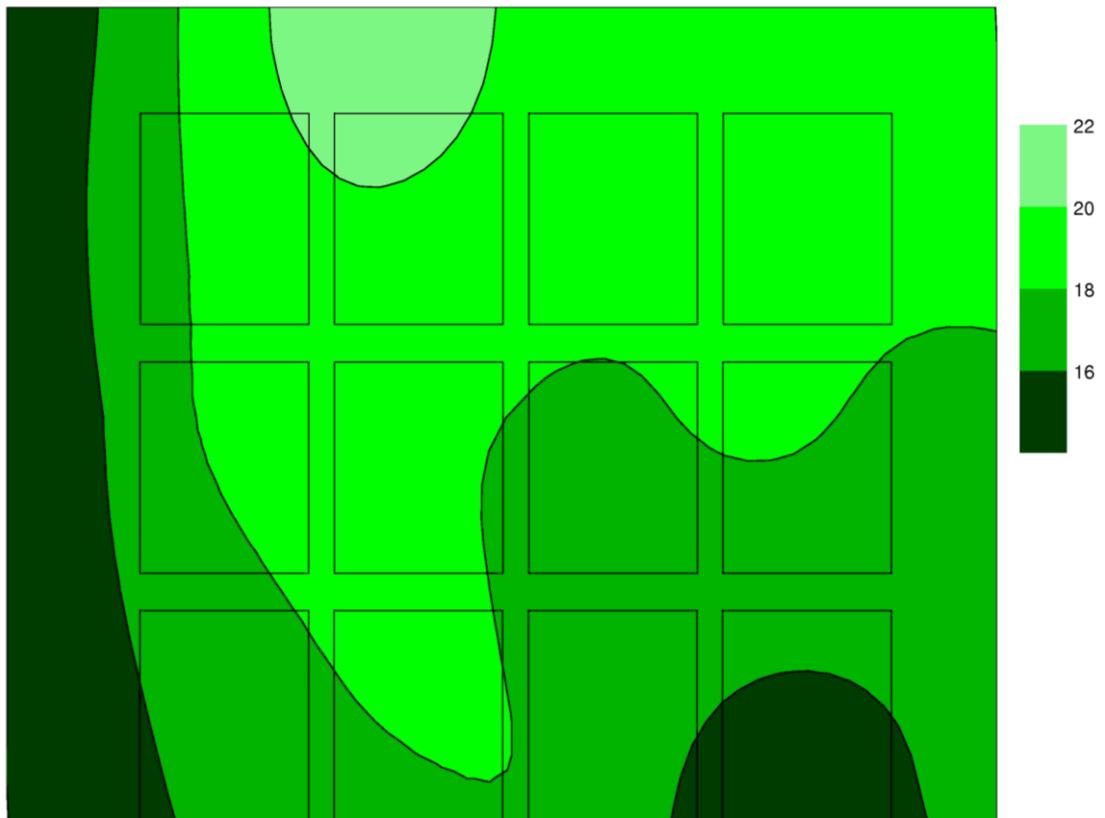


Рисунок 3.3 – Поле потенциала влажности в хранилище 02.11.2013 г.

$t_b= 4.2 \text{ } ^\circ\text{C}$	$t_b= 5.1 \text{ } ^\circ\text{C}$	$t_b= 5.3 \text{ } ^\circ\text{C}$	$t_b= 5.2 \text{ } ^\circ\text{C}$	$t_b= 5.2 \text{ } ^\circ\text{C}$	$t_b= 4.0 \text{ } ^\circ\text{C}$
$\varphi= 85.5 \text{ } \%$	$\varphi= 89.5 \text{ } \%$	$\varphi= 91.0 \text{ } \%$	$\varphi= 92.5 \text{ } \%$	$\varphi= 89.5 \text{ } \%$	$\varphi= 86.5 \text{ } \%$
$\theta= 17.3 \text{ } ^\circ\text{B}$	$\theta= 20.1 \text{ } ^\circ\text{B}$	$\theta= 21.1 \text{ } ^\circ\text{B}$	$\theta= 21.9 \text{ } ^\circ\text{B}$	$\theta= 20.2 \text{ } ^\circ\text{B}$	$\theta= 17.7 \text{ } ^\circ\text{B}$
$t_b= 4.0 \text{ } ^\circ\text{C}$	$t_b= 4.9 \text{ } ^\circ\text{C}$	$t_b= 5.2 \text{ } ^\circ\text{C}$	$t_b= 5.1 \text{ } ^\circ\text{C}$	$t_b= 5.1 \text{ } ^\circ\text{C}$	$t_b= 3.9 \text{ } ^\circ\text{C}$
$\varphi= 84.0 \text{ } \%$	$\varphi= 86.0 \text{ } \%$	$\varphi= 90.0 \text{ } \%$	$\varphi= 90.0 \text{ } \%$	$\varphi= 87.0 \text{ } \%$	$\varphi= 84.0 \text{ } \%$
$\theta= 16.6 \text{ } ^\circ\text{B}$	$\theta= 18.2 \text{ } ^\circ\text{B}$	$\theta= 20.4 \text{ } ^\circ\text{B}$	$\theta= 20.3 \text{ } ^\circ\text{B}$	$\theta= 18.8 \text{ } ^\circ\text{B}$	$\theta= 16.5 \text{ } ^\circ\text{B}$
$t_b= 3.8 \text{ } ^\circ\text{C}$	$t_b= 4.8 \text{ } ^\circ\text{C}$	$t_b= 4.8 \text{ } ^\circ\text{C}$	$t_b= 5.0 \text{ } ^\circ\text{C}$	$t_b= 4.7 \text{ } ^\circ\text{C}$	$t_b= 3.8 \text{ } ^\circ\text{C}$
$\varphi= 82.0 \text{ } \%$	$\varphi= 86.0 \text{ } \%$	$\varphi= 86.5 \text{ } \%$	$\varphi= 85.5 \text{ } \%$	$\varphi= 85.5 \text{ } \%$	$\varphi= 78.0 \text{ } \%$
$\theta= 15.7 \text{ } ^\circ\text{B}$	$\theta= 18.1 \text{ } ^\circ\text{B}$	$\theta= 18.2 \text{ } ^\circ\text{B}$	$\theta= 18.0 \text{ } ^\circ\text{B}$	$\theta= 17.7 \text{ } ^\circ\text{B}$	$\theta= 14.2 \text{ } ^\circ\text{B}$

Рисунок 3.4 – Температурно-влажностное распределение хранилище 16.11.2013 г.

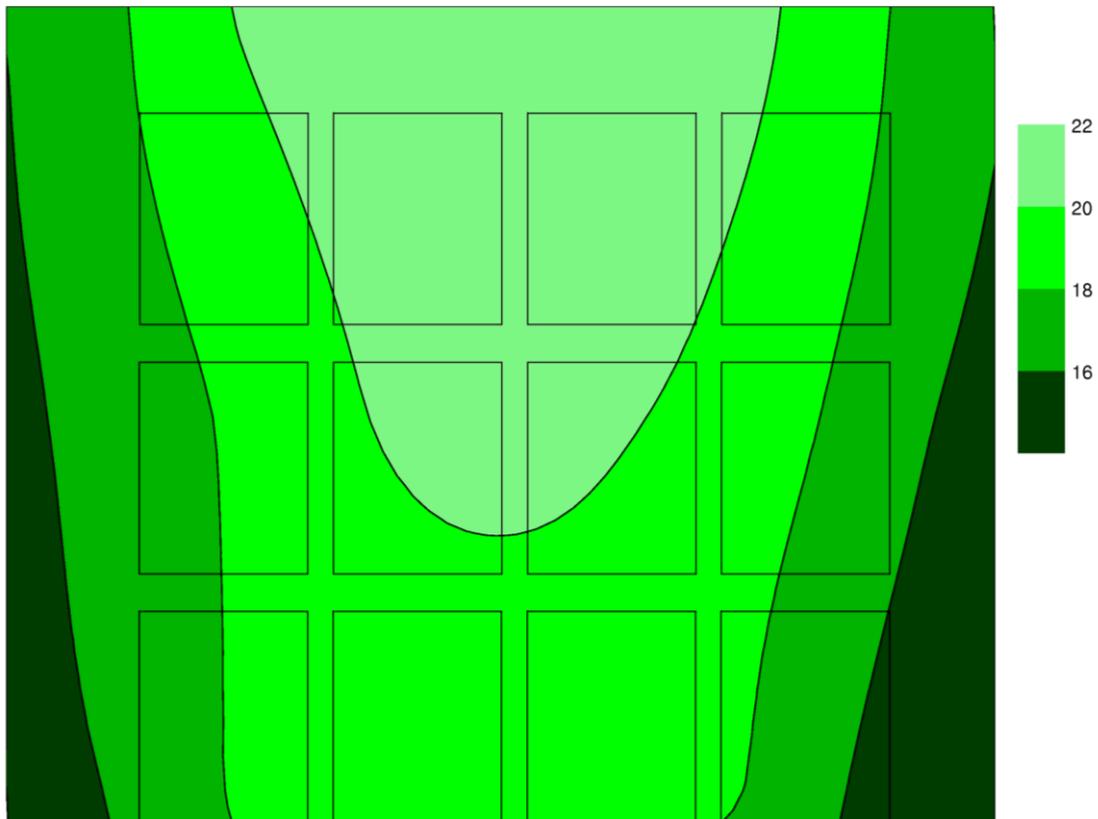


Рисунок 3.5 – Поле потенциала влажности в хранилище 16.11.2013 г.

$t_b= 4.0 \text{ } ^\circ\text{C}$	$t_b= 5.0 \text{ } ^\circ\text{C}$	$t_b= 5.1 \text{ } ^\circ\text{C}$	$t_b= 5.1 \text{ } ^\circ\text{C}$	$t_b= 5.2 \text{ } ^\circ\text{C}$	$t_b= 4.1 \text{ } ^\circ\text{C}$
$\varphi= 84.5 \text{ } \%$	$\varphi= 91.0 \text{ } \%$	$\varphi= 91.5 \text{ } \%$	$\varphi= 91.5 \text{ } \%$	$\varphi= 91.5 \text{ } \%$	$\varphi= 83.5 \text{ } \%$
$\theta= 16.7 \text{ } ^\circ\text{B}$	$\theta= 20.7 \text{ } ^\circ\text{B}$	$\theta= 21.2 \text{ } ^\circ\text{B}$	$\theta= 21.1 \text{ } ^\circ\text{B}$	$\theta= 21.2 \text{ } ^\circ\text{B}$	$\theta= 16.4 \text{ } ^\circ\text{B}$
$t_b= 3.9 \text{ } ^\circ\text{C}$	$t_b= 4.8 \text{ } ^\circ\text{C}$	$t_b= 4.9 \text{ } ^\circ\text{C}$	$t_b= 5.0 \text{ } ^\circ\text{C}$	$t_b= 4.9 \text{ } ^\circ\text{C}$	$t_b= 3.9 \text{ } ^\circ\text{C}$
$\varphi= 80.5 \text{ } \%$	$\varphi= 90.5 \text{ } \%$	$\varphi= 90.5 \text{ } \%$	$\varphi= 88.0 \text{ } \%$	$\varphi= 90.0 \text{ } \%$	$\varphi= 84.0 \text{ } \%$
$\theta= 15.1 \text{ } ^\circ\text{B}$	$\theta= 20.4 \text{ } ^\circ\text{B}$	$\theta= 20.4 \text{ } ^\circ\text{B}$	$\theta= 20.5 \text{ } ^\circ\text{B}$	$\theta= 20.1 \text{ } ^\circ\text{B}$	$\theta= 16.5 \text{ } ^\circ\text{B}$
$t_b= 3.7 \text{ } ^\circ\text{C}$	$t_b= 4.7 \text{ } ^\circ\text{C}$	$t_b= 4.5 \text{ } ^\circ\text{C}$	$t_b= 4.7 \text{ } ^\circ\text{C}$	$t_b= 4.8 \text{ } ^\circ\text{C}$	$t_b= 3.7 \text{ } ^\circ\text{C}$
$\varphi= 79.5 \text{ } \%$	$\varphi= 83.0 \text{ } \%$	$\varphi= 88.0 \text{ } \%$	$\varphi= 87.0 \text{ } \%$	$\varphi= 86.0 \text{ } \%$	$\varphi= 78.5 \text{ } \%$
$\theta= 14.7 \text{ } ^\circ\text{B}$	$\theta= 16.7 \text{ } ^\circ\text{B}$	$\theta= 18.8 \text{ } ^\circ\text{B}$	$\theta= 18.4 \text{ } ^\circ\text{B}$	$\theta= 18.0 \text{ } ^\circ\text{B}$	$\theta= 14.3 \text{ } ^\circ\text{B}$

Рисунок 3.6 – Температурно-влажностное распределение хранилище 01.12.2013 г.

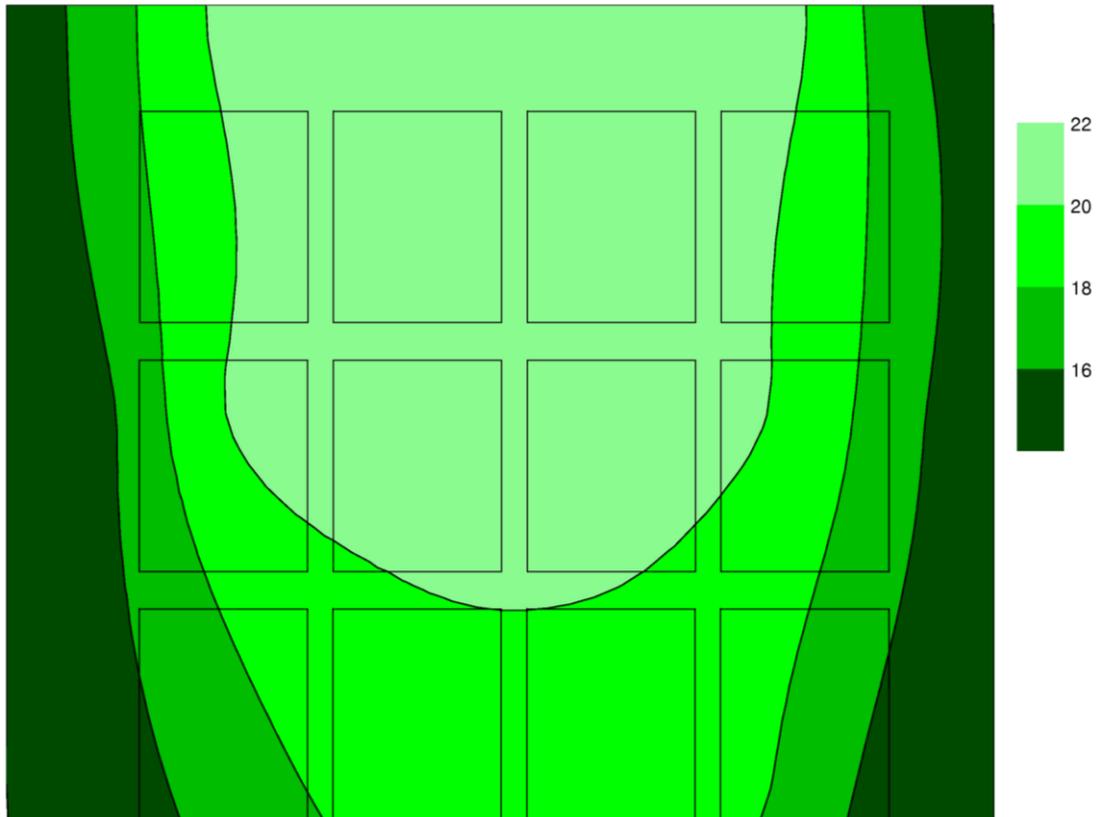


Рисунок 3.7 – Поле потенциала влажности в хранилище 01.12.2013 г.

$t_b= 4.1 \text{ } ^\circ\text{C}$	$t_b= 5.0 \text{ } ^\circ\text{C}$	$t_b= 5.1 \text{ } ^\circ\text{C}$	$t_b= 5.3 \text{ } ^\circ\text{C}$	$t_b= 5.2 \text{ } ^\circ\text{C}$	$t_b= 3.8 \text{ } ^\circ\text{C}$
$\varphi= 86.5 \text{ } \%$	$\varphi= 92.0 \text{ } \%$	$\varphi= 91.5 \text{ } \%$	$\varphi= 92.0 \text{ } \%$	$\varphi= 92.0 \text{ } \%$	$\varphi= 91.5 \text{ } \%$
$\theta= 17.9 \text{ } ^\circ\text{B}$	$\theta= 21.4 \text{ } ^\circ\text{B}$	$\theta= 21.2 \text{ } ^\circ\text{B}$	$\theta= 21.6 \text{ } ^\circ\text{B}$	$\theta= 21.5 \text{ } ^\circ\text{B}$	$\theta= 20.0 \text{ } ^\circ\text{B}$
$t_b= 3.9 \text{ } ^\circ\text{C}$	$t_b= 4.6 \text{ } ^\circ\text{C}$	$t_b= 5.0 \text{ } ^\circ\text{C}$	$t_b= 5.3 \text{ } ^\circ\text{C}$	$t_b= 5.0 \text{ } ^\circ\text{C}$	$t_b= 3.7 \text{ } ^\circ\text{C}$
$\varphi= 84.0 \text{ } \%$	$\varphi= 89.0 \text{ } \%$	$\varphi= 89.5 \text{ } \%$	$\varphi= 89.0 \text{ } \%$	$\varphi= 92.5 \text{ } \%$	$\varphi= 88.0 \text{ } \%$
$\theta= 16.5 \text{ } ^\circ\text{B}$	$\theta= 19.5 \text{ } ^\circ\text{B}$	$\theta= 19.9 \text{ } ^\circ\text{B}$	$\theta= 20.0 \text{ } ^\circ\text{B}$	$\theta= 21.7 \text{ } ^\circ\text{B}$	$\theta= 18.2 \text{ } ^\circ\text{B}$
$t_b= 3.9 \text{ } ^\circ\text{C}$	$t_b= 4.5 \text{ } ^\circ\text{C}$	$t_b= 4.8 \text{ } ^\circ\text{C}$	$t_b= 4.9 \text{ } ^\circ\text{C}$	$t_b= 4.8 \text{ } ^\circ\text{C}$	$t_b= 3.7 \text{ } ^\circ\text{C}$
$\varphi= 77.5 \text{ } \%$	$\varphi= 89.5 \text{ } \%$	$\varphi= 85.0 \text{ } \%$	$\varphi= 88.0 \text{ } \%$	$\varphi= 87.5 \text{ } \%$	$\varphi= 83.0 \text{ } \%$
$\theta= 14.1 \text{ } ^\circ\text{B}$	$\theta= 19.5 \text{ } ^\circ\text{B}$	$\theta= 17.6 \text{ } ^\circ\text{B}$	$\theta= 19.1 \text{ } ^\circ\text{B}$	$\theta= 18.7 \text{ } ^\circ\text{B}$	$\theta= 16.0 \text{ } ^\circ\text{B}$

Рисунок 3.8 – Температурно-влажностное распределение хранилище 14.12.2013 г.

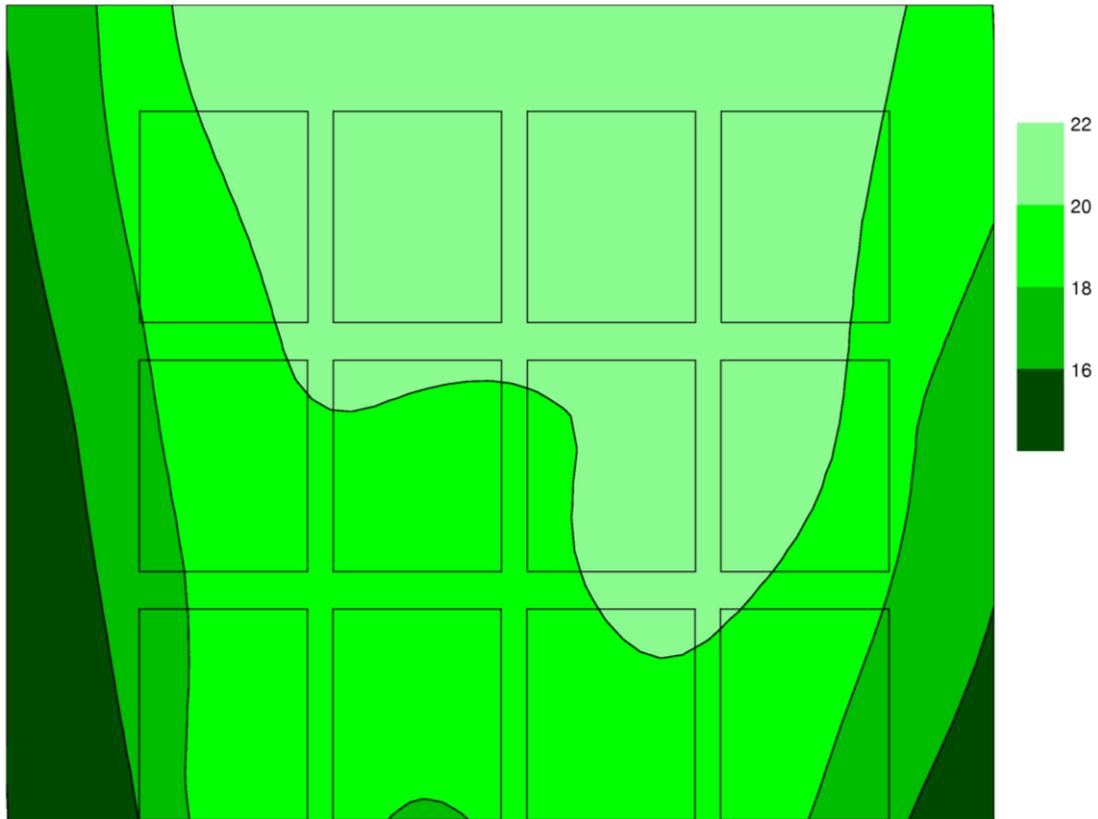


Рисунок 3.9 – Поле потенциала влажности в хранилище 14.12.2013 г.

$t_b= 4.2 \text{ } ^\circ\text{C}$	$t_b= 5.0 \text{ } ^\circ\text{C}$	$t_b= 5.0 \text{ } ^\circ\text{C}$	$t_b= 5.1 \text{ } ^\circ\text{C}$	$t_b= 4.8 \text{ } ^\circ\text{C}$	$t_b= 3.9 \text{ } ^\circ\text{C}$
$\varphi= 84.5 \text{ } \%$	$\varphi= 91.0 \text{ } \%$	$\varphi= 91.0 \text{ } \%$	$\varphi= 92.0 \text{ } \%$	$\varphi= 91.5 \text{ } \%$	$\varphi= 86.0 \text{ } \%$
$\theta= 17.0 \text{ } ^\circ\text{B}$	$\theta= 20.8 \text{ } ^\circ\text{B}$	$\theta= 20.8 \text{ } ^\circ\text{B}$	$\theta= 21.5 \text{ } ^\circ\text{B}$	$\theta= 20.9 \text{ } ^\circ\text{B}$	$\theta= 17.4 \text{ } ^\circ\text{B}$
$t_b= 4.0 \text{ } ^\circ\text{C}$	$t_b= 5.0 \text{ } ^\circ\text{C}$	$t_b= 4.8 \text{ } ^\circ\text{C}$	$t_b= 5.1 \text{ } ^\circ\text{C}$	$t_b= 4.7 \text{ } ^\circ\text{C}$	$t_b= 3.9 \text{ } ^\circ\text{C}$
$\varphi= 84.5 \text{ } \%$	$\varphi= 89.0 \text{ } \%$	$\varphi= 89.0 \text{ } \%$	$\varphi= 91.5 \text{ } \%$	$\varphi= 89.0 \text{ } \%$	$\varphi= 85.5 \text{ } \%$
$\theta= 16.8 \text{ } ^\circ\text{B}$	$\theta= 19.7 \text{ } ^\circ\text{B}$	$\theta= 19.5 \text{ } ^\circ\text{B}$	$\theta= 21.1 \text{ } ^\circ\text{B}$	$\theta= 19.5 \text{ } ^\circ\text{B}$	$\theta= 17.1 \text{ } ^\circ\text{B}$
$t_b= 3.7 \text{ } ^\circ\text{C}$	$t_b= 4.9 \text{ } ^\circ\text{C}$	$t_b= 4.4 \text{ } ^\circ\text{C}$	$t_b= 4.8 \text{ } ^\circ\text{C}$	$t_b= 4.6 \text{ } ^\circ\text{C}$	$t_b= 3.8 \text{ } ^\circ\text{C}$
$\varphi= 78.5 \text{ } \%$	$\varphi= 87.0 \text{ } \%$	$\varphi= 88.5 \text{ } \%$	$\varphi= 86.0 \text{ } \%$	$\varphi= 88.5 \text{ } \%$	$\varphi= 81.5 \text{ } \%$
$\theta= 14.3 \text{ } ^\circ\text{B}$	$\theta= 18.6 \text{ } ^\circ\text{B}$	$\theta= 19.0 \text{ } ^\circ\text{B}$	$\theta= 18.0 \text{ } ^\circ\text{B}$	$\theta= 19.0 \text{ } ^\circ\text{B}$	$\theta= 15.5 \text{ } ^\circ\text{B}$

Рисунок 3.10 – Температурно-влажностное распределение хранилище 11.01.2014 г.

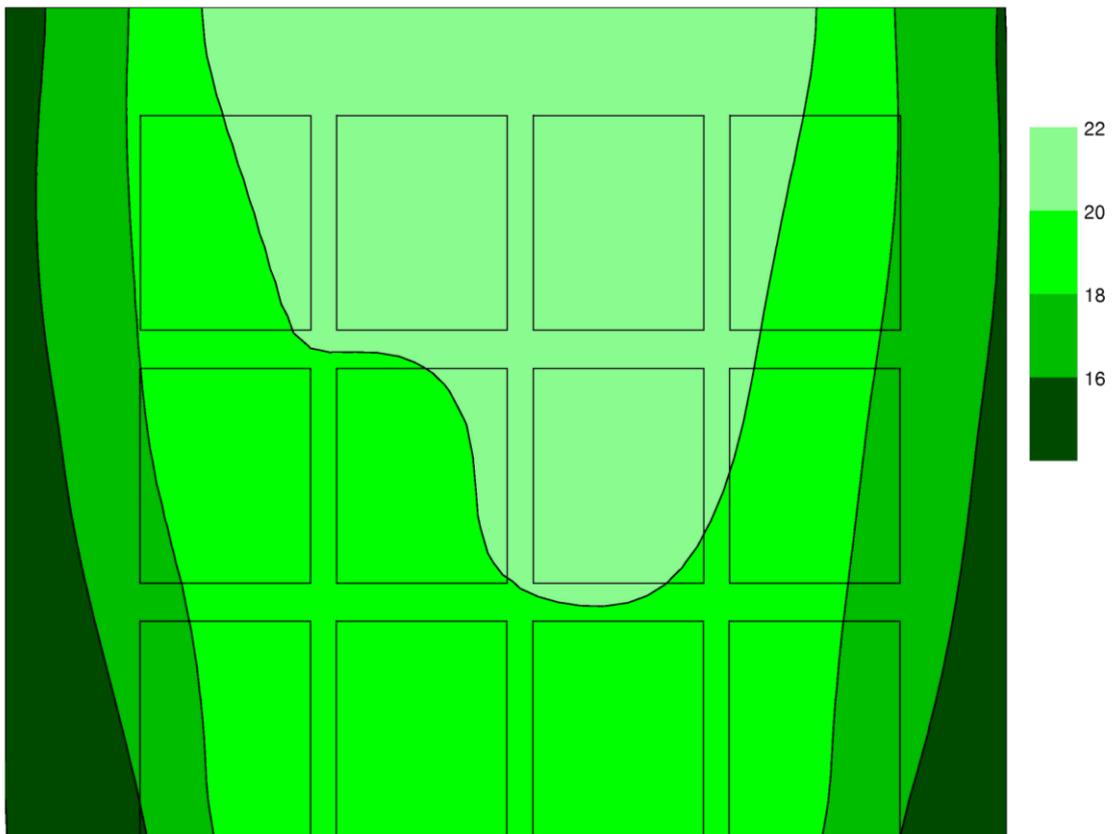


Рисунок 3.11 – Поле потенциала влажности в хранилище 11.01.2014 г.

$t_b= 4.2 \text{ } ^\circ\text{C}$	$t_b= 4.6 \text{ } ^\circ\text{C}$	$t_b= 5.0 \text{ } ^\circ\text{C}$	$t_b= 5.2 \text{ } ^\circ\text{C}$	$t_b= 5.1 \text{ } ^\circ\text{C}$	$t_b= 4.5 \text{ } ^\circ\text{C}$
$\varphi= 91.0 \text{ } \%$	$\varphi= 90.5 \text{ } \%$	$\varphi= 91.5 \text{ } \%$	$\varphi= 92.0 \text{ } \%$	$\varphi= 91.5 \text{ } \%$	$\varphi= 90.0 \text{ } \%$
$\theta= 20.0 \text{ } ^\circ\text{B}$	$\theta= 20.1 \text{ } ^\circ\text{B}$	$\theta= 21.1 \text{ } ^\circ\text{B}$	$\theta= 21.6 \text{ } ^\circ\text{B}$	$\theta= 21.2 \text{ } ^\circ\text{B}$	$\theta= 19.8 \text{ } ^\circ\text{B}$
$t_b= 4.0 \text{ } ^\circ\text{C}$	$t_b= 4.6 \text{ } ^\circ\text{C}$	$t_b= 4.8 \text{ } ^\circ\text{C}$	$t_b= 4.8 \text{ } ^\circ\text{C}$	$t_b= 4.6 \text{ } ^\circ\text{C}$	$t_b= 4.3 \text{ } ^\circ\text{C}$
$\varphi= 87.0 \text{ } \%$	$\varphi= 89.5 \text{ } \%$	$\varphi= 90.5 \text{ } \%$	$\varphi= 90.5 \text{ } \%$	$\varphi= 91.5 \text{ } \%$	$\varphi= 81.5 \text{ } \%$
$\theta= 17.8 \text{ } ^\circ\text{B}$	$\theta= 19.6 \text{ } ^\circ\text{B}$	$\theta= 20.3 \text{ } ^\circ\text{B}$	$\theta= 20.2 \text{ } ^\circ\text{B}$	$\theta= 20.7 \text{ } ^\circ\text{B}$	$\theta= 15.9 \text{ } ^\circ\text{B}$
$t_b= 3.9 \text{ } ^\circ\text{C}$	$t_b= 4.3 \text{ } ^\circ\text{C}$	$t_b= 4.5 \text{ } ^\circ\text{C}$	$t_b= 4.4 \text{ } ^\circ\text{C}$	$t_b= 4.5 \text{ } ^\circ\text{C}$	$t_b= 4.2 \text{ } ^\circ\text{C}$
$\varphi= 77.5 \text{ } \%$	$\varphi= 88.0 \text{ } \%$	$\varphi= 87.0 \text{ } \%$	$\varphi= 87.5 \text{ } \%$	$\varphi= 88.5 \text{ } \%$	$\varphi= 78.5 \text{ } \%$
$\theta= 14.0 \text{ } ^\circ\text{B}$	$\theta= 18.6 \text{ } ^\circ\text{B}$	$\theta= 18.3 \text{ } ^\circ\text{B}$	$\theta= 18.4 \text{ } ^\circ\text{B}$	$\theta= 19.0 \text{ } ^\circ\text{B}$	$\theta= 14.6 \text{ } ^\circ\text{B}$

Рисунок 3.12 – Температурно-влажностное распределение хранилище 25.01.2014 г.

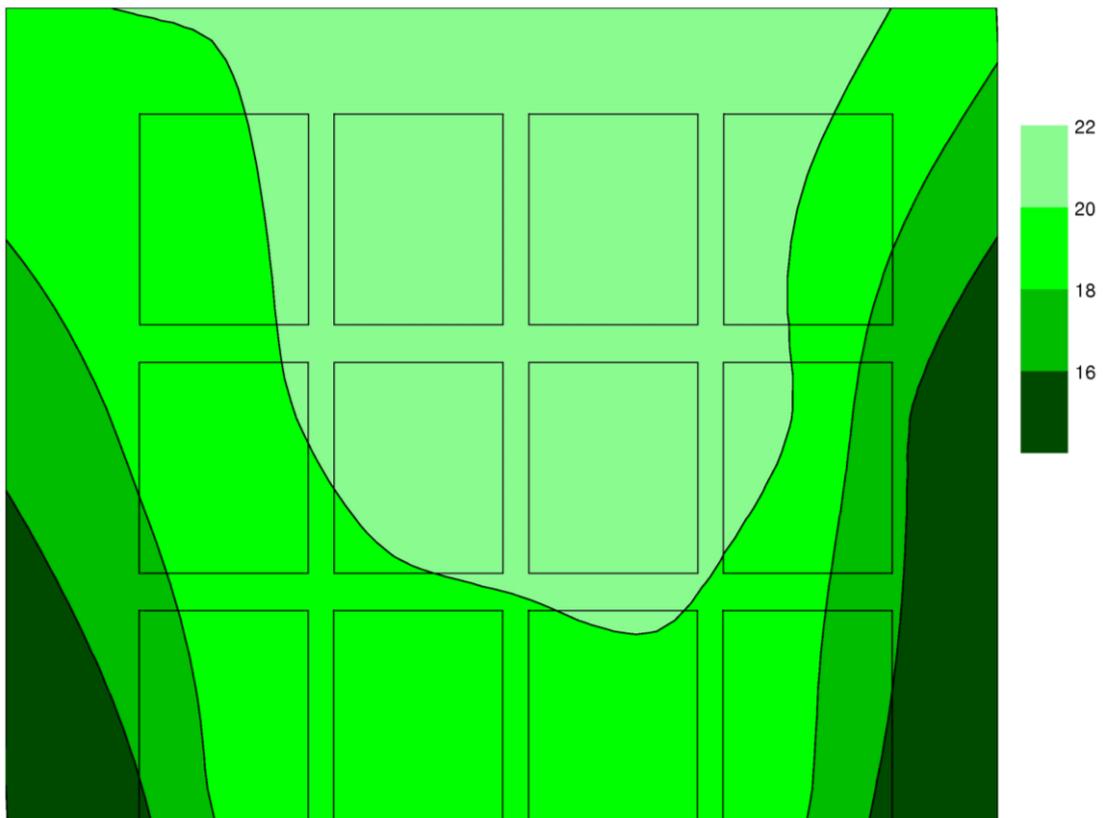


Рисунок 3.13 – Поле потенциала влажности в хранилище 25.01.2014 г.

Относительная влажность характеризуется неравномерными полями в объеме хранилища. Значения относительной влажности  $\varphi$  меняются в диапазоне от 77,0 до 92,5 %. Подаваемый в хранилище воздух, фильтруясь в межконтейнерном пространстве и через контейнеры с сырьем, ассимилирует влагу хранящейся продукции, выделяемую в процессе дыхания. Наблюдается увеличение значений относительной влажности по направлению вверх. Максимальные значения относительной влажности зафиксированы в верхней зоне исследуемого объема. Также можно отметить, что повышенная влажность, значения которой выше рекомендованной для хранения соответствующего вида СРС, может вызвать появление капельной влаги.

Следует отметить, что результаты натурных исследований по распределению температуры и относительной влажности имеют высокую сходимость с результатами экспериментальных исследований, проводимых ранее М.П. Калашниковым [51].

Поля потенциалов влажности, напротив 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. Значения потенциалов влажности  $\theta$  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 [А.10]. Равномерность или линейность в возрастании потенциала влажности по высоте обусловлена тем что, значение потенциал влажности одновременно зависит от температуры и относительной влажности. Потенциал влажности характеризует общую картину дефицита или избытка ассимилирующей способности подаваемого в хранилище воздуха. В расчетах времени работы систем вентиляции, и для оперативного регулирования тепловлажностной характеристики подаваемого в хранилище воздуха можно применять осредненные значения потенциала влажности, как показатель общей картины тепловлагообменных процессов в

хранилище, что упростит расчеты и с достаточной точностью позволит оперативно вносить корректировку в тепловлажностную характеристику подаваемого в хранилище воздуха.

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

Изменение значений потенциала влажности по высоте хранящейся продукции представлено в виде графика (рисунок 3.14), построенного на основании экспериментально полученных полей потенциала влажности в хранилище. В качестве расчетных точек приняты осредненные значения потенциала влажности в исследуемом объеме хранилища с шагом 0,5 м.

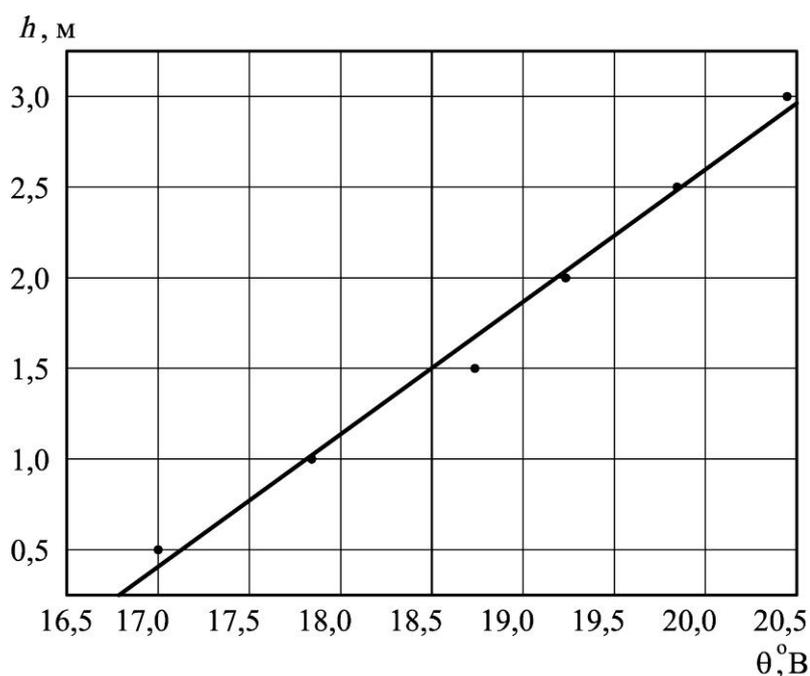


Рисунок 3.14 – Динамика изменения потенциала влажности в зависимости от высоты

В качестве аппроксимирующей функции, наиболее вероятно показывающей расчетные точки, выбрана линейная зависимость, описываемая уравнением:

$$\theta = \frac{h + 12,19}{0,74}, \quad (3.13)$$

где  $h$  – высота слоя хранящейся продукции, м.

Зависимость (3.13) однозначно характеризует динамику потенциала влажности в слое хранящейся продукции в зависимости от высоты слоя и позволяет упростить расчеты при определении оптимальных условий хранения сочного растительного сырья.

## Выводы по главе 3

1. Разработана методика проведения натурного эксперимента с обоснованием применения необходимых измерительных устройств. Проведено планирование натурного эксперимента с определением минимального количества замеров и оценки их точности.
2. Проведенный натурный эксперимент позволил выполнить комплекс исследований теплофизических характеристик и динамики процессов тепломассопереноса в слое хранящейся продукции при работе систем вентиляции.
3. В результате натурных исследований получено, что поля потенциалов влажности имеют выраженный равномерный характер, как в объеме хранилища, так и в объеме каждого контейнера, что свидетельствует о правомерности применения понятия потенциал влажности в расчете времени работы систем обеспечения микроклимата при хранении сочного растительного сырья.
4. На основе экспериментальных данных получена аналитическая зависимость изменения значения потенциала влажности в слое по высоте штабеля.
5. Анализ полей потенциала влажности, полученных в результате натурного эксперимента, позволяет рассматривать штабель контейнеров сочного растительного сырья как насыпь с равномерно распределенными по объему источниками теплоты и влаги и подтверждает правомерность применения потенциала влажности и  $I-d-\theta$ -диаграммы при расчетах процессов тепломассообмена в хранилище биологически активной продукции.

## ГЛАВА 4. ИНЖЕНЕРНЫЙ МЕТОД РАСЧЕТА И ТЕХНИКО- ЭКОНОМИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ РЕЖИМОВ РАБОТЫ СИСТЕМ ВЕНТИЛЯЦИИ

### 4.1. Использование естественных источников энергии

Применение естественных источников энергии для поддержания температурно-влажностных параметров в хранилищах СРС изучены недостаточно. Применение естественного холода приводит к повышению энергоэффективности хранения СРС. Наиболее сильно это прослеживается в период охлаждения продукции, как наиболее напряженный с точки зрения расхода холода (таблица 4.1).

Таблица 4.1 – Сроки периода охлаждения и начальная температура продукции [72]

	Картофель	Корнеплоды	Капуста
Начальная температура $t_{к.о}$ , °С	15	10	10
Период охлаждения	10.10...10.11	10.10...25.10	15.10...30.10

Оценка возможности использования естественного холода невозможна без выявления реальной обеспеченности температурного режима в период охлаждения СРС в хранилище.

В начальный период охлаждения, характеризуемый максимальной теплонапряженностью, насыпь должна обрабатываться воздухом с начальной температурой  $t_{в.о}$ , равной для картофеля  $t_{в.о} \leq t_{к} = 2$  °С, для корнеплодов  $t_{в.о} \leq t_{к} = 0,5...1,0$  °С, для капусты  $t_{в.о} \leq t_{к} = 0$  °С [15].

Время работы вентиляции период охлаждения  $K_{в} = 0,3...0,35$  ( $\tau_{в} = 7,5...8,0$  ч в сутки) [18], что дает возможность использовать только более холодный воздух ночью.

Общий ход изменения температуры наружного воздуха  $t_{н}$  при круглогодичном хранении показан на рисунке 4.1.

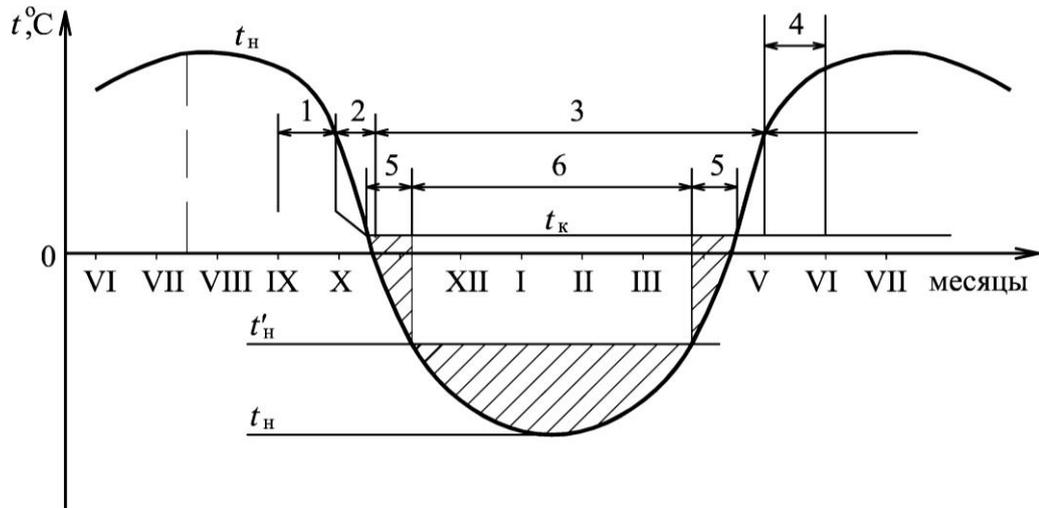


Рисунок 4.1 – Изменение температур наружного воздуха в течении года [15]: 1 – лечебный период; 2 – период охлаждения; 3 – основной период; 4 – период проращивания; 5 – период теплоизбытков; 6 – период теплонедостатков

Применение естественного холода при охлаждении биологически активной продукции в зависимости от климатического района предложено и обосновано в [45].

Вместо общепринятой среднесуточной температуры предлагается принять следующую температуру наружного воздуха [15]:

$$t_H^H = 0,5(t_{H,B} + t_{cp}) - 0,25\Delta t_a \quad (4.1)$$

Качественные изменения суточной температуры наружного воздуха в октябре показано на рисунке 4.2.

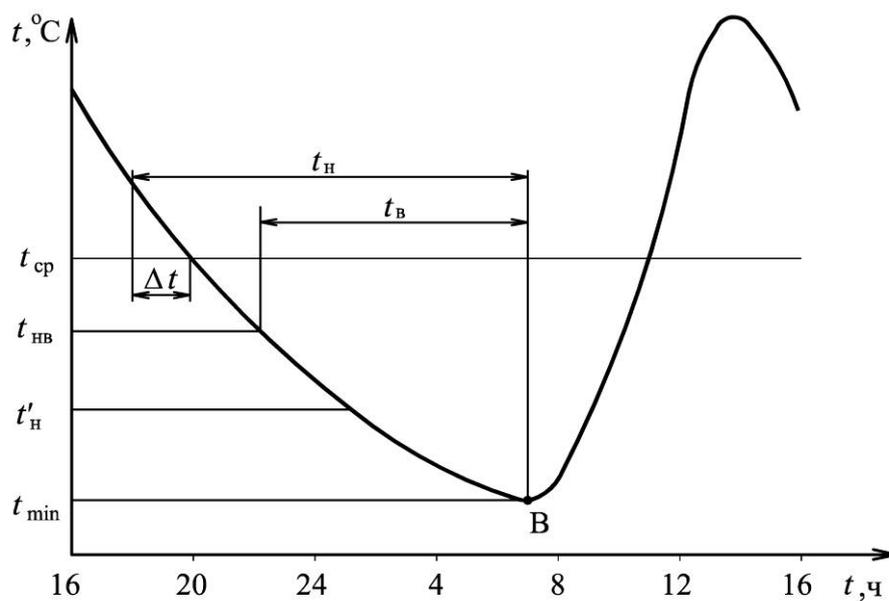


Рисунок 4.2 – Изменение температуры воздуха в течении суток в октябре [15]

Температура наружного воздуха в начале вентилирования  $t_{н.в}$  равна [15]:

$$t_{н.в} = t_{ср} - \frac{0,5 \cdot \Delta t_a (\tau_n - \Delta\tau - 24K_v)}{\tau_n - \Delta\tau}, \quad (4.2)$$

где  $\tau_n$  – длительность ночи, ч;  $\Delta\tau$  – время необходимое для совпадения температурной кривой с температурой наружного воздуха, ч;  $\Delta t_a$  – амплитуда среднесуточного колебания температуры наружного воздуха для расчетного месяца, °С, определяется по СП [86];  $t_{ср}$  – среднесуточная температура наружного воздуха, °С.

Оценка возможности использования необработанного атмосферного воздуха при хранении СРС проводилась для климатических условий Самарской и Нижегородской областей, климат которых характерен для южной и северной части Среднего Поволжья [А.9].

На рисунке 4.3 представлен ход изменения среднесуточных температур наружного воздуха в октябре - ноябре. Исходные данные для г. Тольятти получены в Тольяттинской специализированной гидрометеорологической обсерватории. Климатические данные для г. Нижний Новгород приняты в соответствии с результатами ранее проводимых исследований [15].

В таблице 4.2 приведены прогнозируемые температуры поступающего в насыпь воздуха  $t_{в.о}$  в начале цикла охлаждения на 10 и 15 октября. Температуры поступающего в насыпь воздуха  $t_{в.о}$  рассчитаны с учетом его нагрева в вентиляторах на  $\Delta t_{в.о} = 1$  °С ( $t_{в.о} = t_n^H + 1$ ), и учитывают применение только естественного холода. Продолжительность ночи  $\tau_n$  и коэффициент использования вентиляции  $K_v$  приняты постоянными:  $\tau_n = 13,0$  ч для 10 октября и 13,5 ч для 15 октября;  $K_v = 0,3$ .

Таблица 4.2 – Температура поступающего в насыпь воздуха

Город	Дата	$t_{ср}$ , °С	$\Delta t_a$ , °С	$\tau_n$ , ч	$\Delta\tau$ , ч	$t_{н.в}$ , °С	$t_n^H$ , °С	$t_{в.о}$ , °С
Тольятти	10.10	10,2	7,1	13,0	3,0	9,17	7,89	8,89
	15.10	6,8	7,1	13,5	3,0	5,85	4,57	5,57
Нижний Новгород	10.10	4,9	5,4	13,0	3,0	4,14	3,17	4,17
	15.10	3,6	5,4	13,5	3,0	2,75	1,83	2,83

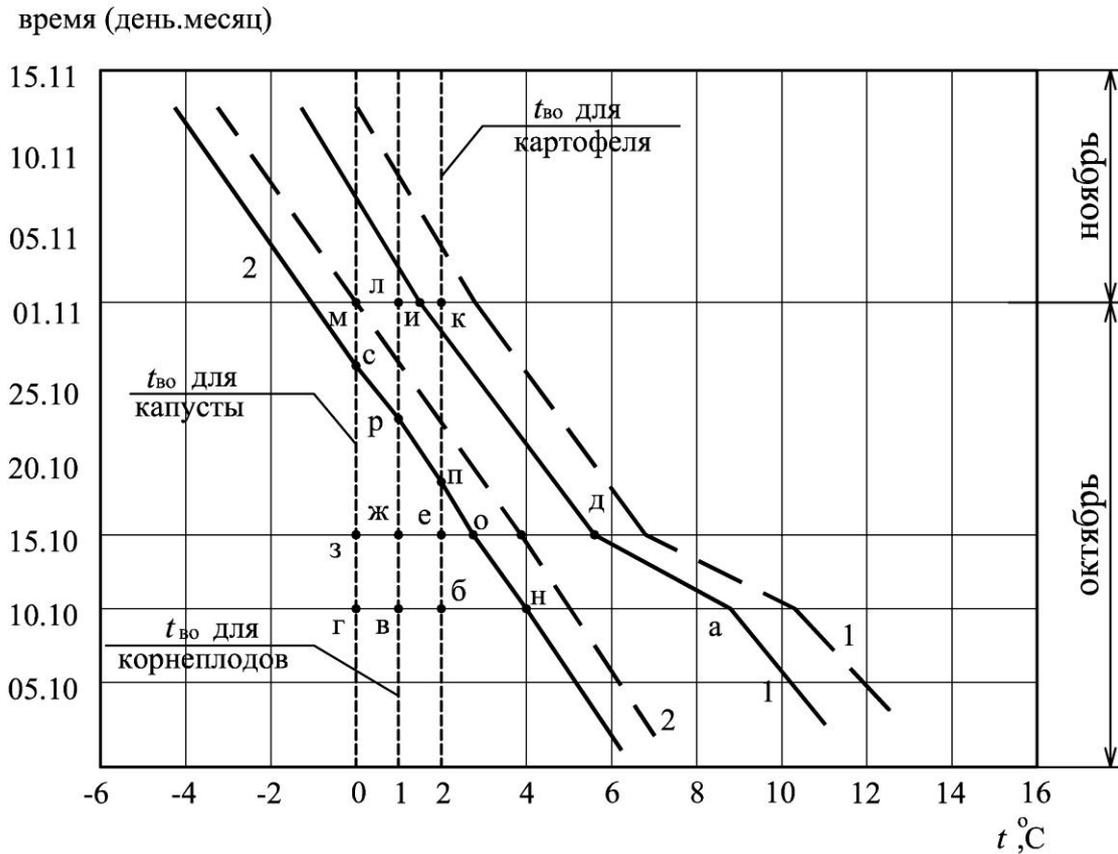


Рисунок 4.3 – Определение потребности в искусственном холоде хранилищ СРС: - - - - - линия среднемесячных температур наружного воздуха  $t_{cp}$ ; ——— линия температур подаваемого в хранилище воздуха  $t_{во}$ ; 1 – г. Тольятти; г. 2 – Нижний Новгород

В г. Тольятти превышения температуры поступающего в ночные часы наружного воздуха  $t_{в.о}$  над рекомендуемыми температурами охлаждения по биологическим требованиям  $t_{в.о}^p$  в октябре составляют (рисунок 4.3):

– для картофеля: 10 октября  $\Delta t_{в.о} - t_{в.о}^p = 8,89 - 2 = 6,89$  °С (ордината а–б); 15 октября  $\Delta t_{в.о} - t_{в.о}^p = 5,57 - 2 = 3,57$  °С (ордината д–е);

– для корнеплодов: 10 октября  $\Delta t_{в.о} = 8,89 - 1 = 7,89$  °С (ордината а–в); 15 октября  $\Delta t_{в.о} = 5,57 - 1 = 4,57$  °С (ордината д–ж);

– для капусты: 10 октября  $\Delta t_{в.о} = 8,89 - 0 = 8,89$  °С (ордината а–г); 15 октября  $\Delta t_{в.о} = 5,57 - 0 = 5,57$  °С (ордината д–з).

Близкие к оптимальным температуры охлаждающего воздуха в климатическом регионе г. Тольятти устанавливаются к началу ноября (и–к,

и–л, и–м на рисунке 4.3).

В г. Нижнем Новгороде потребности в холоде ниже. На 10 октября для клубней величина  $\Delta t_{в.о} = 2,17$  °С (н–б на рисунке 4.3), для корнеплодов  $\Delta t_{в.о} = 3,17$  °С (н–в на рисунке 4.3) и для капусты  $\Delta t_{в.о} = 4,17$  °С (н–г на рисунке 4.3); на 15 октября соответственно 0,83 °С (о–е на рисунке 4.3), 1,8 °С (о–ж на рисунке 4.3), 2,83 °С (о–з на рисунке 4.3).

После 15 октября, в ночные часы, температура наружного воздуха достигает значений  $t_{в.о}^p$  - точки п, р, с (рисунок 4.3) для картофеля, корнеплодов и капусты соответственно.

Расчет температур поступающего в насыпь воздуха в зависимости от климатического района и типа хранящейся продукции приведен в таблице 4.3.

Таблица 4.3 – Температура, °С, поступающего в насыпь воздуха

Климатический район	Дата	Картофель			Корнеплоды			Капуста		
		$t_{в.о}$	$t_{в.о}^p$	$\Delta t_{в.о}$	$t_{в.о}$	$t_{в.о}^p$	$\Delta t_{в.о}$	$t_{в.о}$	$t_{в.о}^p$	$\Delta t_{в.о}$
Тольятти	10.10	8,89	2	6,89	8,89	1	7,89	8,89	0	8,89
	15.10	5,57	2	3,57	5,57	1	4,57	5,57	0	5,57
Нижний Новгород	10.10	4,17	2	2,17	4,17	1	3,17	4,17	0	4,17
	15.10	2,83	2	0,83	2,83	1	1,83	2,83	0	2,83

В климатических условиях Самарской области на примере г. Тольятти оптимальные условия охлаждения СРС с применением естественного холода в течение всего периода охлаждения невозможны. Коэффициент обеспеченности холода при применении необработанного наружного воздуха составляет  $K_{об} = 0,3$ .

В климатических условиях Нижегородской области, на примере г. Нижнего Новгорода, рекомендуемые параметры подаваемого в хранилище воздуха в начале периода не выдерживаются. Температура подаваемого в хранилище наружного воздуха достигает оптимальной ( $t_{н} < t_{в.о}^p$ ) через 8 суток

после начала периода охлаждения. Продолжительность периода охлаждения достигает 30...35 суток. Охлаждение продукции возможно без применения искусственных источников холода с обеспеченностью  $K_{об} = 0,8$ .

Количество холода, необходимого для охлаждения подаваемого в хранилище воздуха рассчитывается по формуле:

$$Q_{x1} = L_H c_B \rho_B \Delta t_{B.0}. \quad (4.3)$$

При повышении температуры наружного воздуха в весенний период возникает необходимость применения искусственного холода для подготовки воздуха подаваемого в хранилище, этот момент наступает при равенстве температур  $t_k = t_H$ . Количество холода, необходимое для подготовки воздуха, рассчитывается по формуле:

$$Q_{x2} = L_H c_B \rho_B (t_H - t_{B.0}^P). \quad (4.4)$$

Расход холода увеличивается по мере повышения температуры  $t_H$  и становится максимальным в июле.

Хранение биологически активной продукции в летний период возможно в хранилищах – холодильниках, с учетом технических требований по СП [83, 84] к таким сооружениям.

Семенной картофель перед посадкой проращивают, необходимо прогревание при температуре 10...12 °С. Потребность в искусственном холоде в данный период отсутствует.

Таким образом, обоснованное применение естественного холода в зависимости от климатических условий рассматриваемого региона, позволяет отказаться от искусственных источников холода, что приводит к повышению энергоэффективности процесса хранения СРС. Однако, оценка только температурных характеристик наружного климата является не совсем корректной. Для обеспечения высокой сохранности продукции необходимо рассмотреть возможность использования необработанного наружного воздуха с позиции теории потенциала влажности.

Расчет потенциалов влажности наружного воздуха проводился по среднесуточным значениям температуры  $t_n$ , °С, и относительной влажности  $\varphi_n$ , %, наружного воздуха для периода с 1997 по 2007 гг.

Используя рекомендуемые значения начальной температуры и относительной влажности подаваемого в насыпь воздуха и предложенные зависимости для определения потенциала влажности (формулы 2.23...2.26), определим оптимальные значения потенциалов влажности воздуха, поддерживаемые в хранилище (таблица 4.4).

Таблица 4.4 – Оптимальные параметры воздуха в хранилище

	Картофель	Корнеплоды	Капуста
Температура $t_k$ , °С	2	0,5...1,0	0
Влажность, $\varphi_k$ , %	90...95	90...95	95...97
Потенциал влажности, $\theta_k$ , °В	11,54	11,90	12,51

На основе полученных значений потенциала влажности наружного воздуха и оптимальных параметров воздуха в хранилище построен график, характеризующий потребность регулирования потенциала влажности подаваемого в хранилище воздуха (рисунок 4.4).

К 10 октября в климатических условиях г. Тольятти наблюдаются избыточные значения потенциала влажности в приточном воздухе:

- для капусты:  $\Delta\theta = \theta_a - \theta_6 = 13,80 - 12,51 = 1,29$  °В (ордината а–б);
- для корнеплодов:  $\Delta\theta = \theta_a - \theta_b = 13,80 - 11,90 = 1,90$  °В (ордината а–в);
- для картофеля:  $\Delta\theta = \theta_a - \theta_r = 13,80 - 11,54 = 2,26$  °В (ордината а–г).

К 15 октября устанавливаются близкие к оптимальным значения потенциала влажности подаваемого в хранилище воздуха (ординаты е–д, е–ж, е–и на рисунке 4.4)

Для г. Нижнего Новгорода близкие к оптимальным значения потенциала влажности наружного воздуха устанавливаются к 10 октября (ординаты к–г, к–в, к–б на рисунке 4.4).

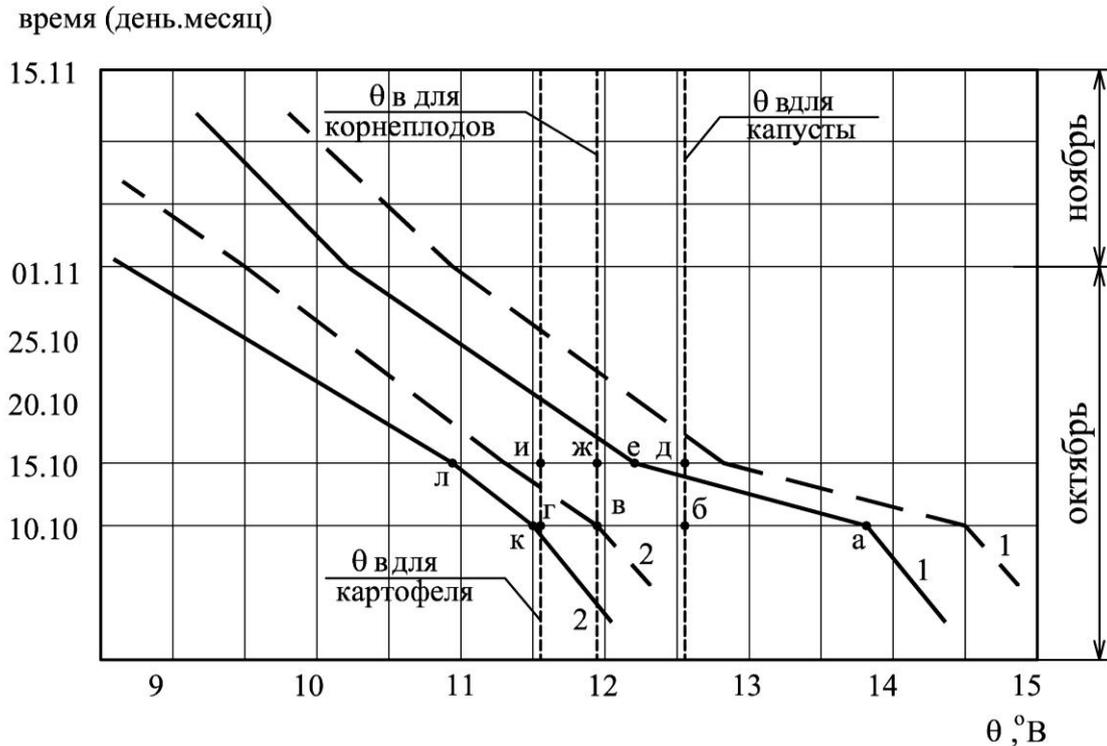


Рисунок 4.4 – Определение потребности в корректировке потенциала влажности подаваемого в хранилище СРС воздуха: - - - - линия среднемесячных потенциалов влажности наружного воздуха  $t_{\text{ср}}$ ; ——— линия потенциалов влажности подаваемого в хранилище воздуха  $t_{\text{в.о.}}$ ; 1 – г. Тольятти; г. 2 – Нижний Новгород

Дефицит потенциала влажности подаваемого в хранилище воздуха увеличивается к 15 октября и достигает:

- для капусты:  $\Delta\theta = \theta_{\text{л}} - \theta_{\text{д}} = 10,90 - 12,51 = -1,61 \text{ } ^\circ\text{В}$  (ордината л–д);
- для корнеплодов:  $\Delta\theta = \theta_{\text{л}} - \theta_{\text{ж}} = 10,90 - 11,90 = -1,00 \text{ } ^\circ\text{В}$  (ордината л–ж);
- для картофеля:  $\Delta\theta = \theta_{\text{л}} - \theta_{\text{и}} = 10,90 - 11,54 = 0,64 \text{ } ^\circ\text{В}$  (ордината л–и).

Таким образом, в климатических условиях Самарской области избыток потенциала влажности подаваемого в хранилище воздуха наблюдается до середины октября, что свидетельствует о необходимости осушения воздуха. Оптимальные значения потенциала влажности наружного воздуха находятся в период с 15 по 30 октября. С начала ноября наблюдается дефицит потенциала влажности подаваемого в хранилище воздуха - рекомендуется увлажнять подаваемый в хранилище воздух или применять рециркуляцию.

Обеспеченность параметров наружного воздуха для условий хранения составляет  $K_{об} = 0,45$ .

В климатических условиях Нижегородской области в начальный период хранения и до 15 октября значения потенциала влажности наружного воздуха находятся в оптимальном диапазоне, после 15 октября требуется обработка наружного воздуха перед подачей в хранилище. Использование необработанного наружного воздуха в системах вентиляции хранилищ сочного растительного сырья возможно с обеспеченностью  $K_{об} = 0,35$ .

Таким образом, учет не только температурных, но и влажностных характеристик наружного климата ограничивает возможность использования необработанного воздуха в системах обеспечения параметров микроклимата в хранилищах биологически активной продукции.

#### 4.2. Расчет потерь сочного растительного сырья на основе градиента потенциала влажности

Полученные в результате графо-аналитических исследований математические зависимости для определения значений потенциала влажности воздуха  $\theta$  и уточнение нанесения линий постоянных потенциалов влажности на  $I-d-\theta$ -диаграмму в области низких температур позволяют упростить инженерную методику расчета потерь СРС в процессе хранения и уточнить режимы работы систем активной вентиляции в отношении влажностного режима [А.7].

Согласно теории потенциала влажности, влагопоток  $W$ , г/ч, от насыпи СРС массой  $G_{\text{мат}}$ , т, к продуваемому воздуху (луч А–В, рисунок 4.5):

$$W = \alpha_{\theta} (\theta_B - \theta_A) G_{\text{мат}}, \quad (4.5)$$

где  $\theta_A$ ,  $\theta_C$  – начальный и конечный потенциал влажности воздуха в слое продукции, в процессе хранения, °В;  $\alpha_{\theta}$  – коэффициент влагопереноса, г/(т·ч·°В).

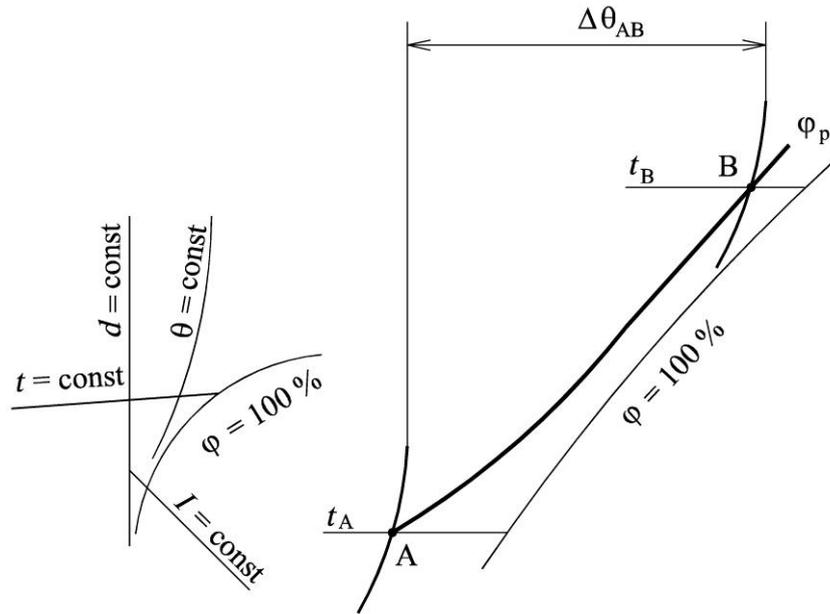


Рисунок 4.5 – К расчету коэффициента влагопереноса  $\alpha_\theta$

Потенциал влажности  $\theta_A$  на входе в слой сырья находится по параметрам подаваемого воздуха и может быть определен графически по  $I-d-\theta$ -диаграмме (рисунок 2.12).

Изменение тепловлажностной характеристики продуваемого воздуха на  $I-d-\theta$ -диаграмме показано на рисунке 4.5. Воздух, поступая в хранилище, увлажняется до равновесной влажности  $\varphi_p$  и одновременно нагревается до температуры нижней части основного слоя. Потенциал влажности воздуха на поверхности хранящейся растительной массы  $\theta_{\text{пов}}$  зависит от выделяемой в хранилищах влаги от дыхания. Воздух удаляется из насыпи с параметрами точки B ( $t_B, \varphi_B, \theta_B, d_B$ ).

Значения относительной влажности в насыпи в течение периода хранения носят постоянный характер  $\varphi = \varphi_p = \text{const}$ , в результате разность потенциалов влажности продукции и продуваемого воздуха  $\Delta\theta_{A-B}$  характеризуется только разностью температур продукции и продуваемого воздуха  $\Delta t$ .

Количество влаги, ассимилируемое продуваемым воздухом, рассчитывается по выражению:

$$W = G_B (d_B - d_A), \quad (4.6)$$

где  $G_B$  – расход продувочного воздуха, кг/ч, определяемый как

$$G_B = g_B G_{\text{мат}}, \quad (4.7)$$

где  $g_B$  – удельный расход воздуха, кг/(ч·т)

Преобразуем равнозначные зависимости 4.5 и 4.7 в следующий вид:

$$\alpha_\theta = \frac{g_B (d_B - d_A)}{\theta_B - \theta_A}. \quad (4.8)$$

Используя уточненную  $I-d-\theta$ -диаграмму и полученные ранее экспериментальные данные, представленные в научной литературе [51], получена графическая зависимость коэффициента массопереноса  $\alpha_\theta$  от температуры и удельного расхода воздуха (рисунок 4.6 ... 4.8) [А.1].

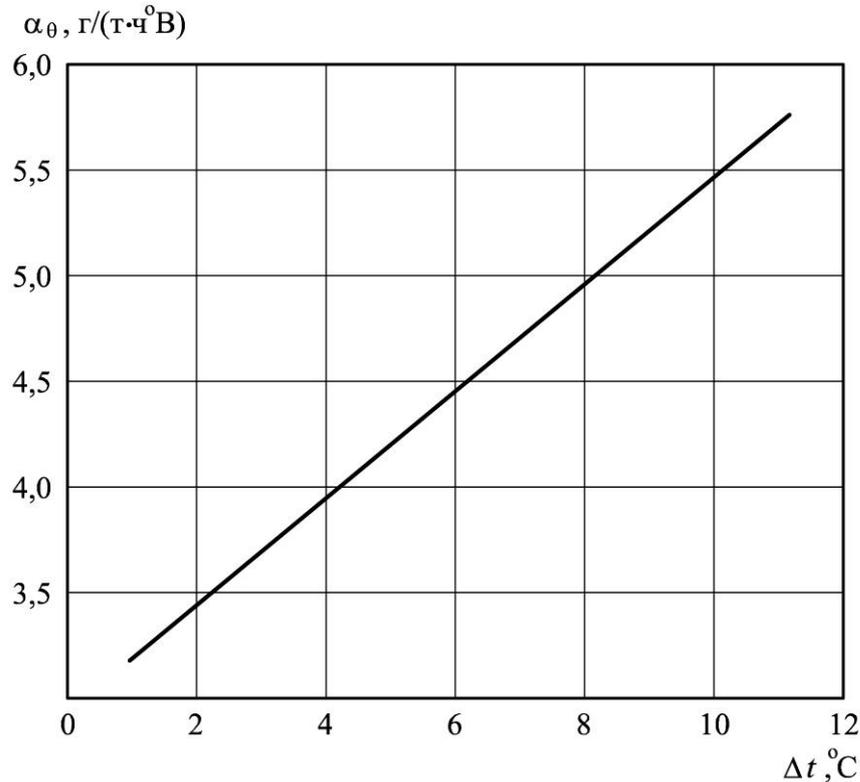
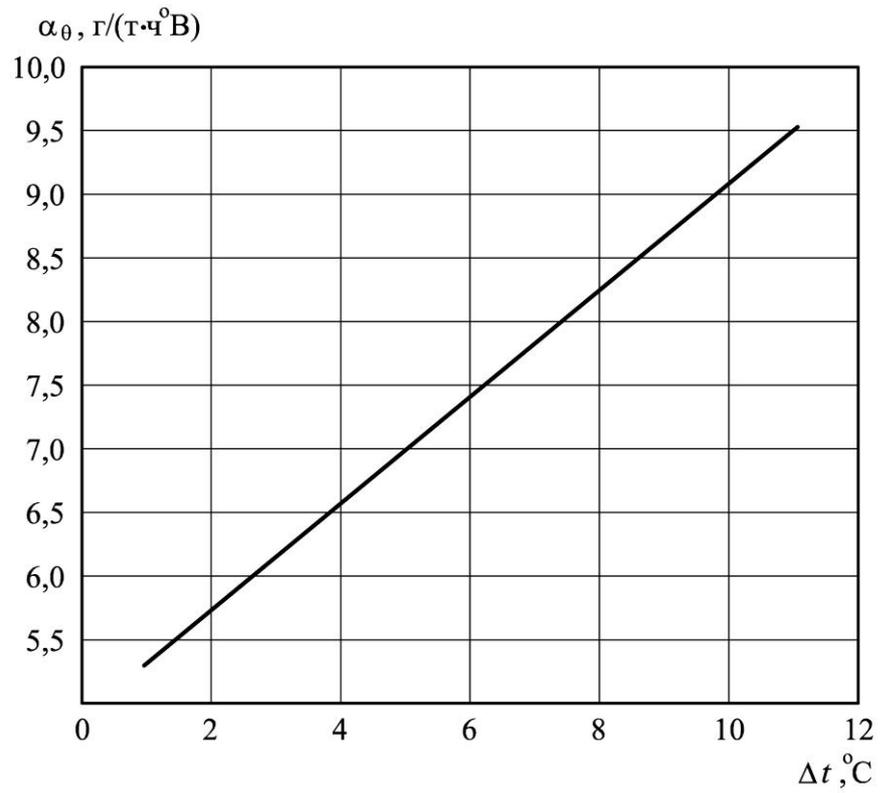
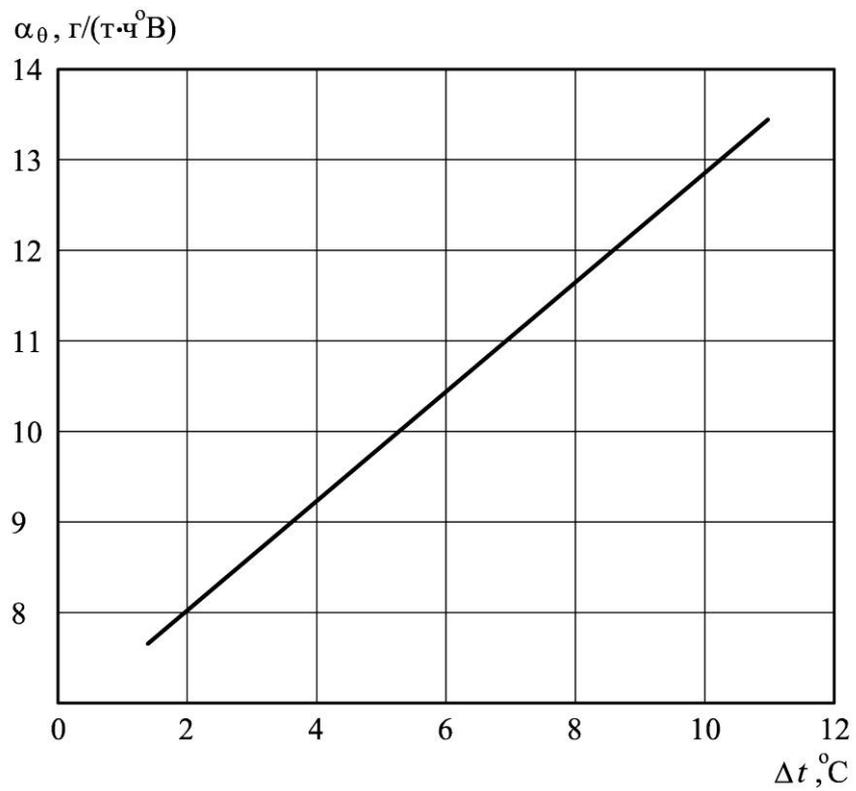


Рисунок 4.6 – Значения коэффициента  $\alpha_\theta$  в слое СРС при  $10 < g_B < 20$

Рисунок 4.7 – Значения коэффициента  $\alpha_\theta$  в слое СРС при  $20 < g_b < 30$ Рисунок 4.8 – Значения коэффициента  $\alpha_\theta$  в слое СРС при  $30 < g_b < 40$

В результате аппроксимации графиков получены следующие зависимости:

$$\begin{aligned}\alpha_{\theta} &= 0,25 \cdot \Delta t + 2,94, \text{ при } 10 < g_{\text{в}} < 20 \\ \alpha_{\theta} &= 0,42 \cdot \Delta t + 4,9, \text{ при } 20 < g_{\text{в}} < 30 \\ \alpha_{\theta} &= 0,59 \cdot \Delta t + 6,86, \text{ при } 30 < g_{\text{в}} < 40\end{aligned}\quad (4.9)$$

где  $\Delta t$  – температурный перепад уходящего и подающего воздуха, °С;  $g_{\text{в}}$  – удельный расход воздуха, кг/(ч·т).

Предложенный метод определения коэффициента влагопереноса  $\alpha_{\theta}$  позволяет производить расчет процесса влагообмена в системе «поверхность биологически активной продукции – продуваемый воздух» аналитически и графически с применением  $I-d-\theta$ -диаграммы, и позволяет определять количество влаги ассимилируемой продуваемым воздухом.

#### 4.3. Примеры расчета режимов работы систем обеспечения параметров микроклимата с помощью $I-d-\theta$ -диаграммы

Метод определения времени работы систем активной вентиляции, рассмотренный в главе 1, применяется при типовом и экспериментальном проектировании, при разработке проектов реконструкции овощекартофелехранилищ, а также для определения допустимых режимов эксплуатации в условиях действующих хранилищ. Приведенные зависимости (1.15...1.23) позволяют определить общее время работы вентиляции для снятия теплоизбытков.

Для обеспечения высокой сохранности продукции нахождение цикличности работы систем обеспечения микроклимата в течение суток должно быть связано с вопросами обеспечения влажностного режима насыпи. В процессе хранения пониженная влажность подаваемого воздуха увеличивает естественную убыль. Повышение влажности продувочного воздуха ведет к недостаточной ассимиляции влаги в период работы систем

вентиляции, приводит к накоплению влаги в продукции, способствует развитию фитопатогенных организмов, гниению, что приводит к дополнительным потерям при хранении.

Влага, постоянно накапливающаяся при хранении, должна быть ассимилирована во время работы вентиляции. В течение суток должно выполняться равенство:

$$W_H = W_B. \quad (4.10)$$

В тоже время при работе систем вентиляции из слоя сочного растительного сырья, согласно теории потенциала влажности, продуваемый воздух ассимилирует влагу, г, в количестве:

$$W_B = \alpha_\theta (\theta_y - \theta_{в.о.}) G_{\text{мат}} \tau_B, \quad (4.11)$$

где  $\theta_{в.о.}$  – начальный потенциал влажности подаваемого воздуха, °В;  $\theta_y$  – потенциал влажности удаляемого из хранилища воздуха, °В;  $\tau_B$  – время работы систем обеспечения микроклимата, ч.

Соблюдения равенство (4.10) при меняющихся значениях температуры и потенциала влажности продуваемого воздуха, тепло- и влаговыделений продукции, обеспечивает максимальную сохранность сырья, т.е. снижение потерь при хранении до биологически неизбежных.

Для достижения условий максимальной сохранности продукции при хранении, т.е. выполнение равенства (4.10), необходимо чтобы система обеспечения параметров микроклимата работала определенное время в течении суток [А.5], [А.6], [А.8]:

$$K_{в.вл}^\theta = \frac{W}{\alpha_\theta (\theta_y - \theta_{в.о.}) G_{\text{мат}}}. \quad (4.12)$$

$K_{в.вл}^\theta$  – коэффициент использования вентиляции, определяющий среднее время работы систем активной вентиляции в сутки в зависимости от влажностного режима насыпи.

В числителе показывается количество влаги, выделяемое в процессе дыхания при хранении и передаваемое окружающему влажному воздуху.

Знаменатель характеризует количество влаги, переданное продуваемому воздуху при работе системы обеспечения микроклимата.

Инженерная методика расчета времени работы системы вентиляции хранилища сочного растительного сырья на основе понятия потенциал влажности следующая:

1. По уточненной  $I-d-\theta$ -диаграмме (рисунок 2.12) или по аналитическим зависимостям (2.23...2.26) находим значения потенциалов влажности  $\theta_y$  и  $\theta_{в.о.}$  удаляемого и подаваемого в хранилище воздуха.

2. По величине удельного расхода подаваемого в хранилище воздуха  $g_v$  и температурного перепада уходящего и подаваемого воздуха  $\Delta t = t_{yx} - t_{в.о.}$  находим коэффициент влагопереноса  $\alpha_\theta$  (зависимость 4.9).

3. Определяем количество влаги, выделяемой продукцией  $W$ , г/ч.

4. По зависимости 4.12 рассчитываем коэффициент использования вентиляции  $K_{в.вл}^\theta$ .

5. На основании полученного коэффициента использования вентиляции производим корректировку времени работы системы вентиляции.

Ниже рассмотрен конкретный пример расчета режимов работы систем обеспечения параметров микроклимата с использованием результатов аналитических и натурных исследований, приведенных в главах 2 и 3.

Пример. Картофелехранилище емкостью  $G_p = 1000$  т, высота загрузки клубней 3 м., расход воздуха  $L_v = 60$  м<sup>3</sup>/(м<sup>3</sup>·ч).

В период охлаждения начальная разность температур насыпи и охлаждающего воздуха  $\Delta T_0 = 14$  °С; скорость охлаждения клубней  $\Delta z_{опт} = 0,04$  °С/ч; интенсивность явных тепловыделений  $q_{срс} = 100$  кДж/(м<sup>3</sup>ч).

Определим параметр охлаждения  $\eta_{эф} = 10^4 \cdot \frac{0,04}{100} = 4$  и приведенный расход

$$\text{воздуха } L_{эф} = \frac{60 \cdot 14}{100} = 8,4.$$

Диапазон оптимальных расходов воздуха определяется условием  $L_v \geq$

$$\frac{1}{14}(3,8 \cdot 100 + 1,1 \cdot 10^4 \cdot 0,04) = 58 \text{ м}^3/(\text{м}^3 \cdot \text{ч}).$$

Проверим ограничение верхнего предела  $L_v$  выражением  $L_v \text{ опт} < 717/h = 717/3 = 239 \text{ м}^3/(\text{м}^3 \cdot \text{ч})$ . Расход воздуха находится в допустимых пределах.

$$\text{Коэффициент использования вентиляции } K_v = 2 \frac{1 + 0,25 \cdot 4}{1 + 1,5 \cdot 8,4} = 0,3, \text{ т. е.}$$

САВ должна работать  $0,3 \cdot 24 = 8 \text{ ч}$  в сутки.

В основной период хранения  $\Delta T_0 = 2 \dots 2,5 \text{ }^\circ\text{C}$ ; средняя температура воздуха в хранилище  $t'_{\text{xp}} = 1 \text{ }^\circ\text{C}$ ;  $q_{\text{CPC}} = 43,5 \text{ кДж}/(\text{м}^3 \cdot \text{ч})$ . Расчетная величина  $K'_v$  за период в связи с отличием значения  $t'_{\text{xp}}$  от оптимального, равного  $t'_{\text{xp}} = 1,5 \text{ }^\circ\text{C}$ , имеет значение

$$K'_v = \frac{0,8 \cdot 43,5}{(4 - 1)60} - \frac{3,4(2 - 0,5 \cdot 1)}{60 \cdot 3} = 0,16, \text{ то есть время работы}$$

САВ составляет  $0,16 \cdot 24 \approx 3 \text{ ч } 50 \text{ мин.}$  в сутки.

При хранении температура уходящего воздуха достигала  $3^\circ\text{C}$  ( $t_{\text{yx}} = 3^\circ\text{C}$ ), с  $\varphi_p = 95 \%$ , приточный воздух подаваемый в насыпь был подготовлен в приточно-смесительной камере со следующими параметрами:  $t_{\text{в.о.}} = 1^\circ\text{C}$ ,  $\varphi_{\text{в.о.}} = 80 \%$ . По уточненной  $I-d-\theta$ -диаграмме (рисунок 2.12)  $\theta_y = 22^\circ\text{B}$ ,  $\theta_{\text{в.о.}} = 14^\circ\text{B}$ .

Определим коэффициент массопереноса по зависимости  $\alpha_\theta = 0,59 \cdot \Delta t + 6,86 = 0,59 \cdot 3 + 6,86 = 8,63 \text{ г}/(\text{г} \cdot \text{ч} \cdot \text{ }^\circ\text{B})$ .

Определим коэффициент работы САВ в зависимости от влажностного режима насыпи:

$$K_{\text{в.вл}}^\theta = \frac{W}{\alpha_\theta (\theta_y - \theta_{\text{в.о.}}) G_{\text{мат}}} = \frac{10 \cdot 1000}{8,63 \cdot (22 - 14) \cdot 1000} = 0,15$$

САВ должна работать  $0,15 \cdot 24 \approx 3 \text{ ч. } 30 \text{ мин.}$  в сутки.

Данного времени достаточно для ассимиляции всей накопленной влаги и снятия теплоизбытков.

Таким образом, применение методики расчета режимов работы САВ на основе понятия потенциал влажности позволяет сократить время работы

САВ, что приводит к снижению затрат на энергоресурсы расходуемые на поддержание оптимальных параметров микроклимата в хранилище и повышению сохранности хранящейся продукции.

Стоит отметить, что оптимизация режимов работы систем обеспечения микроклимата не всегда приводит к сокращению времени работы САВ. В зависимости от расхода и параметров продуваемого воздуха, а также температурно-влажностных параметров насыпи для обеспечения высокой сохранности продукции может потребовать увеличение коэффициента использования вентиляции. Однако, экономический эффект от повышения сохранности продукции несоизмеримо выше дополнительных эксплуатационных затрат на работу систем обеспечения микроклимата (см. п. 4.5).

#### 4.4. Коэффициент обеспеченности сохранности СРС

Повышение показателя энергоэффективности хранилищ биологически активной продукции и сохранность продукции зависит от степени совершенства систем подготовки воздуха и правильного определения времени работы систем обеспечения микроклимата. Время работы системы вентиляции должно быть минимальным и при этом достаточным для ассимиляции тепла и влаги, выделяющейся в процессе дыхания хранящейся продукцией. Экономическая эффективность процесса хранения продукции должна рассматриваться с учетом показателя сохранности продукции и энергоемкости систем микроклимата. Энергоемкость является показателем длительного действия и имеет тенденцию к увеличению [7, 24, 54, 71].

Сохранность биологически активной продукции наиболее полно характеризуется коэффициентом эффективности хранения [15]:

$$\eta_x = \eta_m \eta_k \eta_э , \quad (4.13)$$

где  $\eta_m$  – коэффициент эффективности микроклимата;  $\eta_k$  – коэффициент качества хранящегося сырья;  $\eta_э$  – коэффициент эффективности эксплуатации

системы вентиляции.

Коэффициент эффективности микроклимата  $\eta_m$  включает в себя коэффициент эффективности поддержания параметров микроклимата заложенный на этапе проектирования хранилища  $\eta_m^A$  и коэффициент эффективности работы системы вентиляции  $\eta_m^E$ .

Требуемый коэффициент качества хранящегося сырья не изменяется во время хранения, зависит только от качества исходной продукции и равен  $\eta_k = 0,92, 0,95, 0,97$  для картофеля, свеклы и капусты соответственно [15].

Коэффициент эффективности эксплуатации  $\eta_\varepsilon$  складывается из характера распределения приточного воздуха в хранилище и микроклимата хранилища меняющегося в зависимости от загрузки хранилища сырьем.

Коэффициент эффективности работы системы вентиляции хранилища  $\eta_m^E$  характеризуется следующей зависимостью:

$$\eta_m^E = \eta_m^o \eta_m^B \eta_m^\phi \eta_m^L . \quad (4.13)$$

Коэффициент сохранности хранящейся продукции  $\eta_m^o$  учитывает мощность воздушного отопления  $N$ , кВт, и массу хранящегося сырья  $G_p$ , т:

$$\eta_m^o = 1 - 2,05N / G_p . \quad (4.14)$$

Коэффициент  $\eta_m^B$  характеризует потери сырья, связанные с дополнительным нагревом подаваемого воздуха вентиляторами и равен  $\eta_m^B = 0,999, 0,9995$  для радиальных и центробежных вентустановок соответственно.

Отличие относительной влажности воздуха подаваемого в хранилище  $\phi_{в.о}$  от равновесной  $\phi_p$  учитывается коэффициентом сохранности сырья:

$$\eta_m^\phi = 1 - 10^{-3} (\phi_p - \phi_{в.о}) / 6 . \quad (4.15)$$

Коэффициент сохранности продукции учитывает оптимальность воздухообмена в хранилище:

$$\eta_m^L = 1 - 0,74 \cdot 10^{-2} n , \quad (4.16)$$

где  $n$  – коэффициент воздухообмена,  $n = L_{v,ооп} / L_v$ .

Коэффициент эксплуатации системы вентиляции при хранении рассчитывается по выражению:

$$\eta_9 = \eta_9^p \eta_9^3 \eta_9^y, \quad (4.17)$$

где  $\eta_9^p$  – коэффициент характеризующий равномерность подачи воздуха в хранилище;  $\eta_9^3$  – коэффициент зависящий от загрузки хранилища;  $\eta_9^y$  – коэффициент учитывающий равномерность реализации сырья.

Коэффициент неравномерности подачи воздуха в хранилище  $\eta_9^p$  учитывает увеличение времени работы системы вентиляции от  $\tau_{г.о}$  до  $\tau_г$  ( $\alpha = \tau_г / \tau_{г.о}$ ) для расчетной ассимиляции тепла и влаги:

$$\eta_9^p = 1 - (\alpha - 1)[(1 - \eta_M^L) + (1 - \eta_M^Ф)]. \quad (4.18)$$

Коэффициенты  $\eta_9^y$ ,  $\eta_9^3$  учитывают фактическое количество хранящейся продукции и рассчитываются включением коэффициента загрузки  $a = \frac{G_3}{G_p}$  в (4.18):

$$\eta_9^3 = 1 - 2,05N / aG_p. \quad (4.19)$$

Значения коэффициента эффективности хранения  $\eta_x$  в зависимости от коэффициента эффективности микроклимата  $\eta_m$ , коэффициента качества хранящегося сырья  $\eta_k$  с принятым коэффициентом эффективности эксплуатации системы вентиляции  $\eta_9 = 1$  и учетом обобщенных данных профессора Е.П. Широкова [97] представлены в таблице 4.4.

Таблица 4.4 – Значения коэффициента эффективности хранения  $\eta_x$  [97]

Характеристика способа хранения	$\eta_m$	$\eta_x$	
		$\eta_k = 1,0$	$\eta_k = 0,95$
Строгое обеспечение нормируемых параметров микроклимата	1,0	0,95	0,90

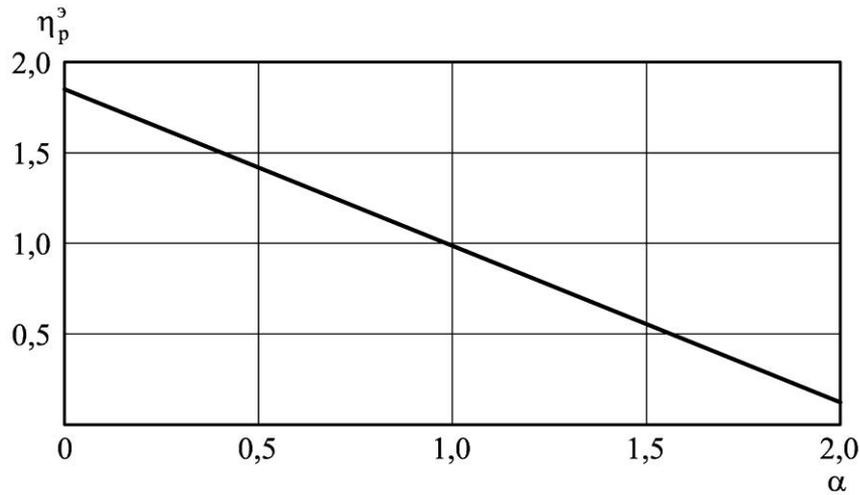
Холодильники с регулируемой газовой средой оборудованные механической системой вентиляции	0,98	0,93	0,88
Холодильники оборудованные механической системой вентиляции	0,95	0,90	0,86
Навалы, закромы и контейнерные хранилища оборудованные механической системой активной вентиляции	0,90	0,85	0,81
Бурт с механической системой активной вентиляции	0,85	0,81	0,77
Хранение в контейнерах с применением общеобменной механической вентиляции	0,80	0,76	0,72
Бурт с естественной вентиляцией	0,60	0,51	0,48

#### 4.5. Экономическая эффективность оптимизации режима работы систем обеспечения микроклимата хранилищ сочного растительного сырья

Расчет времени работы системы вентиляции с применением понятия потенциал влажности приводит к оптимальной производительности системы вентиляции и сокращению времени работы вентиляционных систем.

Изменение времени работы системы вентиляции влияет на  $\alpha' = \tau_{\Gamma}^{\theta} / \tau_{\Gamma,0}^t$ , ( $\alpha' = 0,16 / 0,15 = 0,93$ ). Уменьшение времени работы САВ при расчетах основанных на понятии потенциал влажности  $\tau_{\Gamma}^{\theta}$ , приводит к тому, что  $\alpha' \leq 1$ , при этом значение  $\eta_9^p \geq 1$ , рассчитываемое по зависимости  $\eta_9^p = 1 - (\alpha' - 1)[(1 - \eta_M^L) + (1 - \eta_M^{\phi})]$ , что в свою очередь приводит к повышению коэффициента эффективности хранения  $\eta_x = \eta_x^{\max} \eta_M \eta_K (\eta_9^p \eta_9^3 \eta_9^y)$ .

Изменение  $\eta_9^p \geq 1$ , ( $\eta_9^p = 1,06$  при  $\alpha = 0,93$ ) при прочих равных условиях ( $\eta_M^L, \eta_M^{\phi}$ ), показано на рисунке 4.9.

Рисунок 4.9 – Зависимость  $\eta_3^p$  от  $\alpha$ 

Экономическая эффективность за счет повышения коэффициента эффективности хранения  $\eta_x$  в процессе хранения составляет:

$$\Delta \mathcal{E}_x = C_3 \Delta \eta_x G_p, \quad (4.20)$$

где  $C_3$  – осредненная закупочная цена,  $C_3 = 10000$  р. (в ценах 2015 г.).

$$\Delta \mathcal{E}_x = C_3 \Delta \eta_x G_p = 10000 \cdot 0,06 \cdot 1000 = 600000 \text{ руб}/1000 \text{ т} = 600 \text{ р/т}$$

Удельные затраты необходимые для работы системы вентиляции  $C_v$ , руб/т, равны:

$$C_v = \mathcal{E}_t + \mathcal{E}_{эл} + B + P_t + P_k + Z, \quad (4.21)$$

где  $\mathcal{E}_t$  – удельные затраты на теплоту при нагреве воздуха;  $\mathcal{E}_{эл}$  – удельные затраты на электроэнергию привода вентиляторов и нагрев воздуха;  $B$  – удельные затраты на восстановление основных фондов;  $P_t$  – текущий ремонт;  $P_k$  – капитальный ремонт;  $Z$  – заработная плата.

Удельные затраты  $\mathcal{E}_t$ ,  $B$ ,  $P_t$ ,  $P_k$ ,  $Z$  считаем равными в рассматриваемых способах определения времени работы вентиляции.

Стоимость электроэнергии затраченной на привод вентустановок в течение года:

$$\mathcal{E}_{эл}^p = \Pi N_v \tau / G_p, \quad (4.22)$$

где  $\Pi$  – стоимость электроэнергии, руб./кВт·ч;  $\tau$  – общее время работы вентиляции в течение года, ч/год;  $N_B$  – мощность электродвигателя, кВт.

При незначительной экономии затрат на привод электродвигателей вентиляторов (по данным примера 1) и принятой установленной мощности электродвигателей вентиляторов 10 кВт ( $\Delta \mathcal{E}_{эл}^B = \frac{3 \cdot 10 \cdot 922}{1000} - \frac{3 \cdot 10 \cdot 864}{1000} = 1,74$  руб./т·год.), эффективность применения понятия потенциал влажности в расчетах при определении времени работы системы вентиляции составляет в среднем 600 руб./т·год, за счет повышения сохранности продукции (таблица 4.5).

Таблица 4.5 – Техничко-экономические показатели хранения СРС  
(в ценах 2015 г.)

Показатели	До оптимизации	После оптимизации
Продолжительность работы системы вентиляции $\tau$ , ч/год (8 месяцев хранения)	922	864
Потери продукции, % (по данным ООО Агрофирма «Белозерки»)	17	11
Затраты на привод вентилятора $\mathcal{E}_{эл.в.}$ , руб/(т·год)	27,66	25,92
Повышение коэффициента эффективности хранения $\Delta \eta_x$	-	0,06
Экономический эффект за счет повышения $\Delta \eta_x$ (8 месяцев хранения), $\Delta C_c$ , руб/т·год	-	600
Экономический эффект за счет экономии затрат на привод электродвигателей вентиляторов (8 месяцев хранения), $\Delta \mathcal{E}_{эл}^B$ , руб./т·год	-	1,74
Общий экономический эффект $\Delta C$ , руб./т от оптимизации времени работы системы вентиляции	-	601,74

Аналогичные результаты получены при практической апробации предложенной методике в Агрофирме «Белозерки» Ставропольского района Самарской области (приложение В).

Также, обоснованное снижение времени работы системы вентиляции снижает затраты энергоресурсов, необходимых для подготовки наружного воздуха в холодное время года, которые не учитывались при расчетах технико-экономических показателей хранения СРС с применением понятия потенциал влажности в расчетах.

## Выводы по главе 4

1. 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. Обеспеченность климатических условий при использовании наружного воздуха без дополнительной обработки в период охлаждения составила для Самарской области  $K_{об} = 0,45$ , для Нижегородской области –  $K_{об} = 0,35$ .
2. Предложены аналитические зависимости для определения значений коэффициента влагообмена  $\alpha_\theta$  при различных удельных расходах воздуха и перепадах температур в системе «сочное растительное сырье - продуваемый воздух».
3. Разработан метод расчета времени работы систем активной вентиляции основанный на понятии потенциал влажности с применением уточненной  $I-d-\theta$ -диаграммы.
4. Проведено сравнение технико-экономических показателей хранения сочного растительного сырья в зависимости от метода расчета времени работы систем обеспечения микроклимата. Экономическая эффективность от оптимизации режимов работы систем активной вентиляции в хранилище картофеля составила в среднем 600 руб/т·год.

## ВЫВОДЫ ПО ДИССЕРТАЦИИ

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 тепломассопереноса 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  $\theta$  от упругости водяного пара  $p_{\text{п}}$  в температурном диапазоне менее  $10\text{ }^{\circ}\text{C}$  и всем диапазоне значений относительной влажности.
3. Теоретически обосновано нанесение линий постоянных потенциалов на  $I-d-\theta$ -диаграмму в области температур менее  $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 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 натуральных условиях в картофелехранилище Агрофирмы «Белозерки» выразился в снижении убыли продукции и составил 600 000 руб. в ценах 2015 г.

## СПИСОК АВТОРСКИХ ПУБЛИКАЦИЙ

А.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.

А.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.

А.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.

А.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.

А.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.

А.6. 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.

А.7. 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.

А.8. 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.

А.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.

А.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.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алямовский, И.Г. Зависимость интенсивности дыхания и тепловыделений плодов и овощей от температуры / И.Г. Алямовский // Холодильная техника. –1967. –№6. – С. 41...42.
2. Алямовский, И.Г. Тепло- и массообмен при охлаждении и хранении пищевых про-дуктов : автореф. дис.... доктора техн. наук. – Л., 1974. – 33 с.
3. Ануфриев, Л.Н., Теплофизические расчеты сельскохозяйственных производственных зданий / Л.Н. Ануфриев, И.А. Кожин, Г.М. Позин .– М.: Стройиздат, 1974. – 216 с.
4. Ахназарова, С.Л. Методы оптимизации эксперимента в химической технологииб учеб. Пособие для хим.- технол. Спец. Вузов / С.Л. Ахназарова, В.В. Кафаров. – Изд. 2-е, перераб. и доп. – М.: Высш. шк., 1985. – 327 с.
5. Басин, Г.Л. Расчет воздухообменов и температурно-влажностных режимов карто- фелехранилищ / Г.Л. Басин // НИИСантехники. Отопление и вентиляция промышленных и сельскохозяйственных зданий .– 1965.–сб. №6. – С. 128...147.
6. Берман, Н.И. Тепломассоперенос в плотном продуваемом слое плодов и овощей/ Н.И. Берман, В.А. Календерьян // ИФЖ.- №2.- С.266-272.
7. Биохимическая термодинамика. - М.: Мир, 1982. - 440 с.
8. Богословский, В.Н., Абрамов, Б.В. К определению потенциала влажности наружного климата / В.Н. Богословский, Б.В. Абрамов // Сб. трудов МИСИ. - 1980. - вып. 176. – С. 33...41.
9. Богословский, В.Н. Применение потенциала влажности к расчету теплообмена между воздухом и жидкостью / В.Н. Богословский, А.Н. Гвоздков // Водоснабжение и санитарная техника. –1985. –№ 10. – С. 8...9.
10. Богословский, В.Н. О потенциале влажности / В.Н. Богословский // ИФЖ. – 1965. – т.8. – С.216-222
11. Богословский, В.Н. Строительная теплофизика / В.Н. Богословский. – М.: Высшая школа, 1982. – 415 с.

12. Богословский, В.Н. Тепловой режим зданий / В.Н. Богословский. – М.: Высшая школа, 1979. – 248 с.

13. Бодров, В.И. Нормирование сопротивления теплопередаче ограждающих конструкций овощекартофелехранилищ / В.И. Бодров, П.И. Зелинский // Водоснабжение и санитарная техника. – 1987. – №7. – С.19...20.

14. Бодров, В.И. Микроклимат зданий и сооружений / В.И. Бодров, М.В. Бодров, Н.А. Трофимов, Н.Н. Разумнов. – Н.Новгород: Арабеск, 2002. – 394 с.

15. Бодров, В.И. Микроклимат производственных сельскохозяйственных зданий и сооружений / В.И. Бодров, М.В. Бодров, Е.Г. Ионычев, М.Н. Кучеренко. – Н. Новгород; ННГАСУ, 2008. – 623 с.

16. Бодров, В.И. Обеспечение и оптимизация микроклимата хранения сочного растительного сырья и сушки травы: автореф. дис. ... доктора техн. наук : 05.23.03 : защищена 22.11.88 / Бодров Валерий Иосифович. – Москва, 1988. – 36 с.

17. Бодров, В.И. Температурный режим неотапливаемых подземных и обсыпных овощекартофелехранилищ / В.И. Бодров // Вентиляция и кондиционирование воздуха промышленных и сельскохозяйственных зданий. Межвуз. сб. науч. тр. – Рига, РПИ, 1981. – №13. – с. 44...53.

18. Бодров, В.И. Хранение картофеля и овощей: Инженерные методы создания и поддержания технологического микроклимата / В.И. Бодров. – Горький, Волго-Вятское книжное изд-во, 1985. – 220 с.

19. Бодров, М.В. Обеспечение продукто- и энергосберегающих параметров микроклимата овощекартофелехранилищ с использованием искусственного холода: автореф. дис. ... кандидата техн. наук : 05.23.03 : защищена 04.12.00 / Бодров Михаил Валерьевич. – Н.Новгород, 2000. – 26 с.

20. Бурцев, В.И. Исследование температурного распределения в насыпи продукции с учетом ее тепловыделений и реальной

теплопроводности / В.И. Бурцев, Г.М. Позин, И.С. Шуев // Труды Гипронисельпрома. – 1976. – №6. – С. 100...108.

21. Бурцев, С.И. Влажный воздух. Состав и свойства / С.И. Бурцев, Ю.Н. Цветков; Учеб. пособие. – СПб.: СПбГАХПТ, 1998. – 146 с.

22. Валов, В.М. Энергосберегающие животноводческие здания (физико-технические основы проектирования) / В.М. Валов. – М.: Изд-во АСВ, 1997. – 310 с.

23. Валушис, В.Ю. Основы высокотемпературной сушки кормов / В.Ю. Валушис. – М.: Колос, 1977. – 304 с.

24. Везиришвили, О.Ш. Экономия энергии в системах кондиционирования воздуха / О.Ш. Везиришвили // Водоснабжение и санитарная техника. – 1986. – №11. – С. 10...11.

25. Волкинд, И.Л. Гидравлическое сопротивление и распределение воздуха в сочной растительной продукции при активном вентилировании / И.Л. Волкинд // Труды Гипронисельпрома. – 1973, вып. V. – С. 192...201.

26. Волкинд, И.Л., Лобанова, А.С. Применение активной вентиляции при хранении картофеля и овощей / И.Л. Волкинд, А.С. Лобанова. – М.: 1971. – 56 с. – Обзор.

27. Волкинд, И.Л. О теории тепловлажностных процессов в камерах хранения холо-дильников / И.Л. Волкинд // Холодильная техника. – 1980. – №11. – С.41...42.

28. Волков, М.А. Тепло- массообменные процессы при хранении пищевых продуктов / М.А. Волков. – М.: Легкая и пищевая пром-сть, 1982. – 272 с.

29. Волосов, Ю.В. Удельный расход воздуха и потери веса картофеля при хранении в условиях активного вентилирования / Ю.В. Волосов // Хранение, переработка и торговля картофеля, овощей и плодов. – Киев, 1969. – С. 28...33.

30. Вышелесский, А.Н. Теплофизические характеристики картофеля и овощей / А.Н. Вышелесский, М.А. Громов // Консервная и овощесушильная промышленность. – 1963. – №11. – С. 25...29.

31. Гамаюнов, Н.И. Математическое моделирование процессов тепломассопереноса в капиллярно-пористых телах / Н.И. Гамаюнов // Тепломассообмен-VII. Проблемные доклады VII Всесоюзной конференции по тепломассообмену. – Минск, 1985. – С. 101...111.

32. Гвоздков, А.Н. Тепло- и влагообмен в системе «воздух-вода» с позиции теории потенциала влажности /А.Н. Гвоздков // Известия высших учебных заведений. Строительство. – 2015. – № 11-12 (683-684) . – С. 31...40.

33. Гинзбург, А.С. и др. Теплофизические характеристики пищевых продуктов и материалов. – М.: Пищевая промышленность, 1975. – 223 с.

34. Гирнык, Н.Л. Математическое описание тепло- и влагообменных процессов в овощехранилищах / Н.Л. Гирнык // Механизац. и электриф. соц. сельского хозяйства. – 1974. – №5. – С. 42...44.

35. Гусев, Н.А. Некоторые закономерности водного режима растений / Н.А. Гусев. – М.: Изд-во АН СССР, 1959. – 158 с.

36. Гухман, А.А., Волынец, А.З., Гаврилова Е.В., Ефременко Г.Н.- К теории психрометра / А.А. Гухман, А.З. Волынец, Е.В. Гаврилова, Г.Н. Ефременко // ИФЖ. – 1975. – т.28, №4. – с. 698...704.

37. Джоунс, М. Биохимическая термодинамика / М. Джоунс. – М.: Мир, 1982. – 440 с.

38. Дьяченко, В.С. Исследование и обоснование путей снижения потерь корнеплодов и лука при хранении : автореф. дис. ... докт. сельскохозяйств. наук. – М.: 1976. – 36 с.

39. Дячек, П.И. Исследование и разработка принципов вентиляции картофелехранилищ : автореф дис. ...кандид. техн. наук. – Минск, 1979. – 22 с.

40. Егизаров, А.Г. Общая теплотехника, теплоснабжение и вентиляция / А.Г. Егизаров. – М.: Стройиздат, 1982. – 216 с.

41. Егизаров, А.Г. Отопление и вентиляция зданий и сооружений сельскохозяйственных комплексов / А.Г. Егизаров. – М.: Стройиздат, 1981. – 239 с.
42. Егизаров, А.Г. Отопление и вентиляция сельскохозяйственных зданий / А.Г. Егизаров, О.Я. Кокорин, Ю.М. Прыгунов. – Киев: Будівельник, 1976. – 223 с.
43. Екимов, С.П. Методические указания по устройству и эксплуатации систем активной вентиляции экспериментального хранилища для картофеля на 10000 т / С.П. Екимов. – Орел, 1981. – 46 с.
44. Жадан, В.З. Влагообмен в плодоовощехранилищах / В.З. Жадан. – М.: Агропромиздат, 1985. – 197 с.
45. Жадан, В.З. Критерии климатического районирования страны в целях использования естественного холода в картофеле- и овощехранилищах / В.З. Жадан, Н.Н. Рослов, Л.В. Мартынова, С.И. Кулаков // Холодильная техника. – 1986. – № 6. – с. 10...13.
46. Жадан, В.З. Теоретические основы кондиционирования воздуха при хранении сочного растительного сырья / В.З. Жадан. – М.: Пищевая промышленность, 1972. – 238.
47. Жадан, В.З. Теплофизические основы хранения сочного растительного сырья на пищевых предприятиях / В.З. Жадан. – М.: Пищевая промышленность, 1976. – 238 с.
48. Жадан, В.З. Термодинамическая теория тепловлажностных процессов в камерах холодильников / В.З. Жадан // Холодильная техника. – 1979. – №6. – с. 35...37.
49. Иванцов, Г.П. Прогрев неподвижного слоя шаров потоком горячего газа / Г.П. Иванцов, Б.Я. Любов // Доклады АН СССР. –1952. –т. XXXVI, №2. – С. 83...93.
50. Какалашвили, А.Н. О термодинамической теории тепловлажностных процессов в камерах холодильников / А.Н. Какалашвили, И.Ш. Почхидзе // Холодильная техника. – 1980. – №12. – С. 44...46.

51. Калашников, М.П. Обеспечение параметров микроклимата для хранения картофеля и овощей в условиях резкоконтинентального климата / М.П. Калашников. – Улан - Удэ: ВСГТУ, 1999. – 235 с.
52. Калугина, Ю.П. Исследование динамики тепловлажностных процессов и автоматическое регулирование микроклимата картофелехранилищ : автореф. дис. ...канд. техн. наук. – М., 1967. – 21 с.
53. Карпис, Е.Е. Энергосбережение в системах кондиционирования воздуха / Е.Е. Карпис. – М.: Стройиздат, 1986. – 258 с.
54. Кокорин, О.Я. Отечественное оборудование для создания систем отопления и кондиционирования воздуха / О.Я. Кокорин. – М., 2002. – 96 с.
55. Колесник, А.А. Факторы длительного хранения плодов и овощей / А.А. Колесник. – М.: Госторгиздат, 1959. – 335 с.
56. Корниенко, С.В. / Новая шкала потенциала влажности для материалов наружных ограждений зданий / С.В. Корниенко // Строительные материалы. – 2005. – №9. – С. 74...77.
57. Креслинь, А.Я. Автоматическое регулирование систем кондиционирования воздуха / А.Я. Креслинь. – М.: Издательство литературы по строительству, 1972. – 98 с.
58. Креслинь, А.Я. Оптимизация энергопотребления системами кондиционирования воздуха / А.Я. Креслинь. – Рига: Изд. РПИ, 1982. – 154 с.
59. Кучеренко, М.Н. Термодинамическая трактовка графоаналитического решения задачи влагопереноса / М.Н. Кучеренко, В.И. Бодров, Л.М. Дыскин // Известия вузов. Серия «Строительство» . – Новосибирск, 2005. – №9. – С. 47...51
60. Кучеренко, М.Н. Термодинамическое обоснование потенциала влажности / М.Н. Кучеренко, В.И. Бодров, Л.М. Дыскин // Инженерные системы. АВОК – Северо-Запад. – №1.- 2006. – С.40...44
61. Кучеренко, М.Н. Использование потенциала влажности для расчета влагообмена в процессах сушки биологически активного сырья / М.Н. Кучеренко, В.И. Бодров, А.Н. Гвоздков // Качество внутреннего воздуха

и окружающей среды/ Материалы III Междунар. науч. конф./ Волгоград, 2004. – С.112...116

62. Луганский, В.И. Новые тенденции в проектировании и строительстве хранилищ картофеля и овощей / В.И. Луганский, И.Л. Волкинд. – М., 1983. – 72 с. – (Обзор ВНИИИС).

63. Лыков, А.В. Теория сушки / А.В. Лыков. – М.: Энергия, 1968. – 468с.

64. Лыков, А.В. Теория тепло- и массопереноса / А.В. Лыков, Ю.А. Михайлов. – М.-Л.: Госэнергоиздат, 1963. – 535 с.

65. Лыков, А.В. Явления переноса в капиллярно-пористых телах / А.В. Лыков. – М.: Гостехиздат, 1954. – с.201-203.

66. Максимов, Н.А. Краткий курс физиологии растений / Н.А. Максимов. – М.: Гос. изд-во сель-хоз. литературы, 1958. – 559 с.

67. Матросов, М.А. Здания с эффективным использованием энергии (Новые принципы нормирования) / М.А. Матросов, И.Н. Бутовский, М.М. Бродач // Журнал АВОК. – 1996. – № 3/4. – С. 3...6.

68. Метлицкий, Л.В. Биохимия плодов и овощей / Л.В. Метлицкий. – М.: Экономика, 1970. – 272 с.

69. Методические указания по проведению НИР по хранению овощей. – М.: ВАСХНИЛ, 1982. – 34 с.

70. Нестеренко, А.В. Основы термодинамических расчетов вентиляции и кондиционирования воздуха / А.В. Нестеренко.-М.: Высшая школа, 1968. – 394 с.

71. Нефелов, С.В. Техника автоматического регулирования в системах вентиляции и кондиционирования воздуха / С.В. Нефелов, В.С. Давыдов. – М.: Стройиздат, 1984. – 328 с.

72. НТП АПК 1.10.12.001-02 Нормы технологического проектирования предприятий по хранению и обработке картофеля и плодоовощной продукции : взамен ОНТП 6-88 : введ. 01.07.2002. - М.: ФГУП "Гипронисельпром", 2002. - 82 с

73. Опхюз, Б. Влияние интенсивности вентиляции на потери веса картофеля в венти-лируемых картофелехранилищах / Б. Опхюз // Сельское хозяйство за рубежом. – 1958. – №11. – С. 114...128.

74. Пирог, П.И. Теплоизоляция холодильников / П.И. Пирог. – М.: Пищевая промышленность, 1966. – 272 с.

75. Позин, Г.М. Основы расчета тепловоздушного режима промышленных и сель-скохозяйственных зданий / Г.М. Позин // Современные проблемы вентиляции и экологической безопасности промышленных и сельскохозяйственных зданий: Матер. науч.-техн. конф. – С.-Пб ДНТП. АВОК. – 1992. – С.41...51.

76. Позин, Г.М. Математическая модель тепловлажностных процессов в помещениях для хранения сельскохозяйственной продукции / Г.М. Позин, О.Б. Аюрова // Известия вузов. Строительство. – 1999. – №10. – С. 62...67.

77. Полегаев, П.И. Хранение картофеля и овощей / П.И Полегаев. – М.: Россельхозиздат, 1982. – 254 с.

78. Романовский, С.Г. Процессы термической обработки влажных материалов / С.Г. Романовский. – М.:Энергия, 1976. – 325 с.

79. Рослов, Н.Н. Новое в хранении картофеля и овощей / Н.Н. Рослов. – М.: 1979. – 95 с. – (Знание. Серия 9. Сельское хозяйство).

80. Рымкевич, А.А. О единстве метода оптимизации систем микроклимата для промышленных и сельскохозяйственных объектов / А.А. Рымкевич // Современные проблемы вентиляции и экологической безопасности пром. и сельхоз. зданий. – Санкт-Петербург, 1992. – С.20...22.

81. Рымкевич, А.А. Системный анализ оптимизации общеобменной вентиляции и кондиционирования воздуха / А.А. Рымкевич . – М.: Стройиздат, 1990. – 292 с.

82. СП 25.13330.2012 Основания и фундаменты на вечномерзлых грунтах. Актуализированная редакция СНиП 2.02.04-88 : взамен СНиП 2.02.04-88 : введ. 01.01.2013. - М.: ФАУ "ФЦС", 2012. - 123 с.

83. СП 105.13330.2012 Здания и помещения для хранения и переработки сельскохозяйственной продукции. Актуализированная редакция СНиП 2.10.02-84 : взамен СНиП 2.10.02-84 : введ. 01.01.2013. - М.: ФАУ "ФЦС", 2012. - 16 с.

84. СП 109.13330.2012 Холодильники. Актуализированная редакция СНиП 2.11.02-87 : взамен СНиП 2.11.02-87 : введ. 01.01.2013. - М.: ФАУ "ФЦС", 2012. - 32 с.

85. СП 50.13330.2012 Тепловая защита зданий. Актуализированная редакция СНиП 23-02-2003 : взамен СНиП 23-02-2003 : введ. 01.07.2013. - М.: ФАУ "ФЦС", 2012. - 100 с.

86. СП 131.13330.2012 Строительная климатология. Актуализированная редакция СНиП 23-01-99 : взамен СНиП 23-01-99 : введ. 01.01.2013. - М.: ФАУ "ФЦС", 2012. - 124 с.

87. СП 23-101-2004 Проектирование тепловой защиты зданий : взамен СП 23-101-2000 : введ. 01.06.2004. - М.: ФАУ "ФЦС", 2004. - 145 с.

88. Табунщиков, Ю.А. Математическое моделирование и оптимизация тепловой эффективности зданий / Ю.А. Табунщиков, М.М. Бродач. – М.: АВОК-ПРЕСС, 2002. – 194 с.

89. Табунщиков, Ю.А. Научные основы проектирования энергоэффективных зданий / Ю.А. Табунщиков, М.М. Бродач // Журнал АВОК. – 1998. – №1.

90. Харитонов, В.П. Адсорбция в кондиционировании на холодильниках для плодов и овощей (теория применения) / В.П. Харитонов. – М.: Пищевая промышленность, 1978. – 192 с.

91. Холмквист, А.А. Хранение картофеля и овощей /А.А. Холмквист . – Л.: Колос, 1972. – 280 с.

92. Цирулик, А.Я. Планирование эксперимента в электромашиностроении: учеб. Пособие / А.Я. Цирулик. – Куйбышев: КуАИ, 1983. – 43 с.

93. Чайковский, В.С. О тепловлажностных процессах в камерах холодильников / В.С. Чайковский, Е.Г. Кротов // Холодильная техника. – 1980. – №9. – С. 45.

94. Чижов, Г.Б. Метод расчета при охлаждении и замораживании пищевых продуктов в воздухе / Г.Б. Чижов // Холодильная техника. – 1979. – №9. – с.40...42.

95. Чижов, Г.Б. Теплофизические процессы в холодильной технологии пищевых продуктов / Г.Б. Чижов. – М.: Пищевая промышленность, 1979. – 271 с.

96. Чуклин, С.Г. Современные холодильники для хранения фруктов / С.Г. Чуклин, И.Г. Чумак, В.Ф. Файнзимберг. – Кишинев: Картя Молдаваняске, 1970. – 171 с.

97. Широков, Е.П. Биологические особенности кочанной капусты как основа разработки новой технологии ее хранения с применением активного вентилирования : автореф. дис. ...д-ра сельскохозяйственных наук. – М., 1971. – 39 с. – (ТСХА).

98. Широков, Е.П. Охлаждение капусты и картофеля при активном вентилировании / Е.П. Широков // Доклады ТСХА. – 1963. – вып. 93. – С. 217...221.

99. Широков, Е.П. Расчет теплобаланса буртов / Е.П. Широков // Доклады ТСХА. – Вып. 102. – 1965. – С. 421...425.

100. Широков, Е.П. Технология хранения и переработки плодов и овощей / Е.П. Широков. – М.: Колос, 1978. – 310 с.

101. Buting M. Design of Buildings for Crop Storage // Form Buildings and Engineering. 1984, vol. 1, № 1. - P. 9...16.

102. Gunzel W. Ergebnisse der Untersuchungen zur Beluftung ein- und zweikanaligen Grossmiten für Kartoffeln. // Agratechnik. 1980, Jg.30, H.80. – S. 351...354.

103. Higher heaps could cut potato storage costs. // Farmer & Stockbreeder. 1971, v. 85, № 42229. – P. 19.

104. Hylmo B., Johanssen A., Wikberg G. Potato storage in Sweden. //Research and Practice. ASAE and CSAE - paper, № 49-4038. - 1979.

105. Hunter J.H. A simulation model for potato storage ventilation // ASAE Technical paper №78-4061. – 29 p.

106. Hylmo B., et al. The heat balance in a potato pile. //Acta Agricultural Scandinavica.V. XXV, №2. , 1975– P. 81...87

107. Koppen D. Neue Ergebnisse bei der Einführung der zweikanaligen Grossmieten // Feldwirtschaft. 1981, Jg. 22, H.7. – P. 294...297.

108. Lerew L.E. Storage of potatoes a simulation model. – 1978. – 24 p. (Paper ASAE, №78-4059).

109. Levy F.L. A diagram for the transfer of heat and mass and its application to problems of refrigeration's.- Annexe 1970-1 an Bill. de Inst. Int. do Froid. London, 1970, p.271...286.

110. Levy F.L. Meat-towards better understanding of the mechanism of weight loss.- Annexe 1974-3 an Bill. de Inst. Int. do Froid. London, 1974, p.103...114.

111. Lindsay R.T. et al. Ventilation Rates for the Positive Ventilation of Vegetables in Bulk Bins // J. Agric. Eng. Res.,1983, №28. – P. 33...34.

112. Misener G.C., Shove G.C. Moisture Loss from Kennebec Potato Tubers During Initial Storage Period // Transaction of the ASAE, v. 19, №15, Sept. – Oct., 1976. – P. 967...969.

113. Misener G., Mac Donald M. Simulated moisture loss and cooling time for bulk potatoes // Canad. Agr. Eng., 1975, №17. – P. 72...74.

114. Neale M., Messer H. Resistance of root and bulb vegetables to airflow. // Journal agr. eng. Res. 1976, 21.3. – P. 221...231.

115. Neale M. The design of vegetable stores. // Farm Buildings Digest. 12, 3, Autumn, 1977.

116. Pratt P., Buelow F. Behavior of potatoes under various storage conditions. // Am. Soc. Agric. Eng. 1978, 78-4058.

117. Sparcs W.C. Modern storage methods reduce losses. // American Vegetable Grower. 1971, v.18, № 10. -P. 32...35.

118. Statham O. Ventilation distribution systems for balk and box potato stores. // Farm Buildings Digest. 1978, v. 13. – P. 5...8.

119. Van Ouwerkerk E.N. Bewaarpaatsisolate. – Landbouw mechanisate. 1978, v. 29, № 7. – P. 795...796.

**ПРИЛОЖЕНИЯ**

**Приложение А**  
**Результаты экспериментальных исследований**

Ряд №1. Дата замера 02.11.2013 г.

Номер точки	t	φ	θ	Номер точки	t	φ	θ	Номер точки	t	φ	θ	Номер точки	t	φ	θ	Номер точки	t	φ	θ	Номер точки	t	φ	θ
1	4.1	83	16.2	4	4.9	86	18.1	7	5.1	92	21.5	10	5.3	83	17.2	13	4.7	85	17.5	16	3.9	89	18.8
2	3.8	85	16.9	5	4.7	87	18.4	8	5.2	86	18.4	11	5.1	83	17.0	14	4.8	87	18.5	17	4.1	85	17.1
3	3.6	77	13.8	6	4.3	87	18.1	9	4.7	85	17.5	12	4.8	85	17.6	15	4.1	76	13.7	18	3.6	83	15.9

Ряд №2. Дата замера 02.11.2013 г.

Номер точки	t	φ	θ	Номер точки	t	φ	θ	Номер точки	t	φ	θ	Номер точки	t	φ	θ	Номер точки	t	φ	θ	Номер точки	t	φ	θ
19	4.3	81	15.6	22	5.2	90	20.4	25	4.9	92	21.2	28	5.1	88	19.3	31	4.7	89	19.4	34	3.9	90	19.3
20	4.1	79	14.7	23	5.3	87	19.0	26	4.7	87	18.4	29	4.8	87	18.5	32	4.5	87	18.3	35	3.8	88	18.2
21	4.5	81	15.7	24	4.8	80	15.5	27	4.6	86	17.9	30	4.7	85	17.5	33	4.6	78	14.7	36	3.5	83	15.9

Ряд №1. Дата замера 16.11.2013 г.

Номер точки	t	φ	θ	Номер точки	t	φ	θ	Номер точки	t	φ	θ	Номер точки	t	φ	θ	Номер точки	t	φ	θ	Номер точки	t	φ	θ
1	4.2	85	17.1	4	4.9	92	21.2	7	5.1	92	21.5	10	5.1	93	22.1	13	5.2	87	18.9	16	4.1	88	18.4
2	3.9	83	16.1	5	4.6	89	19.3	8	5.2	90	20.4	11	5.1	90	20.3	14	5.1	86	18.3	17	3.7	82	15.6
3	3.7	79	14.5	6	4.6	87	18.3	9	4.8	86	18.0	12	4.8	88	19.0	15	4.7	85	17.5	18	3.9	77	13.9

Ряд №2. Дата замера 16.11.2013 г.

Номер точки	t	φ	θ	Номер точки	t	φ	θ	Номер точки	t	φ	θ	Номер точки	t	φ	θ	Номер точки	t	φ	θ	Номер точки	t	φ	θ
19	4.1	86	17.5	22	5.2	87	18.9	25	5.5	90	20.8	28	5.3	92	21.7	31	5.2	92	21.6	34	3.9	85	16.9
20	4.1	85	17.1	23	5.1	83	17.0	26	5.2	90	20.4	29	5.1	90	20.3	32	5.1	88	19.3	35	4.1	86	17.5
21	3.9	85	16.9	24	5	85	17.8	27	4.7	87	18.4	30	5.1	83	17.0	33	4.7	86	18.0	36	3.7	79	14.5

Ряд №1. Дата замера 01.12.2013 г.

Номер точки	t	φ	θ	Номер точки	t	φ	θ	Номер точки	t	φ	θ	Номер точки	t	φ	θ	Номер точки	t	φ	θ	Номер точки	t	φ	θ
1	3.9	85	16.9	4	4.9	90	20.1	7	5	90	20.2	10	5	91	20.8	13	5.1	91	20.9	16	4.2	82	15.9
2	3.7	81	15.2	5	4.7	88	18.9	8	4.8	91	20.6	11	4.8	90	20.0	14	4.9	90	20.1	17	3.8	84	16.4
3	3.8	82	15.6	6	4.6	83	16.6	9	4.7	85	17.5	12	4.7	86	18.0	15	4.9	86	18.1	18	3.6	79	14.4

Ряд №2. Дата замера 01.12.2013 г.

Номер точки	t	φ	θ	Номер точки	t	φ	θ	Номер точки	t	φ	θ	Номер точки	t	φ	θ	Номер точки	t	φ	θ	Номер точки	t	φ	θ
19	4	84	16.6	22	5	92	21.4	25	5.1	93	22.1	28	5.1	92	21.5	31	5.2	92	21.6	34	4	85	17.0
20	4.1	80	15.1	23	4.9	93	21.9	26	5	90	20.2	29	5.1	91	20.9	32	4.8	90	20.0	35	3.9	84	16.5
21	3.6	77	13.8	24	4.8	83	16.7	27	4.3	91	20.1	30	4.6	88	18.8	33	4.6	86	17.9	36	3.8	78	14.2

Ряд №1. Дата замера 14.12.2013 г.

Номер точки	t	φ	θ	Номер точки	t	φ	θ	Номер точки	t	φ	θ	Номер точки	t	φ	θ	Номер точки	t	φ	θ	Номер точки	t	φ	θ
1	4.2	91	20.0	4	4.8	89	19.5	7	5	92	21.4	10	5.2	92	21.6	13	5.1	92	21.5	16	3.6	94	21.3
2	3.8	85	16.9	5	4.2	85	17.1	8	5	90	20.2	11	5.5	87	19.2	14	5.1	93	22.1	17	3.8	90	19.2
3	3.9	77	13.9	6	4.4	89	19.1	9	4.9	82	16.4	12	4.7	86	18.0	15	4.8	86	18.0	18	3.9	83	16.1

Ряд №2. Дата замера 14.12.2013 г.

Номер точки	t	φ	θ	Номер точки	t	φ	θ	Номер точки	t	φ	θ	Номер точки	t	φ	θ	Номер точки	t	φ	θ	Номер точки	t	φ	θ
19	4	82	15.8	22	5.1	95	23.4	25	5.2	91	21.0	28	5.3	92	21.7	31	5.2	92	21.6	34	3.9	89	18.8
20	3.9	83	16.1	23	5	93	22.0	26	4.9	89	19.6	29	5.1	91	20.9	32	4.9	92	21.2	35	3.6	86	17.2
21	3.9	78	14.2	24	4.6	90	19.8	27	4.6	88	18.8	30	5	90	20.2	33	4.7	89	19.4	36	3.5	83	15.9

Ряд №1. Дата замера 11.01.2014 г.

Номер точки	t	φ	θ	Номер точки	t	φ	θ	Номер точки	t	φ	θ	Номер точки	t	φ	θ	Номер точки	t	φ	θ	Номер точки	t	φ	θ
1	4.4	81	15.6	4	4.9	93	21.9	7	4.8	92	21.1	10	5.1	92	21.5	13	4.6	92	20.9	16	3.9	83	16.1
2	4.1	83	16.2	5	4.8	91	20.6	8	4.7	90	19.9	11	4.9	91	20.7	14	4.6	87	18.3	17	4.1	84	16.6
3	3.8	78	14.2	6	4.7	88	18.9	9	4.2	92	20.6	12	4.9	86	18.1	15	4.5	88	18.7	18	4.1	82	15.8

Ряд №2. Дата замера 11.01.2014 г.

Номер точки	t	φ	θ	Номер точки	t	φ	θ	Номер точки	t	φ	θ	Номер точки	t	φ	θ	Номер точки	t	φ	θ	Номер точки	t	φ	θ
19	3.9	88	18.3	22	5.1	89	19.8	25	5.2	90	20.4	28	5.1	92	21.5	31	5	91	20.8	34	3.8	89	18.7
20	3.9	86	17.4	23	5.1	87	18.8	26	4.8	88	19.0	29	5.2	92	21.6	32	4.8	91	20.6	35	3.6	87	17.6
21	3.6	79	14.4	24	5	86	18.2	27	4.6	85	17.4	30	4.6	86	17.9	33	4.6	89	19.3	36	3.5	81	15.1

Ряд №1. Дата замера 25.01.2014 г.

Номер точки	t	φ	θ	Номер точки	t	φ	θ	Номер точки	t	φ	θ	Номер точки	t	φ	θ	Номер точки	t	φ	θ	Номер точки	t	φ	θ
1	4.3	92	20.7	4	4.5	89	19.2	7	5	91	20.8	10	5.1	92	21.5	13	5.2	90	20.4	16	4.6	89	19.3
2	4.1	87	17.9	5	4.4	88	18.6	8	4.7	90	19.9	11	4.7	91	20.5	14	4.3	92	20.7	17	4.4	86	17.7
3	3.9	78	14.2	6	4.3	87	18.1	9	4.5	86	17.8	12	4.2	86	17.6	15	4.4	87	18.2	18	4	79	14.7

Ряд №2. Дата замера 25.01.2014 г.

Номер точки	t	φ	θ	Номер точки	t	φ	θ	Номер точки	t	φ	θ	Номер точки	t	φ	θ	Номер точки	t	φ	θ	Номер точки	t	φ	θ
19	4.1	90	19.4	22	4.6	92	20.9	25	5	92	21.4	28	5.3	92	21.7	31	5	93	22.0	34	4.4	91	20.2
20	3.8	87	17.7	23	4.7	91	20.5	26	4.8	91	20.6	29	4.8	90	20.0	32	4.9	91	20.7	35	4.2	77	14.1
21	3.8	77	13.9	24	4.3	89	19.1	27	4.5	88	18.7	30	4.6	89	19.3	33	4.6	90	19.8	36	4.3	78	14.5

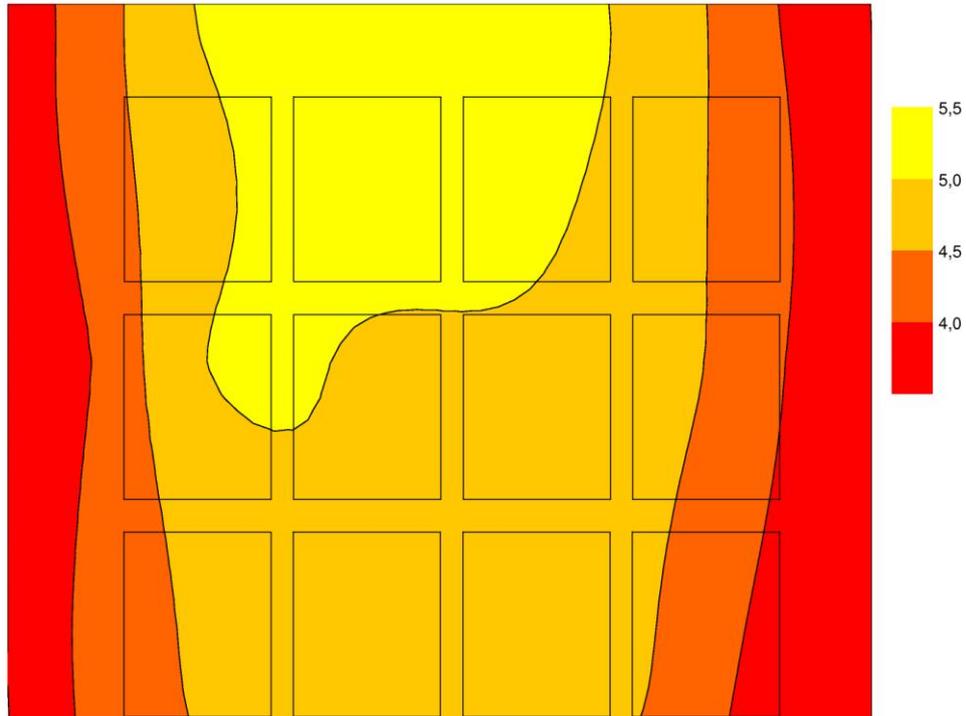
**Приложение Б****Поля температуры и относительной влажности по высоте хранилища**

Рисунок Б.1 – Поле температуры в хранилище 02.11.2013 г.

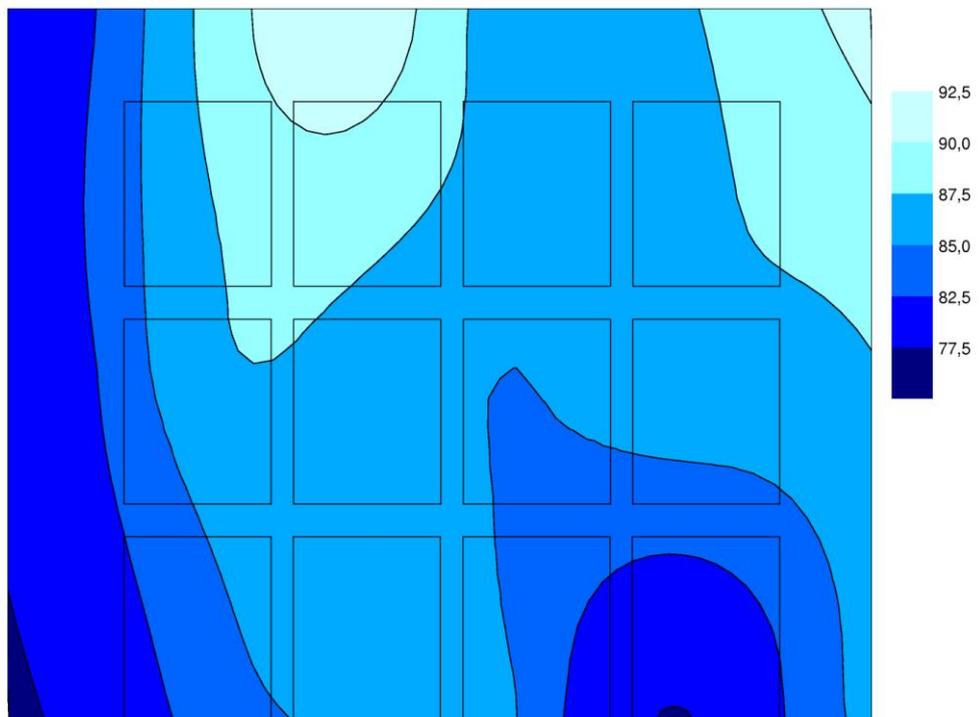


Рисунок Б.2 – Поле относительной влажности в хранилище 02.11.2013 г.

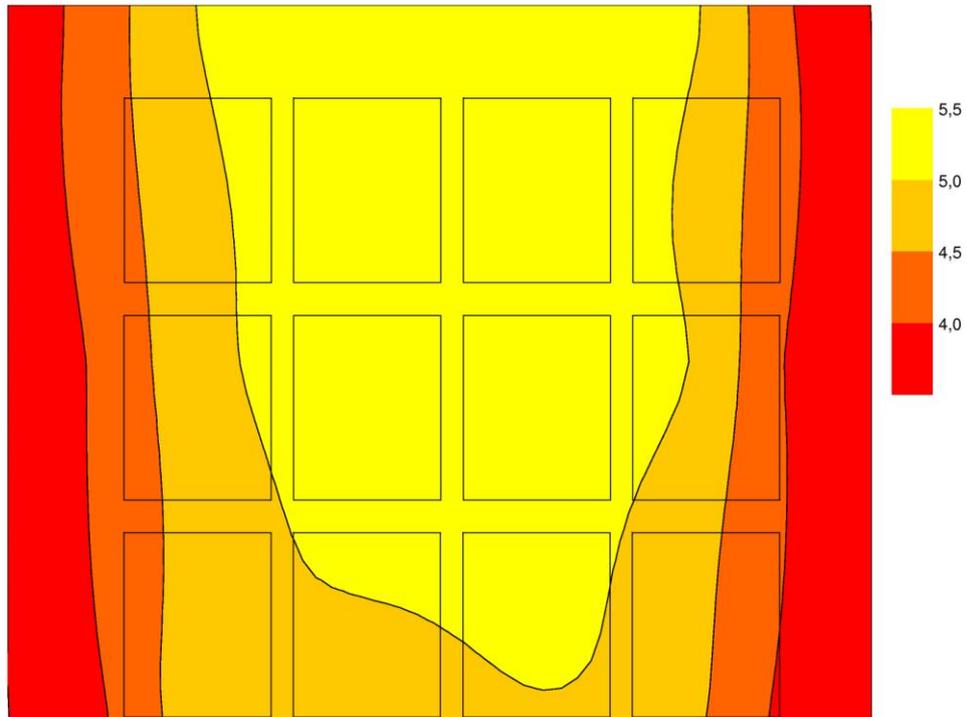


Рисунок Б.3 – Поле температуры в хранилище 16.11.2013 г.

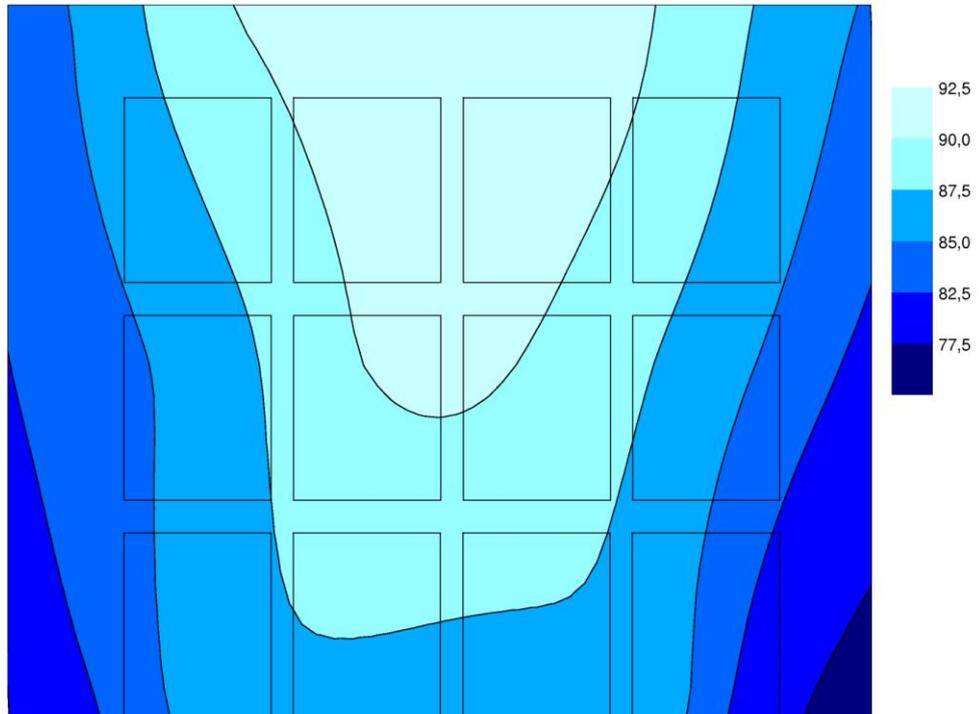


Рисунок Б.4 – Поле относительной влажности в хранилище 16.11.2013 г.

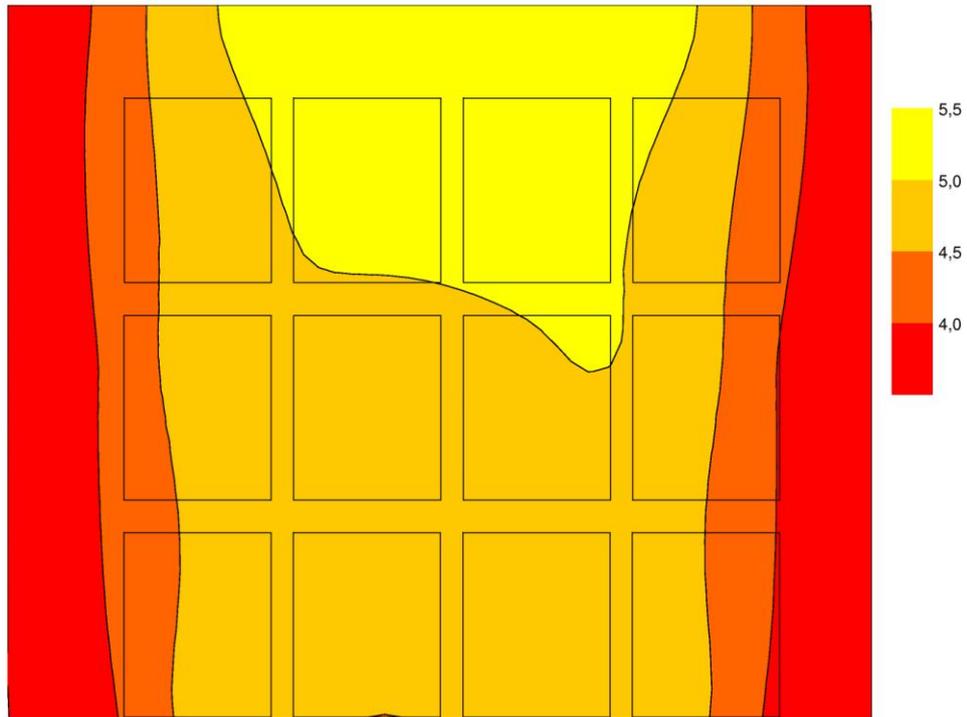


Рисунок Б.5 – Поле температуры в хранилище 01.12.2013 г.

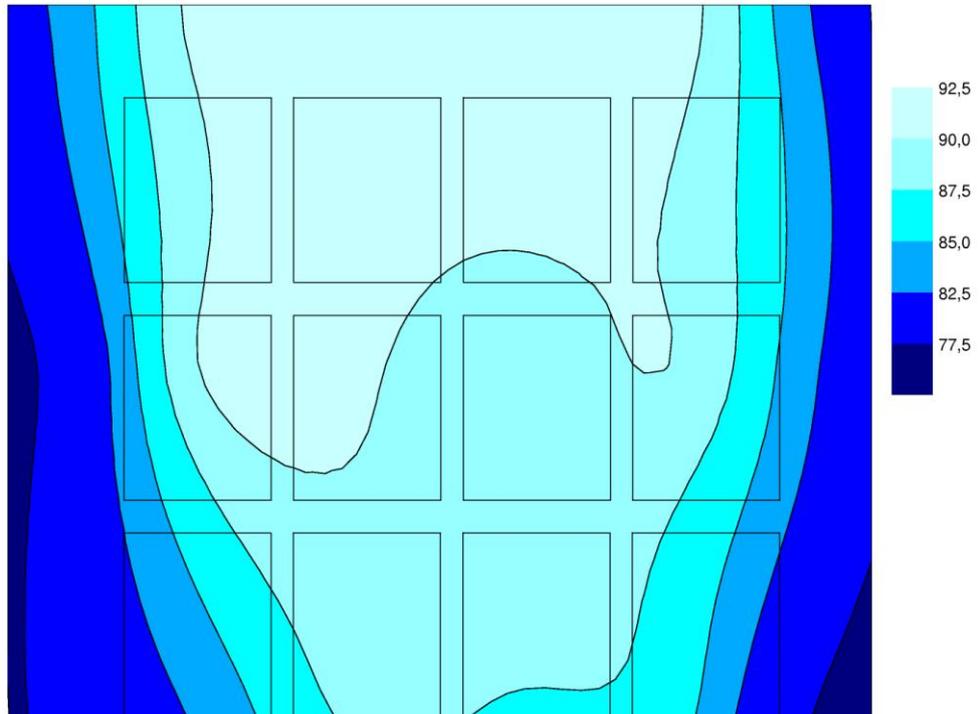


Рисунок Б.6 – Поле относительной влажности в хранилище 01.12.2013 г.

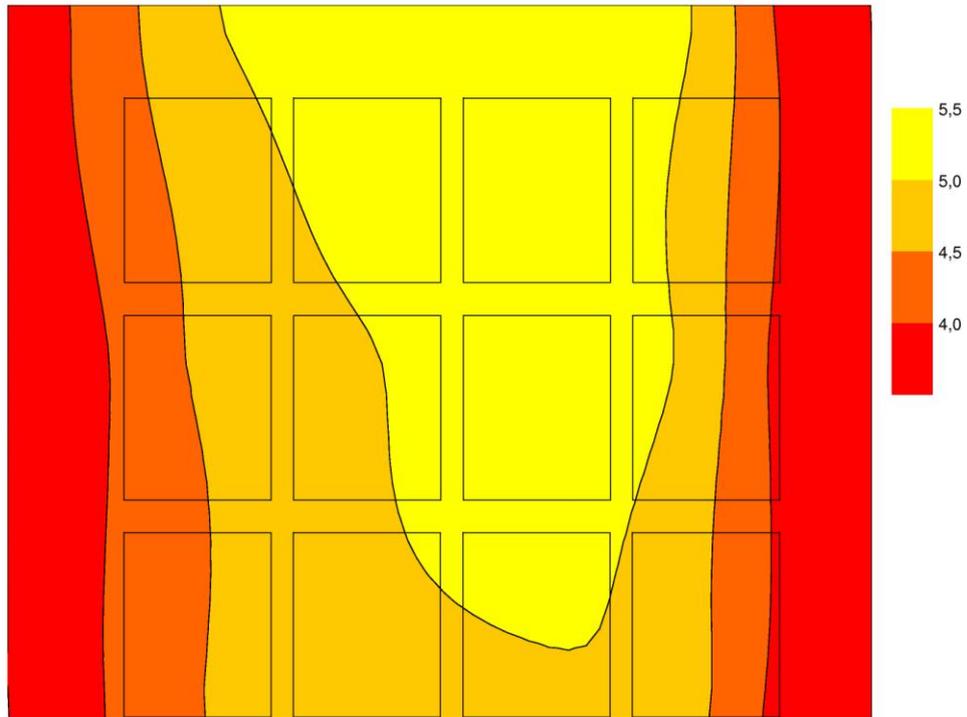


Рисунок Б.7 – Поле температуры в хранилище 14.12.2013 г.

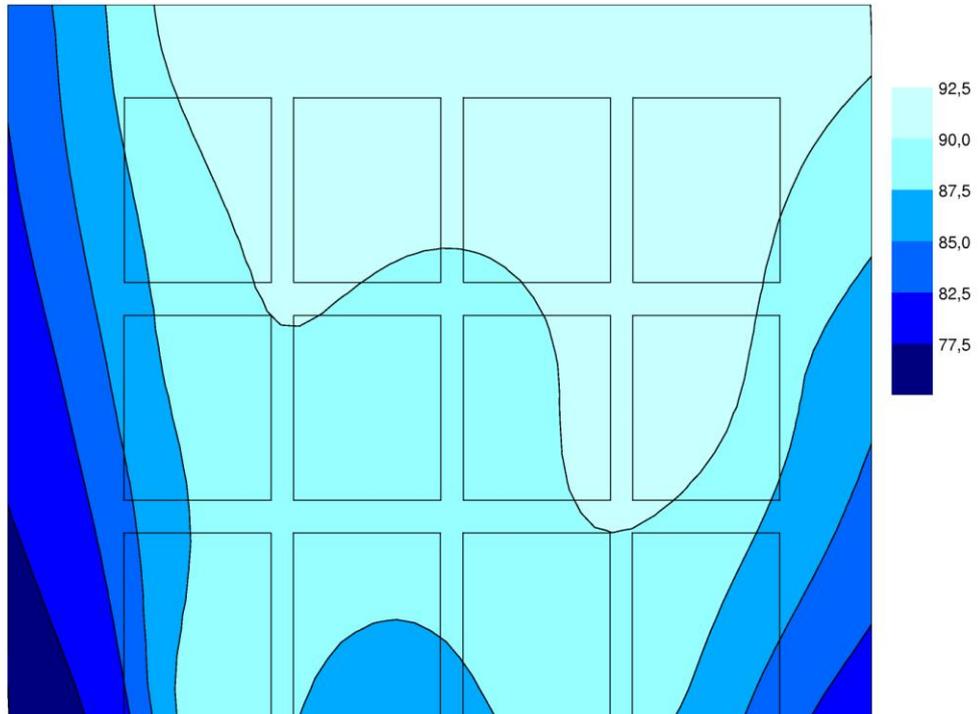


Рисунок Б.8 – Поле относительной влажности в хранилище 14.12.2013 г.

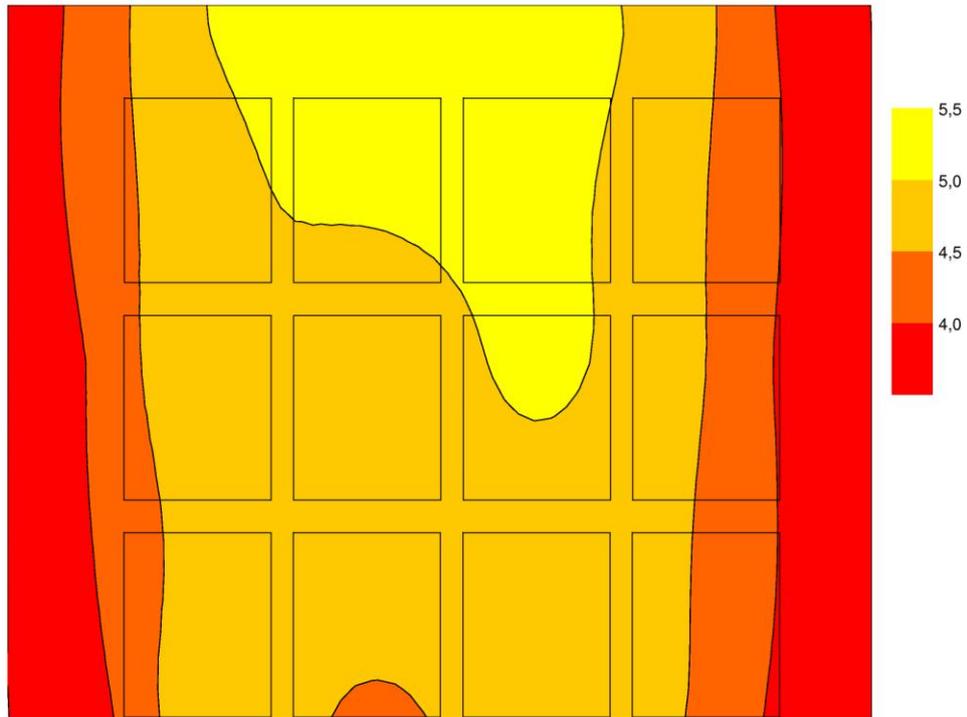


Рисунок Б.9 – Поле температуры в хранилище 11.01.2014 г.

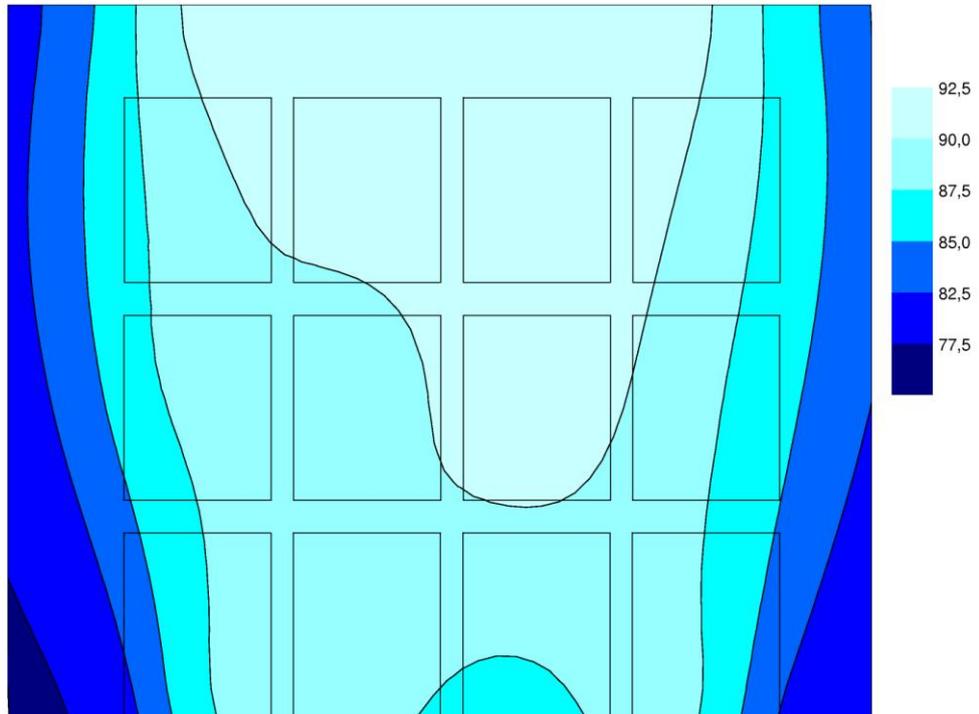


Рисунок Б.10 – Поле относительной влажности в хранилище 11.01.2014 г.

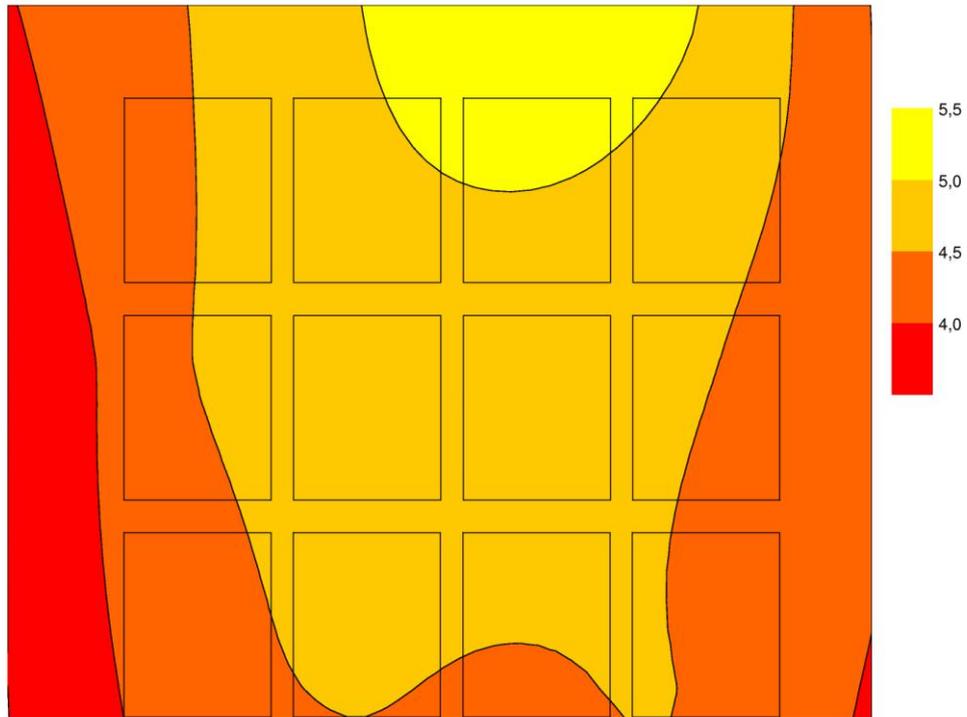


Рисунок Б.11 – Поле температуры в хранилище 25.01.2014 г.

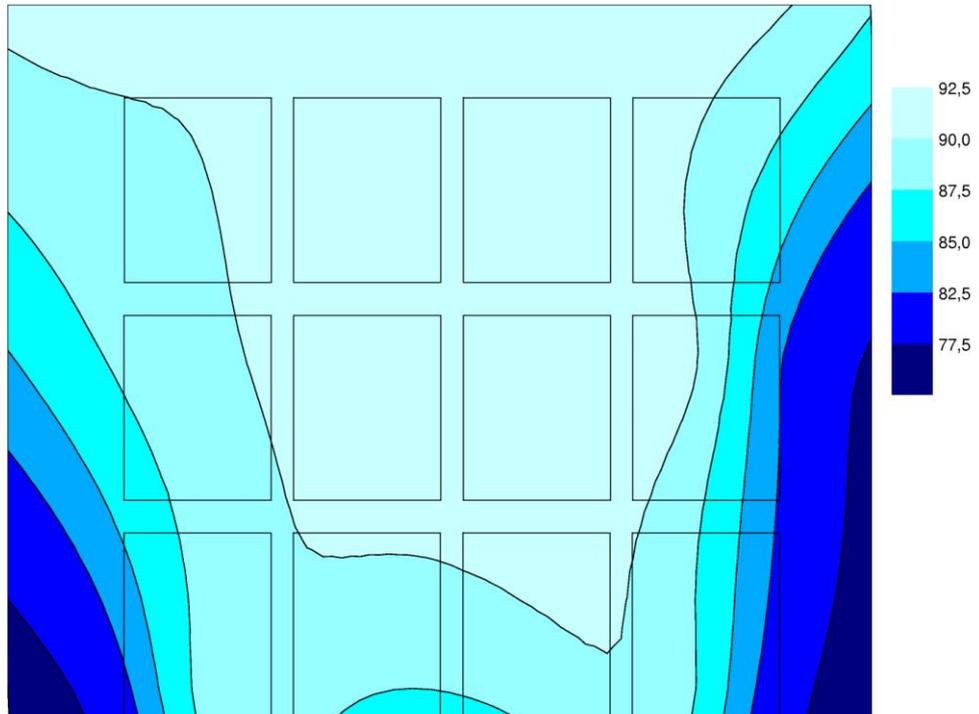


Рисунок Б.12 – Поле относительной влажности в хранилище 25.01.2014 г.

## **Приложение В**

### **Внедрение результатов диссертационной работы**



УТВЕРЖДАЮ  
Проректор по научно-  
инновационной деятельности  
Тольяттинского  
государственного  
университета  
С.Х. Петерайтис  
"\_\_\_\_\_"  
2016 г.

## АКТ о внедрении результатов научно-исследовательской (опытно-конструкторской) работы

Комиссия в составе:

Председатель заместитель ректора-директор института, к.п.н., Н.И. Устенков,

члены комиссии: зам. директора по учебной работе Е.Б. Гришина,

зам.директора по научно-исследовательской работе Р.В. Охлопков,

составила настоящий акт о том, что результаты, полученные аспирантом кафедры «Теплогасоснабжение, вентиляция, водоснабжение и водоотведение» **Кузнецовым Евгением Петровичем** по ведущейся научно-исследовательской теме: «Термодинамическое обоснование режимов работы систем обеспечения микроклимата хранилищ сочного растительного сырья» (научный руководитель к.т.н., доцент М.Н. Кучеренко) использованы в учебном процессе кафедры «Теплогасоснабжение, вентиляция, водоснабжение и водоотведение». За основу приняты изданные научные статьи соискателя.

Разработка используется в курсовом и дипломном проектировании, в курсе лекций по дисциплинам «Вентиляция промышленных зданий», «Энергетическая оценка объектов теплогасоснабжение и вентиляция», в процессе выполнения выпускных квалификационных работ бакалавров по направлению 08.03.01 Строительство (профиль «Теплогасоснабжение и вентиляция» и позволяет повысить качество подготовки специалистов по вопросам проектирования энергоэффективных производственных сельскохозяйственных зданий, что достигается в результате включения в лекционный и практический курс нового методологического подхода к расчету режимов работы и тепломассообменных характеристик систем обеспечения параметров микроклимата в хранилищах сочного растительного сырья, в том числе при использовании естественных и искусственных источников энергии.

Председатель комиссии:

\_\_\_\_\_ Н.И. Устенков

Члены комиссии:

\_\_\_\_\_ Е.Б. Гришина

\_\_\_\_\_ Р.В. Охлопков

