

423 Проф. Гайдовскому В.Ф.
ОДЕССКИЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ
ХОЛОДИЛЬНОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

НА ПРАВАХ РУКОПИСИ

Аспирант ИВАХНОВ Валерий Иванович

**ИССЛЕДОВАНИЕ
ГРАВИТАЦИОННОЙ
ОХЛАЖДАЮЩЕЙ СИСТЕМЫ**

Специальность 05.04.03—Гидравлические машины,
машины и аппараты холодильной и криогенной техники

**АВТОРЕФЕРАТ
ДИССЕРТАЦИИ НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ
КАНДИДАТА ТЕХНИЧЕСКИХ НАУК**

ОДЕССА — 1974

ОДЕССКИЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ ХОЛОДИЛЬНОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

На правах рукописи

Аспирант ИВАХНОВ Валерий Иванович

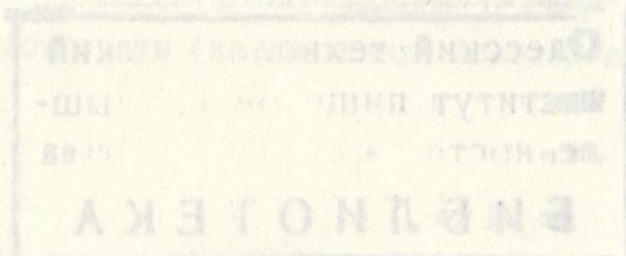
ИССЛЕДОВАНИЕ ГРАВИТАЦИОННОЙ ОХЛАЖДАЮЩЕЙ
СИСТЕМЫ

Специальность 05.04.03 – Гидравлические
машины, машины и аппараты холодильной и
криогенной техники

Переучен 1987

Автореферат диссертации на
соискание ученой степени
кандидата технических наук

Одесса - 1974



Работа выполнена на кафедре кондиционирования воздуха
Одесского технологического института холодильной промышленности

Научный руководитель — доктор технических наук, профессор
ЖАДАН В.З.

Научный консультант — доктор технических наук, профессор
ГОРБИС З.Р.

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
ЧУМАК И.Г.

кандидат технических наук
ЧЕРНОЗУБОВ А.М.

Ведущая организация — Укрглавконсерв Министерства пище-
вой промышленности УССР.

Автореферат разослан "14" февраля 1974 г.

Защита диссертации состоится "18" марта 1974 г.
в 15⁰⁰ час на заседании Совета факультетов холодильных машин,
глубокого холода и криогенной техники Одесского технологическо-
го института холодильной промышленности.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке института.
Отзыв на автореферат в двух экземплярах, заверенный печатью
учреждения, просим направлять в Совет института по адресу:
270000, г.Одесса, ГСП, ул.Петра Великого, 1/3.

Ученый Секретарь Совета факультетов,
доцент

Г.В.ЛИХНИЦКИЙ

Исх. _____

к.в. 14420



ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Из-за недостатка хранилищ с искусственным охлаждением и несовершенства способов хранения ежегодно теряется значительная часть урожая фруктов и овощей.

Разработка и исследование эффективных охлаждающих систем для фруктоовоцехранилищ является важной народнохозяйственной задачей.

В отличие от "недышащей" продукции (мясо, рыба, масло) фрукты и овощи являются живыми организмами, непрерывно выделяющими биологическое тепло (тепло дыхания). Темп тепловыделений характеризуется суточным ростом температуры продукции, находящейся в адиабатической оболочке, и выражается количественно вполне ощутимой величиной 0,3-0,8 град/сутки. Отвод тепла дыхания при поддержании равномерного и стабильного температурного и влажностного режимов в массе продукции - одно из важнейших требований, предъявляемых к охлаждающим системам фруктоовоцехранилищ.

Необходимость поддержания изотермического режима при хранении плодов и овощей доказана работами Б.А.Рубина, Л.В.Метлицкого, А.А.Колесника. Авторами установлено, что колебания температуры в процессе хранения в пределах 2-3°C приводят к увеличению интенсивности дыхания (расход сахаров) на 30-40%.

Для поддержания стабильного изотермического режима И.Герберт и И.К.Можкович рекомендуют после периода первоначального охлаждения непрерывную работу вентиляторов. В.З.Жадаев показал, что непрерывная работа вентиляторов неизбежно влечет за собой избыточную (не вызванную необходимостью отвода тепла

дыхания) аэрацию продукции, что приводит к повышенным потерям влаги, особенно при общеобменной вентиляции и больших внешних теплопритоках.

В настоящее время в проектах фруктохранилищ, выполненных ГИПРОХОЛОДОМ и ГИПРОТОРГОМ, воздушная охлаждающая система с общеобменной вентиляцией, рассчитанной на смену межштабельного воздуха получила наибольшее применение. Результаты исследований указанной охлаждающей системы представлены в работах А.А.Гоголина, С.Г.Чуклина, И.Г.Чумака, Н.А.Моисеевой, О.М.Высоцкой, Д.С.Россовского, В.С.Евреиновой, Е.Я.Файнзильберга.

По данным О.М.Высоцкой и Д.С.Россовского при работе вентиляторов 9 часов в сутки колебание среднесуточной температуры в камерах с общеобменной вентиляцией достигает $3,4^{\circ}\text{C}$. По данным В.С.Евреиновой типичная неравномерность температурного поля по объему камеры в этих условиях составляет $1,0-3,5^{\circ}\text{C}$. Скорость воздуха неравномерна: $0,05$ м/сек у пола камеры и $4,0$ м/сек над штабелем. С.Г.Чуклин, И.Г.Чумак и Е.Я.Файнзильберг отмечают, что равномерность распределения температур в грузовом объеме достигается при кратности циркуляции воздуха $30-40$ объемов камеры в час. Наиболее приемлемой кратностью циркуляции Н.А.Моисеева и О.М.Высоцкая считают $8-12$ объемов в час. Увеличение кратности циркуляции приводит к значительному возрастанию потерь при хранении. Таким образом, проведенные исследования показали, что охлаждающая система с общеобменной вентиляцией не обеспечивает одновременное комплексное выполнение двух основных задач, диктуемых технологическими требованиями:

а) поддержание стабильного изотермического режима во всей массе продукции;

б) предупреждение избыточного вентилирования штабелей с целью защиты продукции от повышенных потерь влаги.

Краснодарским филиалом ГИПРОНИСЕЛЬПРОМа разрабатываются охлаждающие системы, основанные на принципе активного вентилирования, сущность которого заключается в равномерном периодическом продувании всей массы продукции холодным воздухом. Преимуществом активного вентилирования по сравнению с общеобменной вентиляцией является возможность осуществления отвода тепла от каждого элемента продукции и предотвращение избыточной аэрации, однако, оно не обеспечивает изотермического режима хранения.

В связи с этим была поставлена задача создания охлаждающей системы, обеспечивающей изотермический режим хранения без опасности избыточного вентилирования продукции. Решение указанной задачи оказалось возможным при использовании в качестве движущей силы процесса вентилирования гравитационных сил, возникающих за счет разности температур, обусловленной выделением биологического тепла в штабеле и работой охлаждающих приборов.

Принципиальная схема хранилища с гравитационной охлаждающей системой показана на рис. I. Охлаждающие приборы (оребрённые батареи) I располагаются между штабелями продукции 2, образуя продухи 3 для направленного движения рециркуляционного воздуха. Непрерывная работа охлаждающих приборов обеспечивает изотермический режим хранения без опасности избыточного вентилирования продукции, саморегулирование расходов воздуха при этом происходит в зависимости от интенсивности тепловыделений в штабеле.

Так как движущая сила процесса гравитационного вентилирования $L \Delta \rho_g$ преодолевает общее гидравлическое сопротивление вентиляционного тракта:

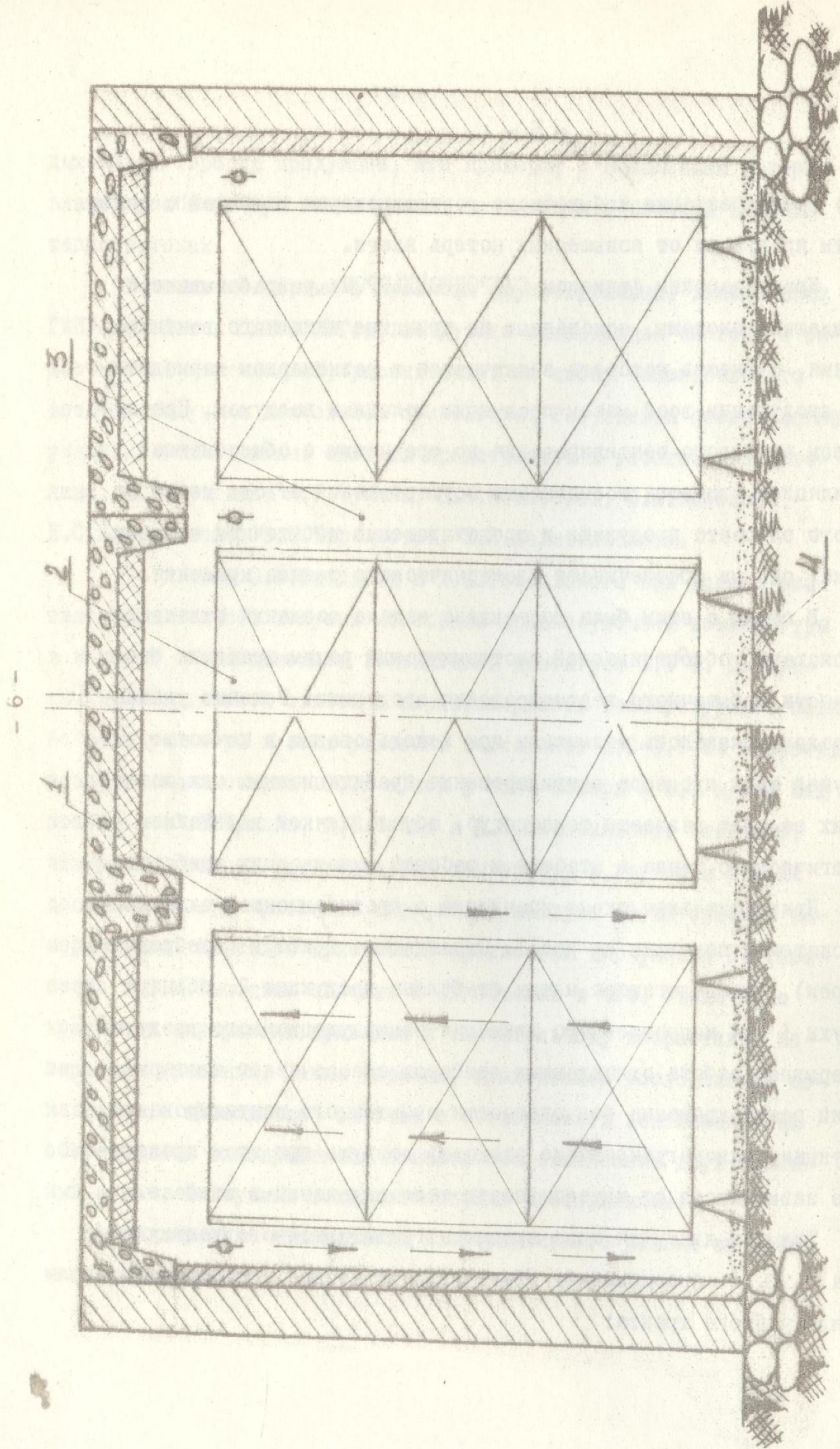


Рис. 1 Схема гравитационной охлаждающей системы.

$$L \Delta \rho_{\text{в}} = \Delta P_1 + \Delta P_2 + \Delta P_3 + \Delta P_4 \quad (1)$$

- где: L - геометрический размер штабеля, в направлении которого устанавливается разность плотностей воздуха, м;
- $\Delta \rho_{\text{в}}$ - разность между средней плотностью воздуха в штабеле и плотностью воздуха в продухе, кг/м³;
- ΔP_1 - гидравлическое сопротивление насыпи продукции, н/м²;
- ΔP_2 - местное сопротивление (внезапное сужение) на входе воздуха в продух, н/м²;
- ΔP_3 - сопротивление по длине продуха, н/м²;
- ΔP_4 - сопротивление на входе воздуха в насыпь продукции, н/м².

то неравномерность температурного поля в штабеле зависит от геометрических и аэродинамических характеристик насыпи продукции, ширины продуха и площади живого сечения на входе воздуха в штабель.

Диссертация, посвященная теоретическому и экспериментальному исследованию гравитационной охлаждающей системы, состоит из пяти глав.

В первой главе дается сравнительная оценка существующих охлаждающих систем фруктоовоцехранилищ, вскрываются существенные недостатки их, а также освещается физическая сущность гравитационной охлаждающей системы.

Вторая глава посвящена исследованию теплофизических, геометрических и аэродинамических характеристик насыпи продукции.

В третьей главе приводятся математическое описание и аналитические исследования процессов изменения состояния внутриштабельного воздуха при использовании механической и гравитационной систем вентиляции.

Содержание четвертой главы составляют результаты экспериментальной проверки опытных хранилищ, оборудованных различными охлаждающими системами.

Пятая глава посвящена натурному моделированию и промышленной проверке гравитационной охлаждающей системы.

В приложении приводятся копии официальных документов, отражающих результаты внедрения предложенной охлаждающей системы.

ОБОСНОВАНИЕ ПРИНЯТЫХ РЕШЕНИЙ

На способы передачи тепла внутри штабеля "дышащей" продукции существуют различные взгляды. По разному оценивают роль конвективного теплообмена и теплопроводности внутри штабеля. Г.Мефферт (Голландия) предложил метод расчета базирующийся на учете теплопроводности как основного способа передачи тепла в штабеле.

Для оценки доли конвективного теплообмена и теплопроводности в общем теплообмене, что является принципиально важным вопросом, позволяющим определить возможность гравитационного вентилирования продукции, нами были поставлены специальные опыты.

Интенсивность развития свободных конвективных токов воздуха в насыпи продукции оценивалась коэффициентом конвекции - ϵ_k , представляющим собой отношение эквивалентного коэффициента теплопроводности - λ_e , к истинному коэффициенту теплопроводности насыпи - λ_0 .

Схема экспериментального стенда для определения λ_0 , λ_e и ϵ_k представлена на рис. 2. Исследуемый вид продукции 3 загружался в рабочий объем, образованный внутренней оболочкой стенда 4. Подвод тепла осуществлялся электрогрелкой I, отводилось тепло водой, протекающей через холодильник II. Мощ-

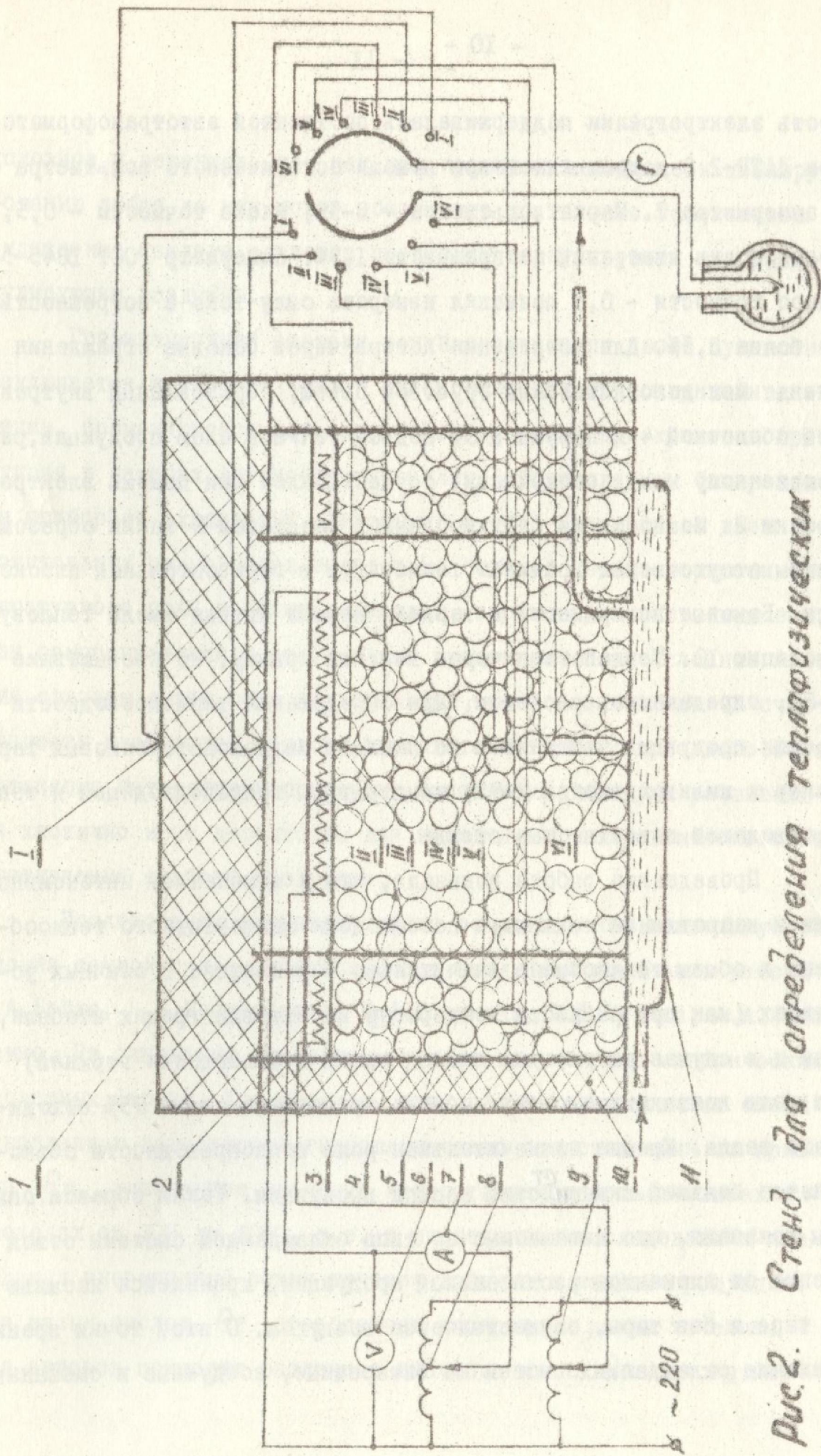


Рис. 2. Стенд для определения теплофизических характеристик насыпи продушки.

ность электрогрелки поддерживалась постоянной автотрансформатором ДАТР-2 8 и изменялась при помощи остатического вольтметра 6 и амперметра 7. Марка вольтметра - З-59, класс точности - 0,5, погрешность измерений не превышала 1,5%. Амперметр ГОСТ 1845-52, класс точности - 0,5 позволял измерять силу тока с погрешностью не более 2,5%. Для устранения потерь через боковые ограждения стенд имел дополнительный грузовой объем, образованный внутренней оболочкой 4 и наружной 5. Подвод тепла к слою продукции, расположенному между оболочками, осуществлялся при помощи электрогрелки 2. Мощность ее регулировалась реостатом 9 таким образом, чтобы отсутствовал градиент температур в горизонтальной плоскости. Боковые поверхности и верхняя крышка стенда имели тепловую изоляцию 10. Теплотери через верхнюю крышку, не превышавшие 7-8%, определялись расчетом. Для определения теплопроводности насыпи продукции измерялись (с помощью медноконстантановых термопар и милливольтметра М-95) температуры теплоподводящей и теплоотводящей поверхностей стенда.

Проведенная работа показала, что с изменением интенсивности и направления теплового потока доля конвективного теплообмена в общем теплообмене значительно изменяется. В обычных условиях (как при разности температур на боковых гранях штабеля, так и в случае нагревания нижней грани и охлаждения верхней) на долю конвективного теплообмена приходится свыше 95% отводимого тепла. Крайне незначительная роль теплопроводности объясняется большой ^{ст}скважностью насыпи продукции. Таким образом, опыты показали, что независимо от типа охлаждающей системы отвод тепла от элементов растительной продукции, хранящейся насыпью в таре и без тары, осуществляется воздухом. С этой точки зрения деление охлаждающих систем на батарейные, воздушные и смешанные

условное и неточное, так как при правильном подходе к конструированию любая из них может обеспечить достаточно эффективное охлаждение каждого элемента продукции циркулирующим или рециркулирующим воздухом.

Гравитационная система вентилирования по своей сущности заключается в упорядочении и интенсификации естественной вентиляции, применяющейся как способ отвода тепла при хранении продукции в камерах фруктоовощехранилищ, оборудованных батарейными приборами охлаждения. Указанный способ хранения не дает положительных результатов вследствие большой неравномерности температурного поля в объеме хранилищ, образовании застойных зон, зон самосогревания и отпотевания продукции. Перечисленные явления связаны с тем, что конвективные токи, возникающие за счет разности плотностей теплого внутриштабельного и холодного, обработанного батарейными приборами охлаждения, воздуха развиваются хаотично и не достаточны для преодоления гидравлического сопротивления штабеля продукции.

Исследованию гидравлического сопротивления вентилируемой насыпи сочной сельскохозяйственной продукции посвящены работы В.А.Бойко, Г.И.Бродянского, И.Л.Волкинда, И.Г.Чумака, А.А.Федоренко. На основании проведенных работ получен ряд эмпирических расчетных формул. Как правило, эти формулы представляют собой одночленную зависимость гидравлического сопротивления от критерия Re , численное значение которого изменялось в опытах в пределах от 100 до 1000, т.е. в проведенных исследованиях преобладал инерционный режим течения воздуха в насыпи продукции. При малых числах Re преобладает вязкостный режим течения. Ряд авторов приводят различные значения чисел Re для гранич-

ных условий. Так, например, Н.Н.Павловский ограничивает вязкостный режим в пористых средах величиной $Re = 7-9$, И.Л.Ишкин и М.Г.Каганер пределами 10-60, Д.К.Коллеров до 8. По данным Н.Д.Бродянского вязкостный режим при движении воздуха в насыпи сахарной свеклы характеризуется числом $Re < 30$. На основании опытных данных В.А.Бойко нашел, что критическим является число $Re = 30$. Для гравитационной охлаждающей системы, обеспечивающей развитие свободных конвективных токов, характерен, как показали расчеты автора, вязкостный режим течения воздуха, $Re = 8-15$. Расчетные формулы для определения гидравлического сопротивления насыпи продукции в этих условиях отсутствуют.

Д.К.Коллеров предложил универсальное уравнение для определения перепада давления в зернистом слое с учетом сил инерции и сил вязкости, которое было использовано в настоящей работе:

$$\frac{\Delta P}{wh} = K_0 \left| \frac{lg}{h} \right|^2 \mu F_3^2 \frac{(1 - \epsilon_{ск})^2}{\epsilon_{ск}^3} + K_x \left| \frac{lg}{h} \right|^3 \rho_в w F_3 \frac{1 - \epsilon_{ск}}{\epsilon_{ск}^3} \quad (2)$$

где: ΔP - общий перепад давления по высоте насыпи продукции, н/м²;

w - скорость движения воздуха, рассчитанная по незаполненному сечению, или скорость фильтрации, м/сек;

K_0 - константа Козени-Кармана;

$\frac{lg}{h}$ - отношение действительной длины воздушного канала в зернистом слое к высоте слоя;

μ - коэффициент динамической вязкости, кг·сек/м²;

F_3 - удельная поверхность элементов продукции, м²/м³;

$\epsilon_{ск}$ - коэффициент скважистости, представляющий собой долю объема, не занятого элементами продукции;

K_x - константа.

В диссертации содержится не рассматриваемый здесь материал по исследованию $\epsilon_{ск}$, F_3 и $\frac{\ell q}{h}$.

Данные по потере давления в исследуемом слое, полученные нами при разных скоростях воздуха, рассчитывались в виде переменных групп $\frac{\Delta P}{wh}$ и $w\beta_8$ уравнения прямой:

$$\frac{\Delta P}{wh} = a + \beta w\beta_8 \quad (3)$$

где

$$a = K_0 \left| \frac{\ell q}{h} \right|^2 \mu F_3^2 \frac{(1 - \epsilon_{ск})^2}{\epsilon_{ск}^3}$$

$$\beta = K_x \left| \frac{\ell q}{h} \right|^3 F_3 \frac{1 - \epsilon_{ск}}{\epsilon_{ск}^3}$$

Значения коэффициентов "а" и "б" находились путем построения интерполяционных прямых.

Согласно требованиям, предъявляемым к охлаждающим системам фруктоовоцехранилищ, максимальная разность температур в объеме хранилищ не должна превышать 1°С.

При увеличении температуры хранения продукции на 0,1°С по сравнению с технологически заданной среднемесячные потери при хранении по данным Н.А.Моисеевой и О.М.Высоцкой возрастают на 0,06-0,08%.

Одной из основных задач исследований гравитационной охлаждающей системы являлось определение допустимых геометрических размеров и конструкции штабеля, при которых разность температур в его объеме не превышает 1°С.

Для расчета температурных полей и влаговыделений при изотермическом режиме хранения в диссертации приводится вывод систем дифференциальных уравнений, описывающих процессы тепло- и влагообмена при механическом и гравитационном активном вентилировании продукции.

Для случая механического активного вентилирования система уравнений имеет вид:

$$I \left\{ \begin{aligned} \frac{dt}{dh} &= \frac{\alpha F_H}{c_p \varepsilon_{ск} \rho_0 W} (t_n - t) \\ \exp(\beta t_n) &= \frac{\alpha F_H}{q_0 \rho_H} (t_n - t) + \frac{\alpha \varepsilon_F F_H z}{z q_0 \rho_H} (P_{no}'' - n t_n - P_n) \\ \frac{0,622}{P_{в.ср}} \frac{dP}{dh} &= \frac{\alpha F_H \varepsilon_F}{z \varepsilon_{ск} W \rho_0} (P_{no}'' + n t_n - P_n) \end{aligned} \right.$$

- где:
- t - температура воздуха, град;
 - α - коэффициент теплоотдачи, Вт/м²град;
 - F_H - поверхность продукии на единицу объема насыпи, м²/м³;
 - c_p - теплоемкость воздуха, Дж/кг·град;
 - W - скорость воздуха в насыпи продукии, м/сек;
 - t_n - температура продукии, град;
 - q_0 - энергия дыхания при 0°С, Вт/кг;
 - β - температурный коэффициент скорости дыхания, 1/сек;
 - ρ_H - насыпная плотность продукии, кг/м³;
 - ε_F - массообменная характеристика продукии, представляющая собой долю поверхности, участвующей в массообмене;
 - z - теплота испарения, Дж/кг;
 - $z = \frac{\alpha}{\beta} \approx const$
 - P_{no}'' - насыщающая упругость пара при 0°С, н/м²;
 - $n = 48,4$
 - P_n - упругость водяного пара в воздухе, н/м²;
 - $P_{в.ср}$ - среднее парциальное давление сухого воздуха, н/м².

Физические свойства и скорость воздуха при выводе системы уравнений I принимались постоянными.

При описании процессов изменения состояния внутриштабельного воздуха в случае гравитационного вентилирования продукции было принято:

1. Конвективные токи воздуха развиваются в вертикальном направлении (штабель имеет боковые воздухо непроницаемые ограждения).

2. Физические свойства воздуха и его скорость переменны по высоте насыпи.

Полученная система уравнений имеет вид:

$$\text{II} \left\{ \begin{array}{l} \frac{dt}{dh} = \frac{\alpha F_H}{c_p \varepsilon_{ck} \rho_0 W} (t_n - t) \\ \exp(\beta t_n) = \frac{\alpha F_H}{q_0 \rho_H} (t_n - t) + \frac{\alpha \varepsilon_F F_H \gamma}{z q_0 \rho_H} (P_{no}'' + n t_n - P_n) \\ \frac{0,822}{P_{в.ср}} \frac{dP_n}{dh} = \frac{\alpha F_H \varepsilon_F}{z \varepsilon_{ck} W \rho_0} (P_{no}'' + n t_n - P_n) \\ \rho_0 = \frac{353}{273+t} \left(1 - \frac{0,378}{P_{в.ср}} P_n \right) \\ \alpha = \frac{0,05}{d} + 7,27 \frac{W^{0,67}}{d^{0,33}} \\ W = \frac{W_0 \rho_{в(0)}}{\rho_0} \end{array} \right.$$

где: d - средний диаметр элементов продукции, м;

W_0 и $\rho_{в(0)}$ - скорость и плотность воздуха при $h = 0$.

Системы уравнений I и II решались на электронно вычислительной машине "Наири-С" методом Рунге-Кутты.

Система уравнений II решается методом последовательных приближений. При правильно заданных граничных условиях должно выполняться равенство (I).

Исследования проводили для насыпи моркови и яблок.

Основные результаты аналитических исследований:

1. Для каждого вида продукции существует равновесная относительная влажность воздуха, не меняющая своего значения по высоте насыпи. Численное значение ее тем выше, чем меньше энергия дыхания продукции, ниже ее температура, больше контактная поверхность, меньше влагоудерживающая способность продукции и выше скорость движения воздуха. При начальной относительной влажности приточного воздуха, отличной от равновесной, нижние слои продукции "корректируют" влажностный режим воздуха, поступающего в выше расположенные слои. Высота корректирующего слоя для каждого вида продукции зависит от относительной влажности и скорости приточного воздуха.

2. Разность температур по высоте насыпи зависит от интенсивности дыхания продукции, относительной влажности и удельного расхода вентилирующего воздуха. С увеличением удельного расхода и снижением относительной влажности указанная разность температур уменьшается. Зависимость разности температур по высоте штабеля от относительной влажности приточного воздуха объясняется перераспределением между количеством явного и скрытого тепла при отводе энергии дыхания.

3. Влаговыделения продукции в период хранения зависят от массообменной характеристики продукции, параметров и удельного расхода приточного воздуха, высоты штабеля и геометрических размеров элементов продукции.

Чем выше массообменная характеристика продукции, тем больше потери влаги при хранении. Так при относительной влажности приточного воздуха 97%, удельном расходе воздуха $30 \text{ м}^3/\text{т час}$, высоте штабеля 5 м, потери за шесть месяцев хранения для штабеля моркови составляют 5,23%, для штабеля яблок - 2,32%. При

этих условиях равновесная относительная влажность воздуха для моркови составляет 99,9% и устанавливается она на высоте 1 м, равновесная относительная влажность воздуха для яблок - 94,4% и стабилизируется она на высоте 5 м.

Величина влаговыделений не зависит от массообменной характеристики продукции в тех случаях, когда относительная влажность приточного воздуха соответствует равновесной. В указанных случаях влаговыделения для различных видов продукции являются функцией энергии дыхания. Чем выше энергия дыхания, тем больше потери влаги за период хранения.

С уменьшением геометрических размеров элементов продукции влаговыделения увеличиваются.

4. Проведенные исследования показали, что при гравитационном вентилировании продукции боковое укрытие штабеля воздухопроницаемой оболочки нецелесообразно, так как при этом возникает значительная разность температур по его высоте (до 3°C при

$h = 5$ м). Площадь живого сечения для прохода воздуха между штабелями должна составлять не менее 3% от площади поперечного сечения штабеля, при этом суммарное гидравлическое сопротивление вентиляционного тракта пренебрежимо мало по сравнению с гидравлическим сопротивлением насыпи продукции.

Экспериментальное исследование температурного поля в штабеле с боковым воздухопроницаемым ограждением подтвердило результаты аналитических расчетов (расхождения не превышали 10%), а также позволило установить, что температурный градиент в направлении нормальном к потоку воздуха приближается к нулю, что объясняется автоматизмом саморегулирования, заложенным в самой системе гравитационного вентилирования. Указанное явление было принято за основу при разработке новых конструкций штабелей продукции, а также способов их укрытия.

Схемы проверявшихся видов штабелей представлены на рис.3: 1,2 - обычный штабель с боковым воздухо непроницаемым укрытием, 3,4 - разрезной штабель с верхним воздухо непроницаемым укрытием, 5,6 - разрезной штабель без укрытия, 7,8 - обычный штабель без укрытия. Изучение температурного поля в объеме штабелей при загрузке продукции навалым способом (схемы 1,3,5,7) проводилось путем моделирования насыпи продукции.

Первоначально насыпь продукции моделировалась засыпкой из графитовых кубиков через которую проходил электрический ток. При прохождении электрического тока засыпка разогревалась, однако ввиду большой теплопроводности графита происходило выравнивание температурного поля в ее объеме, что не соответствовало реальным условиям.

В дальнейшем насыпь продукции моделировалась путем набора пакета из перфорированных графитовых плит с отверстиями диаметром 0,005 м при коэффициенте скважистости 0,38. Схема экспериментального стенда представлена на рис.4. Графитовые плиты 1, между которыми расположены прокладки из неэлектропроводного материала 2, образуют пакет, моделирующий насыпь продукции с внутренним источником тепла. Пакет размещался в герметичном кожухе 3, имеющем теплоизоляцию 4 так, что поверхности пакета и стенки кожуха образовывали верхний и боковые продухи, а также подполье для прохода воздуха. В боковых продухах размещались латунные трубки 5, моделирующие приборы охлаждения (холодоносителем служила водопроводная вода). Потребляемая мощность измерялась при помощи остатического вольтметра 16 и амперметра 7 и поддерживалась постоянной при помощи лабораторного автотрансформатора ЛАТР-2 8. Воздухо непроницаемая оболочка 9 выполнена из полиэтиленовой пленки. Конвективные токи развивались за счет

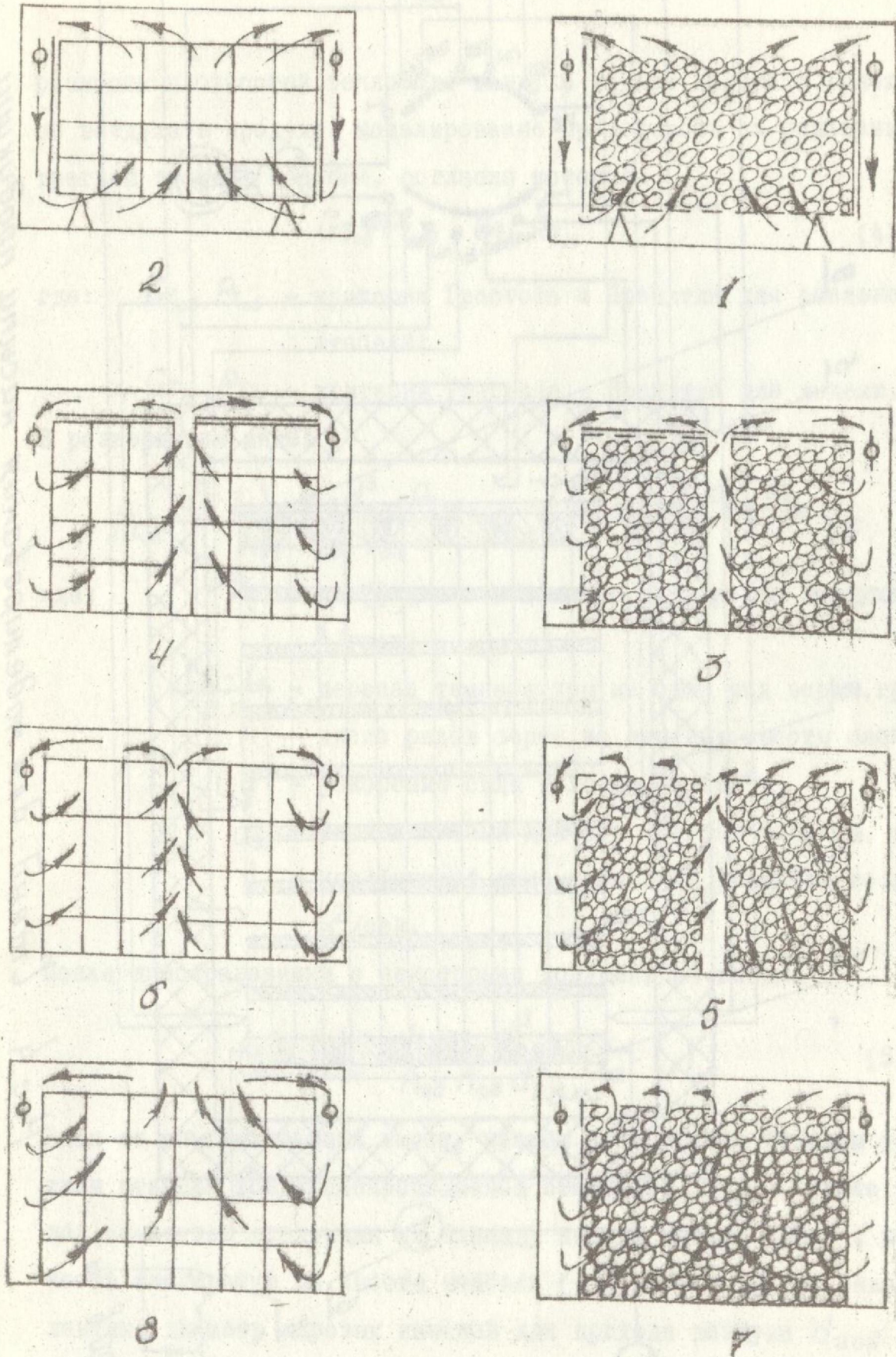


Рис 3. Схемы исследуемых видов штабелей продукции.

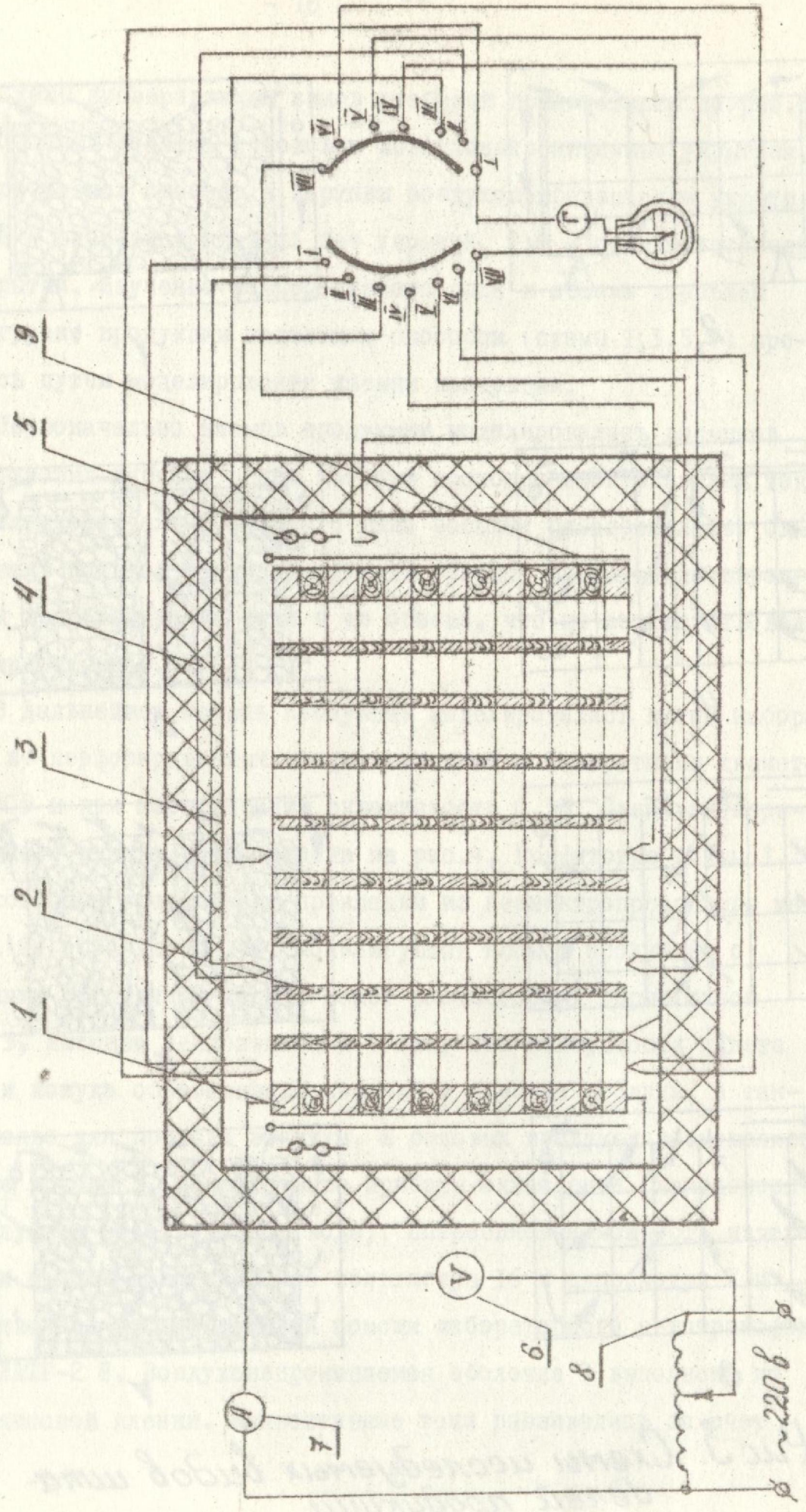


Рис 4. Стенд для моделирования насыпи продукции

разности плотностей теплового воздуха внутри пакета и холодного воздуха в продухе. Моделирование проводилось на основании третьей теоремы подобия, согласно которой:

$$Gr_{об} Pr_{об} = Gr_M Pr_M \quad (4)$$

где: $Gr_{об}, Pr_{об}$ - критерии Грасгофа и Прандтля для реального штабеля;

Gr_M, Pr_M - критерии Грасгофа и Прандтля для модели.

В развернутом виде:

$$\beta_{t_{об}} \frac{(t_2 - t_1)_{об} g_{об} d_{з_{об}}^3 Pr_{об}}{h_{об} n_{об} \nu_{об}^2} = \beta_{t_M} \frac{(t_2 - t_1)_M g_M d_{з_M}^3 Pr_M}{h_M n_M \nu_M^2}$$

где: β_t - коэффициент объемного расширения воздуха, 1/град;

$\frac{t_2 - t_1}{h n}$ - перепад температуры на один ряд зерен, град;

n - число рядов зерен на единицу высоты слоя;

g - ускорение силы тяжести, м/сек²;

$d_{зк}$ - эквивалентный диаметр поровых каналов, м;

ν - коэффициент кинематической вязкости воздуха, м²/сек.

После преобразований с некоторыми допущениями имеем:

$$(t_2 - t_1)_M = \frac{h_M n_M d_{з_{об}}^3}{h_{об} n_{об} d_{з_M}^3} (t_2 - t_1)_{об} \quad (5)$$

Зная из опытных данных высоту насыпи продукции с боковым укрытием штабеля воздухопроницаемой оболочкой $h_{об}$, число рядов элементов продукции на единицу высоты насыпи $n_{об}$, разность температур по высоте штабеля $(t_2 - t_1)_{об}$ и эквивалентный диаметр поровых каналов для прохода воздуха $d_{з_{об}}$, по уравнению (5) определили разность температур $(t_2 - t_1)_M$ для модели высотой h_M , числом рядов плит на единицу высоты

модели Π_M , с эквивалентным диаметром поровых каналов для прохода воздуха - $d_{эМ}$. Полученную разность температур по высоте модели установили путем регулирования потребляемой мощности при помощи лабораторного трансформатора. Установив указанную разность температур при помощи амперметра и вольтметра, определили мощность, потребляемую одной пластиной. При проведении экспериментов мощность, потребляемая одной пластиной, оставалась постоянной, таким образом было проведено моделирование насыпи продукции с постоянным внутренним источником тепла.

В результате проведенных исследований установлено:

1. При боковом воздухо непроницаемом укрытии штабеля возникает большая разность температур по его высоте. Лимитирование высоты штабеля ограничивает емкость хранилища.

2. Разрезной штабель с верхним воздухо непроницаемым укрытием, а также разрезной и обычный штабель без укрытия позволяют увеличить их высоту в пределах проведенных исследований до 7 - 8 м.

3. Недостатком разрезных штабелей является пониженное значение коэффициента использования объема хранилища.

4. Оптимальным является обычный штабель без укрытия.

Для экспериментального исследования систем механического и гравитационного активного вентилирования продукции были сооружены полупромышленные хранилища. Опыты проводились на моркови, отличающейся низкой лежкоспособностью. Продолжительность хранения - 160 суток. В хранилищах с механическим вентилированием были заложены датчики терморегуляторов ТРДК-3, которые автоматически включали вентиляторы воздухоохладителей при достижении продукцией температуры $+1^{\circ}\text{C}$ и включали их при понижении температуры до -1°C . В хранилище с гравитационным вентилированием температура моркови колебалась в пределах $\pm 0,2^{\circ}\text{C}$, что обеспечивалось регулированием

температуры и количества холодоносителя, постоянно поступающего в приборы охлаждения.

В результате проведенных исследований установлены преимущества гравитационной охлаждающей системы:

1. Тепло дыхания, выделяющееся в насыпи продукции в период хранения, полезно используется как движущая сила процесса вентилирования. Благодаря этому отпадает необходимость в дополнительном оборудовании камер вентиляторами, воздуховодами, сокращается расход электроэнергии.

2. Простота автоматизации системы: регулирование сводится к поддержанию определенной температуры кипения холодильного агента или температуры холодоносителя.

3. В системе заложен автоматизм саморегулирования. При возникновении зоны самосогревания в каком-либо месте насыпи в это место автоматически подается большее количество воздуха.

4. Система позволяет осуществить изотермический режим хранения без опасности избыточного вентилирования продукции и повышенной усушки её.

5. Гравитационная охлаждающая система отличается простотой и удобством при промышленном использовании.

Недостатки гравитационного вентилирования заключаются в следующем:

1. Процесс охлаждения продукции протекает медленнее, чем при механическом вентилировании штабеля.

2. Коэффициент использования внутреннего объема хранилища ниже, чем при механическом активном вентилировании.

В результате технологических испытаний установлено, что в хранилище с гравитационной охлаждающей системой общие потери моркови за период хранения оказались в 1,7-1,8 раза меньше, чем при механическом активном вентилировании.

РЕЗУЛЬТАТЫ ВНЕДРЕНИЯ ГРАВИТАЦИОННОЙ
ОХЛАЖДАЮЩЕЙ СИСТЕМЫ

В промышленном масштабе гравитационная охлаждающая система была внедрена на холодильнике для хранения овощей Одесского опытно-экспериментального консервного завода им. В.И. Ленина.

Холодильник состоит из трех камер площадью 94 м², 48,5 м² и 124 м². Расчетная емкость холодильника - 300 тонн. Охлаждающими приборами служили батареи, изготовленные по принципу панельных батарей с центральными ребрами. Диаметр трубы батареи 0,057 x 0,0035 м, высота ребра - 0,05 м. Удельная поверхность охлаждающих приборов - 0,0017 м²/кг.

Холодильник предназначен для доохлаждения продукции от 5 до 0°С и последующего хранения ее при температуре 0 + -1°С. Максимальный удельный расход холода - 0,08 Вт/кг. В качестве холодоносителя использован водный раствор хлористого кальция. В режиме хранения минимальная температура рассола, подаваемая в приборы охлаждения, $t_{p. min} = -4^{\circ}\text{C}$. Максимальный перепад температур между рассолом в приборах охлаждения и воздухом 4°С. Для поддержания высокой относительной влажности воздуха и снятия вредных теплопритоков грунта полы в камерах хранилища покрывались слоем влажных опилок толщиной 0,05 м. Рециркуляция влаги осуществлялась путем периодической оттайки охлаждающих приборов.

При промышленной проверке гравитационной охлаждающей системы были проведены исследования температурных полей в штабелях продукции различной конструкции (рис. 3). В качестве планчатой тары (схемы 2, 4, 6, 8) были использованы контейнеры. Размеры контейнера 0,9x0,9x0,9 м, средняя емкость 450 кг. Результаты исследований (рис. 5, *) подтвердили высокую эффективность обычного

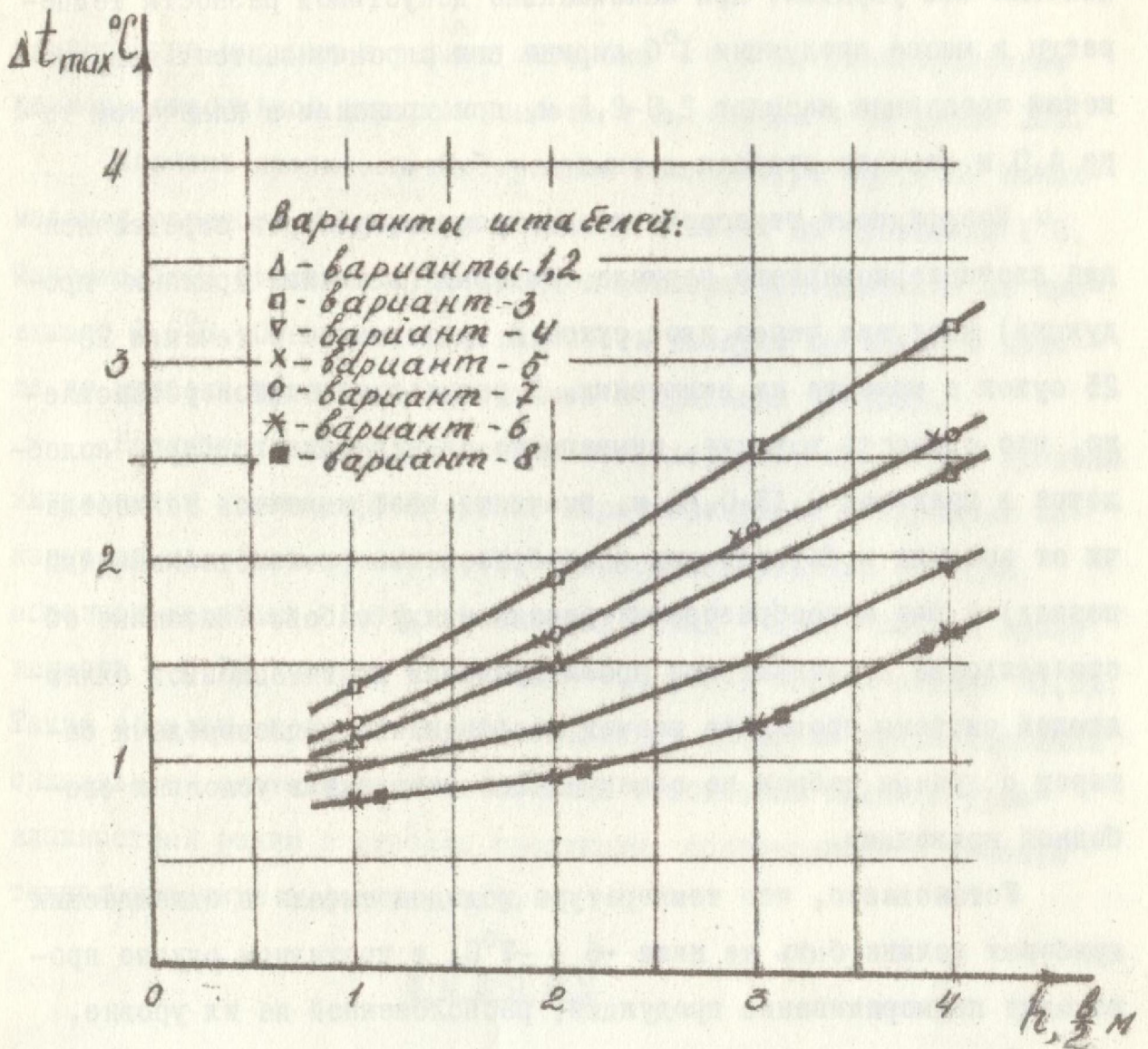


Рис. 5 Зависимость максимальной разности температур от геометрического размера штабеля.

штабеля без укрытия. При максимально допустимой разности температур в массе продукции 1°C ширина его ограничивается: при хранении продукции насыпью 2,0-2,5 м, при хранении в планчатой таре 4,0 м, высота штабеля в опытах - 5,0 м.

Коэффициент теплоотдачи охлаждающих приборов определялся для квазистационарного периода, который (в режиме хранения продукции) наступал через двое суток и продолжался в течение 20 - 25 суток с момента их включения. В результате опытов установлено, что скорость воздуха, омывающего охлаждающие приборы, колеблется в пределах 0,15-0,20 м, значения коэффициентов теплоотдачи от воздуха к батарее при инееобразовании (квазистационарный период) и без инееобразования близки между собой. Указанные обстоятельства позволяют при проектировании гравитационной охлаждающей системы проводить расчет коэффициента теплопередачи батареи с прямым ребром по общепринятой методике в условиях свободной конвекции.

Установлено, что температура холодоносителя в охлаждающих приборах должна быть не ниже $-6 + -7^{\circ}\text{C}$, в противном случае происходит подмораживание продукции, расположенной на их уровне.

Поддержание стабильного изотермического режима в штабелях продукции осуществлялось путем регулирования температуры холодоносителя, поступающего в приборы охлаждения. При постоянной среднесуточной температуре наружного воздуха температура продукции в штабеле практически не менялась. Необходимость в регулировании температуры холодоносителя возникла при изменении среднесуточной температуры наружного воздуха на $5-6^{\circ}\text{C}$. Коэффициент рабочего времени охлаждающих приборов составил $\varepsilon_p = 0,82$.

На хранение поступила морковь, выращенная во Львовской области. Хранение моркови осуществлялось в контейнерах. Средняя

температура моркови в период загрузки - $4,8^{\circ}\text{C}$. Геометрические размеры штабельной моркови: высота 4 м, ширина 4 м, длина Юм.

Морковь хранилась при средней температуре $0,2^{\circ}\text{C}$. Максимальная разность температур в объеме штабеля не превышала 1°C . Максимальное отклонение от средней температуры хранения не превышало $0,8^{\circ}\text{C}$. Относительная влажность воздуха на входе и выходе из штабеля продукции находилась в пределах 99-100%.

Результаты технологических исследований, при общей продолжительности хранения 140 суток, характеризуются следующими показателями: убыль веса - 3,4%, полноценной моркови - 97,3%, обрезной моркови - 1,9%, абсолютный отход - 0,8%, потери сухих веществ - 0,7%, потери каротина - 4,6 мг/%, потери сахара - 0,6%. Таким образом, проведенная промышленная проверка гравитационной охлаждающей системы, обеспечивающей стабильный температурно-влажностный режим в штабеле продукции, подтвердила ее высокую технологическую эффективность.

ВЫВОДЫ

1. Биогенное тепло дыхания сочной растительной продукции, находящейся в адиабатической оболочке при температуре 0°C , вызывает самонагревание ее в течение суток на $0,3-0,8^{\circ}\text{C}$. Отвод этого тепла при технологически оптимальных условиях составляет основную задачу охлаждающей системы фруктоовощехранилища.

2. Результаты работы ведущих специалистов в области хранения сочной растительной продукции показали, что рациональная охлаждающая система фруктоовощехранилища должна обеспечивать одновременное комплексное выполнение двух основных задач:

а) поддержание стабильного изотермического режима во всей массе продукции;

б) предупреждение избыточного вентилирования штабелей с целью

защиты продукции от повышенных потерь влаги, т.е. создание условий, при которых интенсивность вентилирования продукции в каждый момент времени отвечала бы интенсивности тепловыделений.

3. Ни одна из существующих охлаждающих систем не удовлетворяет указанным требованиям.

4. Одновременное комплексное выполнение двух задач — поддержание изотермического режима и предотвращение избыточного вентилирования продукции — оказалось возможным благодаря использованию гравитационных сил, побуждаемых энергией дыхания и работой охлаждающих приборов.

5. Проведенные исследования показали, что основным средством отвода тепла, выделяемого в штабеле, является конвективный теплообмен, обусловленный высокой окважистостью насыпи продукции. При обычных размерах штабелей на долю теплопроводности приходится не более 1-3% общего количества отводимого тепла. В этом отношении общепринятое деление охлаждающих систем фруктоовощехранилищ на воздушные, батарейные и смешанные не отвечает физической сущности протекающих в штабелях тепловлажностных процессов. Любая из охлаждающих систем по существу является воздушной. Лучшей из них будет такая, в которой предусмотрены наиболее благоприятные условия смены внутриштабельного воздуха.

6. В результате аналитических исследований процессов изменения состояния внутриштабельного воздуха вскрыты основные закономерности тепломассообмена в насыпи продукции, позволяющие оценить потери влаги за период хранения при изотермическом способе отвода энергии дыхания, обеспечиваемом гравитационной охлаждающей системой.

7. Трудности реализации гравитационной охлаждающей системы

заканчиваются в предупреждении большой неравномерности температурного поля в массе продукции и выборе максимально допустимых габаритов штабеля.

8. Аналитические и лабораторные исследования (с использованием методов моделирования), а также промышленные испытания показали, что применение боковых воздухо непроницаемых ограждений штабеля не может быть рекомендовано. Разрезные штабели обеспечивают более равномерное температурное поле, однако они приводят к уменьшению коэффициента использования внутреннего объема хранилища, укладывают штабелирование продукции. Наилучшие результаты получены при применении сплошных штабелей без воздухо непроницаемых укрытий.

9. Опыты показали, что при ширине штабеля (с продукцией в планчатой таре) до 4 м и высоте его 6-7 м максимальная неравномерность температурного поля не превышает 1°C .

10. При проектировании гравитационной охлаждающей системы может быть использована общепринятая методика расчета коэффициента теплопередачи батареи с прямым ребром (в условиях свободной конвекции) с учетом ее периодической оттайки один раз в месяц.

11. Наиболее благоприятные условия эксплуатации и автоматического регулирования гравитационной охлаждающей системы создается при применении промежуточного холодоносителя. Связанный с этим повышенный расход энергии компенсируется упрощенной системой воздухо распределения, не требующей применения вентиляторов.

12. В хранилище с гравитационной охлаждающей системой расщепленное размещение охлаждающих приборов между штабелями, а также отсутствие вентиляторов в 1,7-1,8 раза уменьшает усушку продукции. Организованная смена внутриштабельного воздуха при использовании гравитационных сил сводит к минимуму отпотевание продукции. По указанным причинам общие потери продукции за период

хранения снижаются в 2,0-2,5 раза, что свидетельствует о высокой технологической эффективности предложенной охлаждающей системы.

Основное содержание диссертации опубликовано в следующих работах:

1. Жадан В.З., Ивахнов В.И., Иващенко Б.П. Причины отпотевания и порчи сырья в овощехранилищах. "Консервная и овощесушильная промышленность", № 9, 1969.
2. Жадан В.З., Ивахнов В.И., Бычков А.А. Опыт кондиционирования воздуха при хранении моркови. "Консервная и овощесушильная промышленность", № 7, 1969.
3. Жадан В.З., Ивахнов В.И. Хранение моркови при увлажнении вентилирующего воздуха. Реферативный сборник ЦНИИТЭИпищепром, вып.5, М., 1970.
4. Жадан В.З., Ивахнов В.И. Использование гравитационных сил для вентилирования сырья в охлаждаемых овощехранилищах. Сб. "Холодильная техника и технология", вып.10, Киев, "Техніка", 1972.
5. Жадан В.З., Ивахнов В.И., Жук С.Г. Экспериментальное исследование охлаждающих систем овощехранилищ. Сб. "Холодильная техника и технология", вып.16, Киев, "Техніка", 1973.
6. Жадан В.З., Ивахнов В.И. Принципы создания охлаждающих систем для хранения "дышащих" продуктов при близ криоскопических температурах. Сб. "Тезисы докладов Всесоюзного симпозиума "Холодильная обработка и хранение скоропортящихся продуктов при близкриоскопических температурах", Ленинград, 1973.

Материалы диссертации доложены и обсуждены:

1. На республиканском научном семинаре и республиканской научной конференции по теплогазоснабжению и вентиляции. Киев, 1969.
2. На 41-й (1972г.) и 42-й (1973г.) научных конференциях ОТИХП, г.Одесса.
3. На научно-технической конференции "Молодые ученые и специалисты - научно-техническому прогрессу области", г.Одесса, 1972.
4. На Всесоюзном симпозиуме "Холодильная обработка и хранение скоропортящихся продуктов при близкриоскопических температурах", Ленинград, 1973.

БР 05029 29.01.74 г. Формат 60 x 84 1/16
Объем 2 п.л. Заказ № 375 Тираж 200 экз.
Городская типография управления по делам издательств,
полиграфии и книжной торговли Одесского облисполкома.

г. Одесса, Ленина, 49