

Автореферат
В65

проф. Чушаку И.Г.

ОДЕССКИЙ ИНСТИТУТ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ТЕХНИКИ И ЭНЕРГЕТИКИ

На правах рукописи

ВОЙТКО Александр Андреевич

УДК 621.565

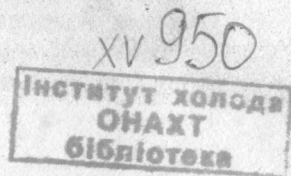
ТЕПЛОМАССОБМЕН ПРИ ЗАМОРАЖИВАНИИ ПЛОДОВ
И ОВОЩЕЙ ВО ФЛЮИДИЗАЦИОННЫХ АППАРАТАХ

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

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Одесса – 1989



Работа выполнена в Одесском институте низкотемпературной техники и энергетики

Научный руководитель - доктор технических наук,
профессор Чепурненко В.П.

Официальные оппоненты - доктор технических наук,
доцент Бурдо С.Г.
кандидат технических наук,
доцент Онищенко В.П.

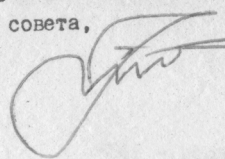
Ведущая организация - НПО "Консервпромкомплекс",
г.Одесса

Защита диссертации состоится 22 января 1989 г.
в "11.00" часов на заседании специализированного совета К.068.27.01
при Одесском институте низкотемпературной техники и энергетики
по адресу: 270057, г.Одесса, ул. Петра Великого 1/3, ОИНТЭ.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ОИНТЭ.

Автореферат разослан 22 декабря 1989 г.

Ученый секретарь
специализированного совета,
к.т.н., доцент


Р.К.Никольшин

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ.

Актуальность темы. Применение интенсивных методов холодильной обработки позволяет сохранить биологическую ценность, питательные и вкусовые качества плодов и овощей. Наиболее эффективно замораживание плодоовощного сырья во флюидизационных аппаратах. Сегодня в СССР подобное оборудование серийно не выпускается. Однако, проводимый нашей страной курс на сокращение вооружений позволяет включить в процесс технического перевооружения легкой и пищевой промышленности ряд предприятий Минавиапрома, Минрадиопрома и других "оборонных" министерств, известных своим высоким техническим уровнем, что позволяет создавать отечественную морозильную технику, не уступающую лучшим мировым образцам. Поэтому уже сегодня необходимо иметь надежные методики, позволяющие проектировать подобную технику, обеспечивая при этом ее высокий технико-экономический уровень. Существующие экспериментальные и расчетные данные не позволяют в полной мере оценить тепломассообменные процессы, протекающие в морозильных аппаратах, а следовательно, обеспечить надежность проектирования последних.

Цель работы. Основной целью работы является создание методик, программ и программных комплексов, имеющих как научное, так и прикладное значение, позволяющих моделировать реальные режимы работы флюидизационных морозильных аппаратов.

Задачи исследования. Цель достигается решением следующих задач:

- проведение анализа существующих теорий, гипотез и методик расчета процессов тепломассообмена в охлаждающих приборах холодильных станков, а также в технологических узлах (лотках, конвейерах) флюидизационных морозильных аппаратов при замораживании плодоовощной продукции;
- разработка и создание программных комплексов, имитирующих работу технологических и воздухоохлаждающих узлов морозильного аппарата;
- исследование разработанных комплексов при имитации работы узлов морозильных аппаратов в широком диапазоне изменения тепловлажностных характеристик воздушного потока;
- проверка и корректировка (при необходимости) разработанных математических моделей по результатам экспериментальных работ других авторов;
- разработка на базе моделей отдельных узлов имитационной математической модели сложной технической системы - морозильного аппарата.

Научная новизна. Разработана математическая модель теплообменной секции флюидизационного морозильного аппарата, позволяющая имитировать процессы теплообмена и инеобразования на лучках обрешенных труб при переменных значениях температур, относительной влажности и скорости воздушного потока. Получено численное решение задачи замораживания сфе-

рической частицы продукта на конвейере (лотке) морозильного аппарата . Предложена "кристаллическая" модель инееобразования , позволяющая учесть влияние условий формирования инея на его теплопроводность. Произведена качественная и количественная оценка процесса инееобразования в охлаждаемом воздушном потоке. Создана имитационная математическая модель сложной технической системы - морозильного аппарата.

Основные научные положения, защищаемые в работе :

- соотношение между массой и площадью поверхности инея однозначно зависит от разности влагосодержаний воздуха в ядре потока и у поверхности теплообмена;

- закономерность распределения инея по поверхности пучков оребренных труб и количество кристаллической влаги, выносимое из воздухоохладителя, в большей степени определяются интенсивностью охлаждения и осушения влажного воздуха на каждом отдельном ряду пучка, а не влиянием шероховатости инея и механическим стрывом его от теплообменной поверхности.

Наиболее существенным новым научным результатом является разработанный программный комплекс, позволяющий имитировать теплообмен на пучках оребренных труб воздухоохладителей в условиях, характерных для эксплуатации реальных морозильных аппаратов (диапазон температур $-40 \dots 0^{\circ}\text{C}$, относительной влажности $70 \dots 100\%$, скорости воздушного потока $2 \dots 8 \text{ м/с}$ и дающий возможность с точностью до 25% (в пределах погрешности натурального эксперимента) производить количественную оценку процесса инееобразования на поверхности теплообмена и в воздушном потоке при замораживании различных видов плодов и овощей.

Практическая ценность работы. Предлагаемые программные комплексы могут быть использованы для расчетов реальных режимов работы фреонизационных морозильных аппаратов, а также при проектировании и программировании микропроцессорных систем управления технологическими процессами холодильной обработки различных видов плодов и овощей. Использование методов структурного программирования позволило обеспечить гибкость программных комплексов, универсальность и взаимозаменяемость отдельных элементов. Наличие подпрограмм контроля исходных данных, локализации ошибок счета и аварийных ситуаций позволяет использовать разработанные комплексы без каких-либо переделок при проведении инженерных расчетов. Программы ориентированы на неподготовленного пользователя.

Ранняя версия комплекса была использована при разработке секции морозильного аппарата для НПО "Нектар" (г.Кишинев), ожидаемый экономический эффект - 41 тыс.руб./год на один аппарат), а также при проектировании рассольных воздухоохладителей для Жовтневого ОРПК г.Одессы. Изготовлено 15 аппаратов, общий экономический эффект от внедрения состав-

ляет 15 тыс.руб./год .

Публикации. По материалам диссертации опубликовано 7 печатных работ. Получено положительное решение на I заявку на изобретение.

Апробация работы. Результаты проведенной работы частично докладывались на Всесоюзной научно-практической конференции "Искусственный холод в отраслях агропромышленного комплекса", г.Кишинев (1987 г.); на научно-технической конференции "Инженерные методы и технические решения по использованию естественного холода на предприятиях Агропрома", г.Братск, (1988 г.); на УП Республиканской конференции "Повышение эффективности, совершенствование процессов и аппаратов химических производств", г.Львов (1988 г.); на XI Lebensmitteltechnischen Kolloquium, ГДР, г.Кетен, (1988 г.); на Всесоюзной научно-практической конференции "Пути интенсификации производства с применением искусственного холода в отраслях агропромышленного комплекса, торговли и на транспорте", г.Одесса (1989 г.); на научно-технических конференциях профессорско-преподавательского состава и научных сотрудников Одесского технологического института холодильной промышленности (1986, 1989 гг.).

Структура и объем диссертации. Работа состоит из введения, четырех глав, выводов, списка использованной литературы и приложений. Диссертация содержит 127 страниц машинописного текста, 3 таблицы, 52 рисунка. Библиография включает 129 названий.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ.

Во введении обоснована актуальность исследований, сформулированы цель и задачи, изложены основные научные и практические результаты.

В первой главе проводится анализ большого числа работ отечественных и зарубежных исследователей по экспериментальному изучению и моделированию процессов теплообмена во фреонизационных морозильных аппаратах, наиболее существенными из которых являются: замораживание плодовоовощного сырья в "кипящем" слое и теплообмен в секции охлаждения воздуха при непрерывном инееобразовании. Имеющиеся в литературе зависимости и методики, позволяющие оценить интенсивность указанных процессов, приводятся для конкретных, как правило идеализированных, условий проведения натурального или вычислительного эксперимента. Это объясняется сложным, нелинейным характером исследуемых явлений. Получение аналитических решений для подобных задач либо крайне затруднительно, либо вообще невозможно.

В данной работе использованы методы имитационного математического моделирования с использованием ЭВМ. Сущность указанных методов заключается в отображении реального технического устройства (с максимально возможной степенью учета подробностей) совокупностью компьютерных программ,

каждая из которых описывает определенную функцию исследуемого объекта. Так как в различных точках реальной технической системы процессы протекают параллельно (одновременно), а большинство современных вычислительных устройств способно обрабатывать лишь последовательные потоки информации, то в комплекс программ необходимо включить модули, организующие квазипараллельную работу компонентов имитационной модели. Разработанные комплексы программ включают модули различного назначения: ввода - вывода информации, координирующие, расчетные и контрольные.

Во второй главе рассматриваются вопросы моделирования процессов теплообмена при замораживании плодосовной продукции на конвейере или лотке морозильного аппарата в псевдооживленном слое. Поток продукта на конвейере разбивается на N зон (по ходу движения продукта) и M слоев (по ходу движения воздуха). Значения температуры, относительной влажности и скорости воздуха (ТВС), подаваемого под конвейер, температуры поверхности частиц продукта в пределах отдельной зоны принимались неизменными в течение малого интервала времени $\Delta\tau$. При взаимодействии с продуктом в j -ом слое i -ой зоны воздушный поток подогревается и увлажняется:

$$\Delta Q_{ij} = \alpha_k \cdot \xi_{пр ij} \cdot F_{ij} \cdot (t_{вex ij} - t_{пр ij}) \cdot \Delta\tau \quad (1)$$

$$\Delta M_{ij} = \frac{\Delta Q_{ij}}{L \cdot \xi_{пр ij}} \cdot (\xi_{пр ij} - 1) \cdot \Delta\tau \quad (2)$$

где коэффициент влаговыделения продукта $\xi_{пр ij}$ определялся по уравнению Бекстрема, параметризованному по результатам экспериментов Астрема и Беке.

Тогда для конвейера в целом можно записать:

$$\Delta Q = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \Delta Q_{ij} \quad \Delta M = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \Delta M_{ij} \quad (3)$$

Определим теплофизические характеристики воздушного потока, выходящего из слоя продукта (после смешения потоков из отдельных зон):

$$h_{вex} = h_{вex} + \frac{\Delta Q}{G_s \cdot \Delta\tau} \quad d_{вex} = d_{вex} + \frac{\Delta M}{G_s \cdot \Delta\tau} \quad (4)$$

Определение температуры и относительной влажности выходящего воздуха по известным значениям энтальпии и влагосодержания осуществляет программный модуль ARTMFI. Обратное преобразование производит программный модуль ARENVL. Приведенные выше зависимости входят в состав расчетных и координирующих подпрограмм LOTOK, ZONA, SLOY, CSIPR.

При получении численного решения задачи замораживания частицы про-

дукта сферической формы использовался метод контрольных объемов с внутренними источниками тепла. Исходная частица продукта разбивалась на десять концентрических слоев равной толщины при условии равномерного начального распределения температур. Затем определялась масса каждого слоя. Именно масса, а не размер, далее, при моделировании фазового перехода, являлась опорной характеристикой слоя, так как вымораживание внутриклеточной влаги сопровождается изменением объема частицы на 5 ... 8 %.

Использовались следующие предположения:

- конвективная составляющая коэффициента теплоотдачи с поверхности частицы неизменна в течение всего цикла замораживания;
- полная величина коэффициента теплоотдачи с поверхности меняется в соответствии с изменением коэффициента влаговыделения;
- пренебрегаем влиянием процессов диффузии влаги в продукте;
- пренебрегаем изменением линейного размера частицы при усушке.

Количество теплоты, отведенное с поверхности частицы продукта за $\Delta\tau'$:

$$\Delta Q_{(1 \rightarrow 2)} = \left(\frac{1}{\alpha_{\Sigma}} + \frac{\Delta X_1}{2 \lambda_1} \right)^{-1} \cdot f_1 \cdot (t_1 - t_b) \cdot \Delta\tau' \quad (5)$$

Количество теплоты, передаваемое из $(k+1)$ слоя в k слой за $\Delta\tau'$:

$$\Delta Q_{(k+1 \rightarrow k)} = 2 \cdot \left(\frac{\Delta X_k}{\lambda_k} + \frac{\Delta X_{k+1}}{\lambda_{k+1}} \right)^{-1} \cdot f_{k+1} \cdot (t_{k+1} - t_k) \cdot \Delta\tau' \quad (6)$$

Суммарное количество теплоты, отведенное от k слоя за $\Delta\tau'$:

$$\Delta Q_k = \Delta Q_{(k \rightarrow k-1)} - \Delta Q_{(k+1 \rightarrow k)} \quad (7)$$

Если температура k слоя выше температуры точки начала замерзания (криоскопической), то отвод тепла вызовет понижение его температуры:

$$t_{k_k} = t_{k_n} - \frac{\Delta Q_k}{C_k \cdot \Delta m_k} \quad (8)$$

Если температура ниже криоскопической, то отвод тепла частично влияет на понижение температуры, частично - на вымораживание влаги.

В этом случае, с учетом известной зависимости Рауля, значение температуры k слоя по истечении $\Delta\tau'$ можно определить, решив квадратное уравнение:

$$t_{k_k}^2 + \left[\frac{\Delta Q_k}{C_k \cdot \Delta m_k} - t_{k_n} - \frac{L \cdot t_{кр} \cdot \omega_w}{C_k \cdot t_{k_n}} \right] \cdot t_{k_k} + \frac{L \cdot t_{кр} \cdot \omega_w}{C_k} = 0 \quad (9)$$

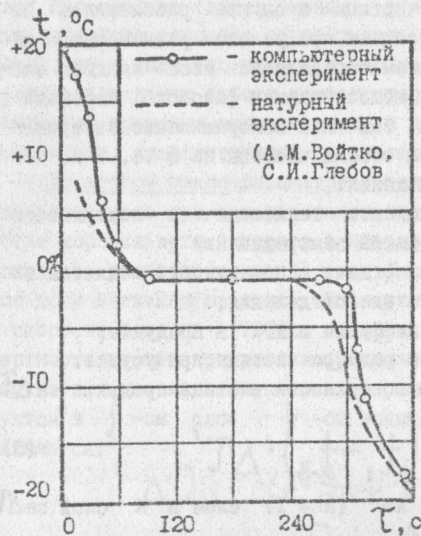


Рис.1. Температура в центре частицы продукта (горошек)

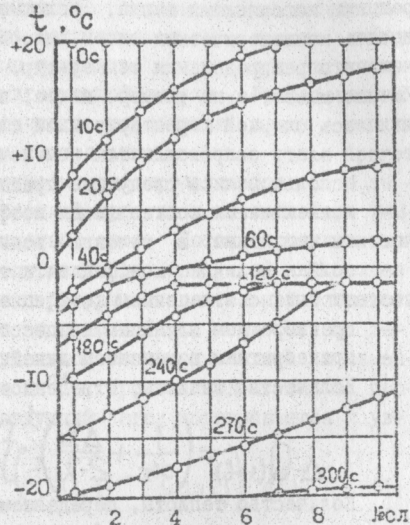


Рис.2. Распределение температур в частице (горошек)

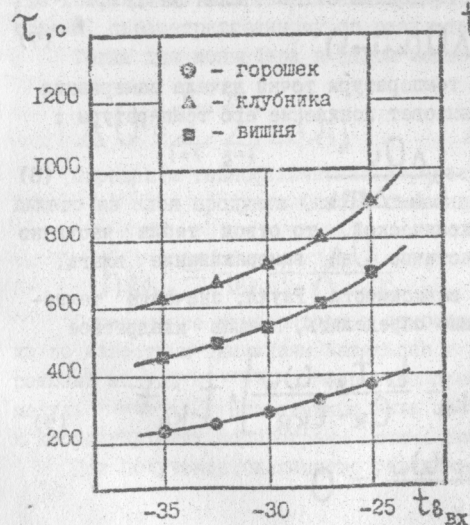


Рис.3. Время замораживания при $t_{н} = +20^{\circ}\text{C}$; $t_{к} = -18^{\circ}\text{C}$

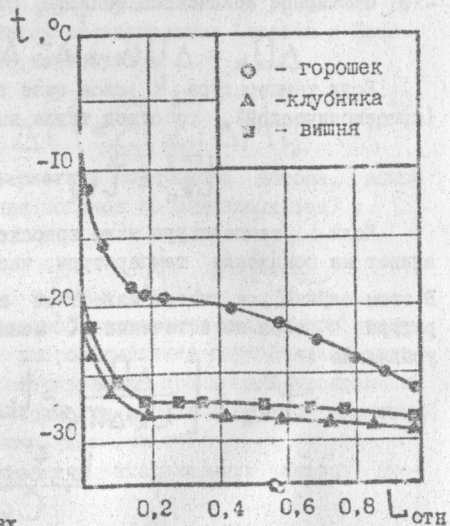


Рис.4. Температура выходящего воздуха по длине конвейера

Приведенные зависимости использовались при разработке программных модулей ВОДУ и PLAST. Управление временными интервалами, коррекция теплофизических и геометрических характеристик частицы продукта осуществлялась подпрограммами PRDUC, PRDKT1, PRDKT2, FEMPR1, FEMPR2.

Всего в состав данного программного комплекса входит 21 модуль.

Было проведено более 100 компьютерных экспериментов для клубники, вишни и зеленого горошка. Расчеты хорошо согласуются с результатами натуральных экспериментов. Часть результатов приведена на рисунках.

Третья глава посвящается вопросам моделирования процессов теплообмена и инееобразования на одиночном ряду оребренных труб. Значения ТВС воздушного потока принимались неизменными в течение всего времени работы ряда труб. Значения коэффициентов конвективной теплоотдачи со стороны воздуха определялись по известной зависимости Э.С.Карасиной. Учитывался тот факт, что определяющий вклад в общее термическое сопротивление ребристого элемента вносит слой инея. Аэродинамические характеристики ряда труб рассчитывались по методикам А.А.Тоголина, В.Ф.Кудина и др. Влияние влаговываждения на общий коэффициент теплоотдачи со стороны воздуха определялось по формуле Меркеля. Если относительная влажность входящего воздуха превышала 100% (туман), то использовалась несколько измененная зависимость:

$$\xi = 1 + \frac{(d_8'' - d_u'') \cdot L}{(1006 - 1870 \cdot d_8'' + C_k \cdot (d_8'' - d_u'')) \cdot (t_8 - t_u)} \quad (10)$$

Считалось, что избыточная влага находится в капельной форме при $t_8 > 0^{\circ}\text{C}$ и в кристаллической форме при $t_8 < 0^{\circ}\text{C}$. При определении температуры инея в качестве опорной Б.Т.Мариняк рекомендует принимать температуру точки росы входящего воздуха:

$$t_u = t_{\text{р}} - \Delta t_u \quad (11)$$

Значение $\Delta t_u = \gamma(\varphi_8)$ определялось при параметризации модели по результатам натурального эксперимента М.Н.Чепурного, В.И.Ломанина и др.

Особое внимание было уделено разработке "кристаллической" модели инееобразования.

Процесс выпадения инея можно условно разбить на две основные стадии:

- формирование игольчатых кристаллов и рост их до достижения определенной равновесной разности между температурой точки росы воздуха и температурой торцевой грани кристалла (разгонная стадия процесса инееобразования);

- дальнейший рост игольчатых кристаллов, либо формирование дендритных структур, в зависимости от условий инееобразования, при установившемся значении разности температур, определенной выше (квазистационарная стадия процесса инееобразования, характеризующаяся постоянством термического сопротивления слоя инея и стабилизацией тепловых характеристик обремененной поверхности).

Особый интерес представляет начальный момент образования инея. Предполагалось, что формирование центров инееобразования на поверхности теплообмена носит статистический характер и определяется степенью насыщения воздуха парами воды. Центры инееобразования возникают на поверхности теплообмена после достижения ею температуры точки росы. По мере понижения температуры поверхности до рабочей, количество центров увеличивается, а затем стабилизируется. Формирование вторичных (и более высокого порядка) центров инееобразования включается в процесс роста кристалла. Форма кристалла, разумеется упрощенная, представлена на рис.5, в равной степени присуща как базовому кристаллу, так и его отдельным фрагментам. Поскольку площадь поверхности тела столь сложной формы определить не удастся, то при построении модели форму кристалла можно значительно упростить, оставив лишь зависимость между объемом (массой) кристалла и его высотой. В пользу этого упрощения свидетельствует и тот факт, что по мере роста инея соседние кристаллы "встречаются", искажая форму друг друга. Упрощая, приведем кристаллы к фигурам вращения, для которых:

$$V = A \cdot h^n \quad (12)$$

Если показатель степени $n = 1$, это - цилиндр, 2 - параболоид вращения, 3 - конус. Воспользуемся закономерностями, полученными в экспериментальных работах (Б.К.Ямнель, В.С.Иванова, М.Н.Чепурной, В.Н.Ломакин, Д.Е.Уайт, К.Д.Кремерс и др.) (см.рис.6).

Были разработаны и исследованы (более 200 компьютерных экспериментов) ФОРТРАН-программы для указанных фигур. Все упомянутые закономерности были воспроизведены при работе "параболоидной" модели.

В работах Уайта, Кремерса, Чепурного, Ломакина приводятся экспериментально полученные и теоретически обоснованные зависимости для определения толщины и массы инея в произвольный момент времени:

$$\delta_{и} = B_2 \cdot \tau^{0,5} \quad m_{и} = B_1 \cdot \tau \quad (13)$$

где

$$B_1 = \gamma_1(\varphi_0, t_0, t_{cr}, \omega_0) \quad B_2 = \gamma_2(\varphi_0, t_0, t_{cr}, \omega_0) \quad (14)$$

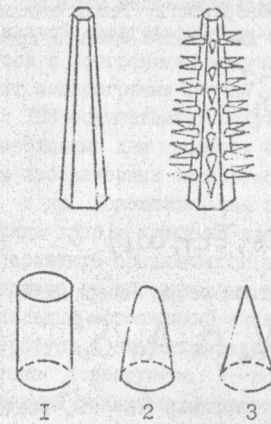


Рис.5. Кристалл инея и его представление в модели

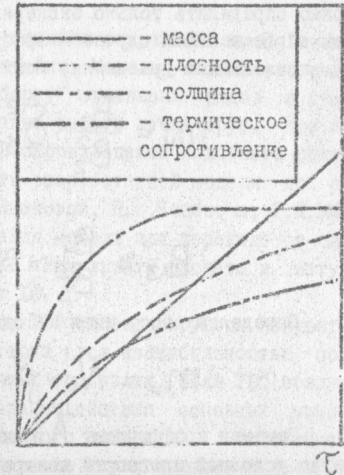


Рис.6. Основные характеристики слоя инея

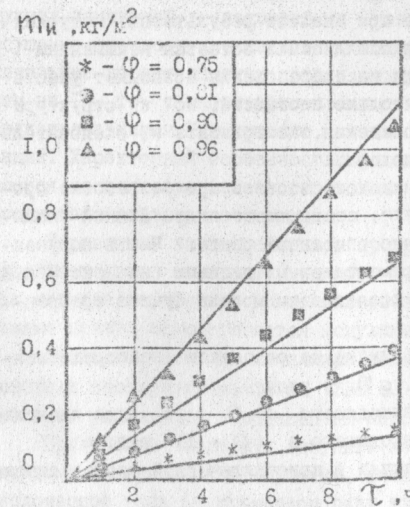


Рис.7. Удельная масса слоя инея
Одиночный ряд труб (BOГ)

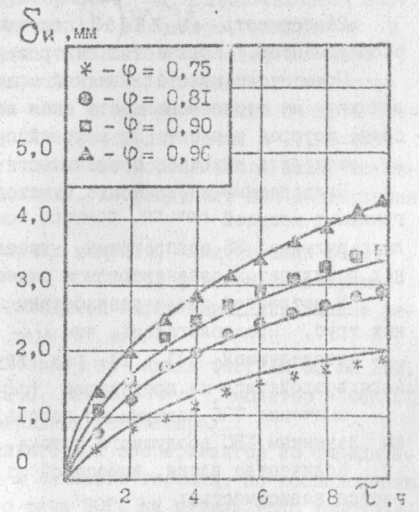


Рис.8. Толщина слоя инея
Одиночный ряд труб (BOГ)
Сплошной линией на рис. 7 и 8 представлены результаты натурального эксперимента (М.Н.Чепурной, В.Н.Ломакин и др.) для соответствующих режимов.

можно определить только экспериментально для конкретного типа теплообменной (в частном случае - оребренной) поверхности. Решив относительно τ приведенные уравнения, можно записать для любого момента времени:

$$m_{и} = \frac{B_1}{B_2} \cdot \delta_{и}^2 = B_3 \cdot \delta_{и}^2 \quad (15)$$

где

$$B_3 = \frac{B_1}{B_2} = \gamma_3 (\varphi_8, t_8, t_{ст}, \omega_8) \quad (16)$$

Определим массу инея на одном квадратном метре поверхности:

$$m_{и} = N_{ц} \cdot \rho_{л} \cdot V_{и} = N_{ц} \cdot \rho_{л} \cdot A_{п} \cdot \delta_{и}^2 \quad (17)$$

Заменяя коэффициент $A_{п}$ константой, например $A'_{п} = 10^{-5}$, введем понятие условной плотности центров инеобразования:

$$N'_{ц} = N_{ц} \cdot A_{п} / A'_{п} \quad (18)$$

Зависимость $N'_{ц} = \gamma(\Delta d)$ получена при анализе результатов натуральных экспериментов. Количество центров кристаллизации остается неизменным!

Применение кристаллической модели инеобразования позволяет учесть влияние на теплопроводность инея не только плотности, но и структуры слоя, которая зависит от условий проведения эксперимента и, следовательно, расширить диапазон применимости модели.

Приведенные зависимости и методики использованы при разработке программных модулей `ADPLCR`, `CONVEC`, `СВЕТР`, `СВІ`, `FROST` и др. Данный комплекс включает 35 подпрограмм, частично описанных ранее. Часть полученных результатов сравниваются с экспериментальными данными на рис.7 и 8.

В четвертой главе разработаны и исследованы модели пучков оребренных труб. Предполагалось, что:

- последующий $(n+1)$ ряд труб пучка не оказывает непосредственного воздействия на предыдущие $(1 \dots n)$ ряды;
- значения ТВС воздушного потока, выходящего из n -го ряда идентичны значениям ТВС воздушного потока, входящего в $(n+1)$ ряд;

Количество влаги, выносимой из пучка в кристаллической форме, оценивается зависимостью:

$$M_{ин} = G_8 \cdot (d_{ввых}|_{\varphi>1} - d''_{ввых}) \quad (19)$$

Все процессы моделировались с учетом законов сохранения массы и энергии для каждой пространственно-временной ячейки. Модель отдельного ряда реализуется в программном модуле `COM`. "Сборку" отдельных рядов в пучок производит подпрограмма `СМРМ`. Моделирование работы пучка труб при стационарных ТВС осуществляет модуль `РЧЯК1`. Воспроизведение подобного режима работы необходимо для проверки адекватности разработанной модели по результатам лабораторных экспериментов В.С.Ивановой, Н.С.Конанова, Г.К.Мнацаканова и др. Дополнительная параметризация модели при переходе от одиночного ряда труб к пучку не производилась! Результаты расчета и натурального эксперимента сравниваются на рис. 9 и 10.

В отличие от лабораторных условий, где ТВС стабилизируются искусственно, реальный морозильный аппарат характеризуется нестабильностью полей температуры и влагосодержания в различных его узлах. Поля ТВС воздушного потока формируются в результате взаимодействия основных компонентов сложной технической системы (морозильного аппарата): теплообменной секции, нагнетателя и конвейера. Определение характеристик отдельных узлов осуществляется для квазистационарного режима работы в течение интервала времени $\Delta \tau$.

После "запуска" порция воздуха претерпевает последовательность следующих изменений: подогрев и увлажнение в конвейере, охлаждение и осушение в воздухоохладителе, подогрев в блоке нагнетателей. Если начальные характеристики порции воздуха отличаются от конечных не более чем на 1%, то температурно-влажностное поле в аппарате можно считать стабилизировавшимся. Как правило, стабилизация происходит после 3...6 итераций. Характерной особенностью флюидизационного морозильного аппарата является постоянство массового расхода воздуха, необходимого для поддержания продукта в впитавшем состоянии.

Управление взаимодействием программных модулей, имитирующих работу отдельных узлов аппарата (`СМРМ`, `CONVEY`, `VENTIL`), формирование временных интервалов, формирование массивов выводимой информации, управление режимами печати осуществляется модулями `MAIN` и `SMA`.

Основная версия комплекса реализована на языке ФОРТРАН ОС ЕС ЭВМ. Комплекс эксплуатировался на ЭВМ ЕС 1060, режим - `svs`, монитор - "ФОРКС". Возможна реализация комплекса на персональных компьютерах.

Приложения содержат листинги компьютерных экспериментов по флюидизационному замораживанию клубники, вишни и зеленого горошка, по исследованию теплообмена на одиночном ряду труб типа ВОГ, на пучках труб конструкции В.С.Ивановой и воздухоохладителей типа ВСМ.БЛП, работающих при стационарных условиях и в условиях морозильного аппарата. Представлены документы, подтверждающие внедрение результатов настоящей диссертационной работы.

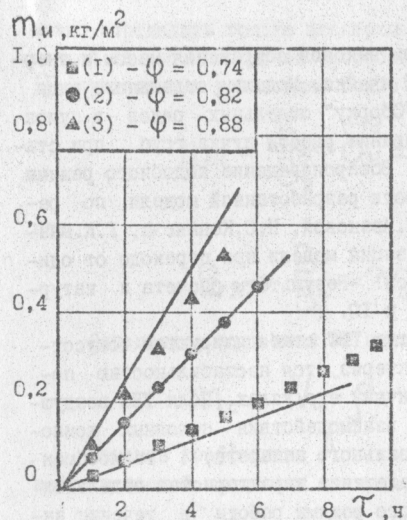


Рис.9. Удельная масса слоя инея (средняя). Пучок конструкции

Пучок конструкции В.С.Ивановой ($W = 6 \text{ м/с}, t_0 = -8 \dots -10^\circ\text{C}, t_g = 0^\circ\text{C}$)

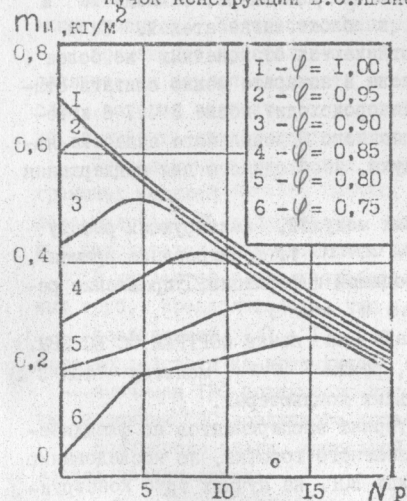


Рис.11. Характер распределения инея по пучку типа ВСМ.БЛП

($\tau = 10 \text{ ч}, W_g = 4 \text{ м/с}, t_0 = -20^\circ\text{C}, t_g = -10^\circ\text{C}$)

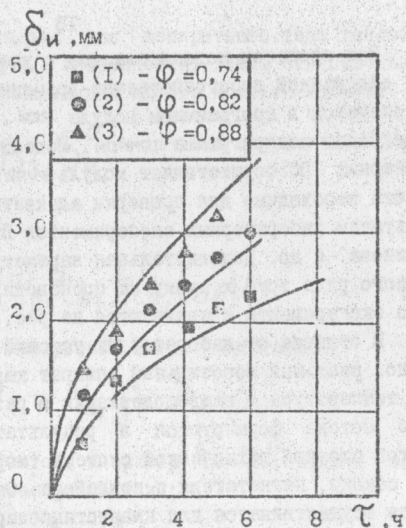


Рис.10. Толщина слоя инея (средняя)

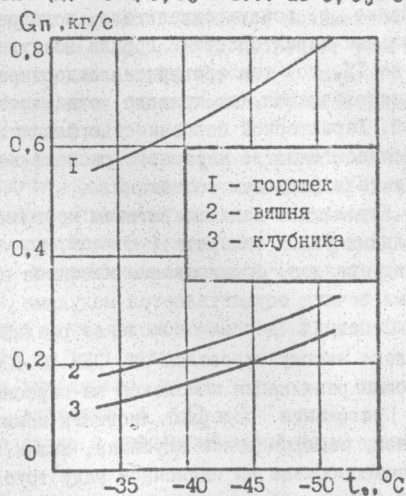


Рис.12. Производительность морозильного аппарата

(секция типа ВСМ.БЛП 500 м^2)

ВЫВОДЫ

1. Разработанные программные комплексы позволяют имитировать работу конденсера (лотка) флюидизационного морозильного аппарата, одиночного ряда и пучка оребренных труб (при стационарных ТВС), а также работу морозильного аппарата в целом. Комплексы реализованы на ФОРТРАНе.
2. Полученное численное решение задачи замораживания частицы продукта сферической формы позволяет получить отклонение расчетных значений длительности замораживания для клубники, вишни и зеленого горошка от экспериментальных точек в пределах погрешности натурального эксперимента (15%).
3. Разработанная "кристаллическая" модель инеобразования позволяет учесть влияние структуры инея на теплопроводность, а также дает возможность моделировать "разгонный" участок процесса инеобразования.
4. Закономерности изменения массы, толщины, плотности и термического сопротивления образующегося слоя инея, полученные в имитационном эксперименте для одиночного ряда оребренных труб, полностью подтверждаются экспериментальными данными для поверхностей, характеризующихся незначительной протяженностью в направлении движения воздушного потока (пластина, одиночное ребро, одиночный ряд оребренных труб).
5. Характер указанных закономерностей, полученных в имитационном эксперименте для пучков оребренных труб, также подтверждается экспериментально полученными зависимостями для поверхностей, характеризующихся значительной протяженностью в направлении движения воздушного потока (пучки оребренных труб, профилированные каналы). Количественные расхождения результатов компьютерных и натуральных экспериментов по определению толщины и массы осевшего инея не превышают 25%.
6. Характер распределения инея по пучку однозначно определяется соотношением интенсивности процессов тепло- и массообмена на каждом ряду пучка. В случае 100% относительной влажности входящего воздуха максимум массы осевшего инея приходится на первый ряд. При понижении относительной влажности воздуха максимум смещается вглубь пучка и, при определенных условиях, может приходиться на последний ряд.
7. Предложенная методика позволяет расчетным путем производить количественную оценку массы кристаллической влаги, выносимой из воздушного потока потоком воздуха.
8. Разработанные комплексы программ, отдельные подпрограммы и методики могут быть рекомендованы для проведения компоновочных, тепловых и аэродинамических расчетов пучков труб с оребрением типа ВОГ и ВСМ.БЛП, работающих в условиях инеобразования при изменяющихся произвольным образом ТВС в диапазоне температур $-40 \dots 0^\circ\text{C}$, относительной влажности $70 \dots 100\%$, скорости воздушного потока $2 \dots 8 \text{ м/с}$, а также могут быть использованы при программировании микропроцессорных систем управления флюидизационными морозильными аппаратами.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ.

1. Чепурненко В.П., Шевченко В.Э., Войтко А.А. "Зимний" режим работы холодильной установки с конденсатором воздушного охлаждения // Тезисы докладов научно-технической конференции "Инженерные методы и технические решения по использованию естественного холода на предприятиях Агропрома". - Братск, БИИ, 1988, с. 8.

2. Чепурненко В.П., Шевченко В.Э., Войтко А.А. Оптимизация конденсаторов аммиака воздушного охлаждения // Тезисы докладов Всесоюзной научно-практической конференции "Искусственный холод в отраслях агропромышленного комплекса", - Кишинев, ГКНТ СССР, - 1987, с. 85.

3. Чепурненко В.П., Шевченко В.Э., Войтко А.А. Математическое моделирование и оптимизация аппаратов воздушного охлаждения для конденсации аммиака // Тезисы УП Республиканской конференции "Повышение эффективности, совершенствование процессов и аппаратов химических производств". - Львов, АН УССР, - 1988, часть II, с. 49.

4. Чепурненко В.П., Бельченко В.М., Войтко А.А. Модульные аммиачные воздухоохладители с биметаллической оребренной поверхностью // Тезисы УП Республиканской конференции "Повышение эффективности, совершенствование процессов и аппаратов химических производств". - Львов, АН УССР, - 1988, часть I, с. 94 - 95.

5. Математическая модель работы поверхностного воздухоохладителя в условиях интенсивного инееобразования. В.М. Бельченко, А.А. Войтко, С.В. Холод и др. Информационный листок о научно-техническом достижении № 88 - 097. - Одесса, ОЦНТИ, - 1988, 4 с.

6. Войтко А.А., Чепурненко В.П., Войтко А.М. Исследование математической модели конвейера скороморозильного аппарата с псевдоожженным слоем продукта // Тезисы Всесоюзной научно-практической конференции "Пути интенсификации производства с применением искусственного холода в отраслях агропромышленного комплекса, торговле и на транспорте". - Одесса, ГКНТ СССР, - 1989, секция УП, с. 63.

7. Разработка и исследование диалогового комплекса программы, имитирующей работу пучка оребренных труб в условиях инееобразования. А.А. Войтко, В.П. Чепурненко, В.М. Бельченко, А.Н. Стогнийчук // Тезисы Всесоюзной научно-практической конференции "Пути Интенсификации производства с применением искусственного холода в отраслях агропромышленного комплекса, торговле и на транспорте". - Одесса, ГКНТ СССР, - 1989, секция II, с. 21

ОБОЗНАЧЕНИЯ

Q - отведенное тепло, Дж; M - усушка, кг; α - коэффициент теплоотдачи, Вт/(м²К); F, f - площадь, м²; t - температура °С; L - удельная теплота таяния льда, Дж/кг; d - влагосодержание воздуха, кг/кг; h - энтальпия, Дж/кг; G - массовый расход, кг/с; λ - коэффициент теплопроводности, Вт/(м К); x - толщина слоя, м; ω - влагосодержание продукта, кг/кг; Δm - масса слоя, кг; C - удельная теплоемкость, Дж/(кг.К); ρ - плотность, кг/м³; φ - относительная влажность; A - константа; f - функция.

ИНДЕКСЫ

i - зона; j - слой (конвейер); k - слой (частица); Σ - суммарный; v - воздух; $пр$ - продукт; w - вода; $л$ - лед; $к$ - конвективный, конечный; $н$ - начальный; $вх$ - входящий; $вых$ - выходящий; $кр$ - криоскопический; p - точка росы.

Ротапульт ОИНТЭ г. Одесса. Подписано к печати 19.12.89.

БР 03405. Объем 1,0 п.л. Тираж 100. Заказ 1500-89.