

Автореферат
0-56

ОДЕССКИЙ ИНСТИТУТ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ТЕХНИКИ И ЭНЕРГЕТИКИ

На правах рукописи

Сльшамовский Вадим Степанович

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ВАКУУМ-СУБЛИМАЦИОННОЙ
СУШКИ В УСТАНОВКАХ НЕПРЕРЫВНОГО ДЕЙСТВИЯ

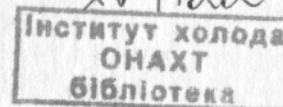
Специальности: 05.04.03 - Машины и аппараты холодильной
и криогенной техники и систем
кондиционирования;

05.18.12 - Процессы, машины и агрегаты
пищевой промышленности

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Одесса - 1991



Работа выполнена в Одесском институте низкотемпературной техники и энергетики.

Научный руководитель - кандидат технических наук, профессор ПАРЦХАЛАДЗЕ Э.Г.

Научный консультант - кандидат технических наук ВОСКОБОЙНИКОВ В.А.

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор ОСТАПЧУК Н.В.

кандидат технических наук, ст. н.сотр. ЧЕРНОЗУБОЗ А.М.

Будущая организация: НПО "Нектар" (г.Кишинев)


Защита диссертации состоится " 24 " ИЮНЯ 1991 г. в 11.00 часов на заседании специализированного совета К.68.27.01 Одесского института низкотемпературной техники и энергетики по адресу: 270100, г.Одесса, ул.Петра Великого, 1/3, ОИНТЭ.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке института.

Автореферат разослан " 22 " МАЯ 1991 г.

Ученый секретарь
специализированного совета,
кандидат наук, доцент

№ 10-8 м, определяется
длина
микрометровых
критерий

 К. НИКУЛЬШИН

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Создание и освоение новой техники для комплексной переработки сельскохозяйственного сырья с использованием передовой технологии, является актуальной задачей народного хозяйства. Вакуум-сублимационная сушка (ВСС) как метод качественного консервирования, основанный на низкотемпературном обезвоживании продуктов и позволяющий наиболее полно сохранить биологически активные и питательные вещества, содержащиеся в исходном сырье, особенно перспективна, в частности - для получения высококачественных пищевых порошков, натуральных красителей, биологических и медицинских препаратов. Эффективность производства сублимированных продуктов определяется также снижением затрат на хранение, не требующее использования холода, снижением транспортных расходов при перевозках за счет уменьшения массы продукта в результате сушки в 4-10 раз, упрощением системы реализации.

В мировой практике производство сублимированных продуктов интенсивно развивается. Его развитие обеспечивается расширением выпуска технологического оборудования известными фирмами: "Крио-Мейд", "Стокс", "Лейбольд", "Халл", "Атлас", "Юзефруа" и др. Выпускаемые ими сублимационные установки в основном периодического действия. Подобные установки, но в небольших масштабах, производятся и используются в СССР. Для них характерны значительные затраты ручного труда, сложность контроля и регулирования процесса сушки, неравномерная влажность по объему готового продукта. Высока стоимость сублимированных продуктов, что является фактором, сдерживающим развитие сублимационной сушки.

Перспективы развития сублимационной техники связаны с переходом к установкам поточно-циклического и непрерывного действия и повышением эффективности сублимационного оборудования за счет интенсификации энергоподвода к продукту. В СССР вакуум-сублимационные установки (ВСУ) непрерывного действия не производятся и нет опыта их проектирования. Эти обстоятельства делают актуальным исследование процесса ВСС продуктов в подвижном слое и разработку сублимационной установки непрерывного действия с вращающимся сублиматором.

Цель работы состоит в исследовании процесса сублимационной сушки предварительно замороженных и гранулированных жидких и порообразных продуктов и разработке ВСУ, в которой реализуется процесс сушки в подвижном слое с полной деструкцией гранул и удалением сухих частиц из зоны сублимации.

В соответствии с поставленной целью были определены следующие основные задачи работы:

1. Экспериментально исследовать процесс ВСС в подвижном слое с отделением сухого продукта и удалением его из зоны сублимации:
 - разработать принцип организации непрерывного процесса сушки в сублимационной установке барабанного типа;
 - исследовать основные закономерности процесса ВСС с непрерывным отделением высохшего слоя и удалением его из зоны сублимации;
 - выявить возможность получения непосредственно в сублиматоре сухого порошка из различного плодовоовощного сырья;
 - определить оптимальные технологические режимы сублимационной сушки растительного сырья.

2. Создать математические модели процессов ВСС с механической деструкцией гранулированных продуктов и получить численные решения для заданных технологических параметров.

3. Разработать на основе проведенных исследований промышленную ВСУ непрерывного действия с сублиматором барабанного типа.

Научная новизна работы. Разработаны принципы организации непрерывного процесса ВСС в подвижном слое с отделением сухого продукта и удалением его из зоны сублимации. Экспериментально определены режимы сушки, обеспечивающие максимальную интенсивность тепло- и массообмена и высокое качество готового продукта. Созданы математические модели процессов ВСС в подвижном слое с деструкцией гранул. Созданы научные основы проектирования ВСУ с сублиматором барабанного типа. Разработана промышленная установка непрерывного действия с вращающимся сублиматором.

Научные положения, защищаемые в работе:

1. Во вращающемся сублиматоре осуществляется режим сублимационной сушки в тонком слое при постоянных значениях сопротивлений тепло- и массообмену и уровне энергоподвода.

2. Максимально достижимый уровень энергоподвода при заданной температуре греющей поверхности, а следовательно, и интенсивность удаления влаги из продуктов, зависят от частоты вращения барабана и его удельной загрузки. Существует определенная частота вращения (интервал частот) при которой обеспечивается наибольшая интенсивность тепло- и массообмена, обусловленная совместным действием таких факторов, как продолжительность контакта частицы с греющей поверхностью, порозность псевдооживленного слоя, истирание высохшего слоя.

3. В процессах вакуум-сублимационной сушки деструкция поверхностного слоя гранул замороженного продукта оказывает существенное влияние на скорость сублимации при наличии эффекта реконденсации паров влаги и не зависит от её первоначального распределения в капиллярнопористой структуре.

Практическая ценность определяется следующими основными результатами:

1. Предложен способ ВСС жидких и порообразных продуктов в сублиматоре барабанного типа (положительное решение государственной научно-технической экспертизы ВНИИГПЭ на заявку № 4841950/24-06 (068812) от 29.II.90 г. "Способ сублимационной сушки гранулированных продуктов").

2. Опытным путем определены параметры и режимы ВСС различных фруктовых и овощных пюре, плодовоовощных и овошемолочных смесей для детского питания, обеспечивающие максимальное сохранение нативных свойств исходного сырья.

3. На основе проведенного исследования разработана промышленная ВСУ непрерывного действия с сублиматором барабанного типа производительностью по исходному сырью (замороженному продукту) 750 кг в сутки.

4. Результаты работы использованы Тульским филиалом НИТИ "Прогресс" при разработке линии для получения растворимого кофе.

Апробация работы. Основные результаты диссертационной работы докладывались на Всесоюзном семинаре "Тепло- и массообмен при сублимации" (Москва, 1987 г.), Всесоюзной научно-практической конференции "Искусственный холод в отраслях АПК" (Кишинев, 1987 г.), III Всесоюзной научно-технической конференции "Разработка процессов получения комбинированных продуктов питания" (Москва, 1988 г.), XI коллоквиуме по оборудованию пищевой промышленности (Кётен, ГДР, 1988 г.), Республиканской научно-технической конференции "Интенсификация технологии и совершенствование оборудования перерабатывающих отраслей АПК" (Киев, 1989 г.), Всесоюзной научно-практической конференции "Пути интенсификации производства с применением холода в отраслях АПК, торговле и на транспорте" (Одесса, 1989 г.), I Международной конференции по холодильной технике, кондиционированию и энергосбережению (Гавана, Куба, 1990 г.), Всесоюзном семинаре "Проблемы и перспективы развития сублимационной сушки плодовоовощного сырья" (Кишинев, 1990 г.), Всесоюзном семинаре "Новое в технике и технологии производства пищевых концентратов и сухих завтраков" (Одесса, 1990 г.), Республиканской конференции "Энергосбережение"

в сельском хозяйстве" (Киев, 1990 г.).

Публикации. Основное содержание диссертации опубликовано в 12 печатных работах.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, основных выводов, списка литературы и приложений. Работа содержит 85 страниц машинописного текста и 27 рисунков. Библиография – 90 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы исследования, её научное и практическое значение, сформулированы защищаемые в работе научные положения.

В первой главе диссертации выполнен обзор научных исследований по ВСС предварительно замороженных гранулированных пищевых продуктов в подвижном слое. Рассмотрены известные конструкции ВСУ поточно-циклического и непрерывного действия. Проведенный анализ показал, что интенсификация процессов сушки в ВСУ идет за счет развития поверхности сушимого продукта, путем его дробления, и механического воздействия на продукт (перемешивание, вибрация). При этом максимальная интенсивность тепло- и массообмена обеспечивается при определенном соотношении динамических характеристик сушимого слоя и гранулометрического состава частиц. Основное термическое и гидравлическое сопротивление при ВСС создает высохший слой продукта. Его непрерывное удаление с поверхности продукта существенно интенсифицирует процесс сушки и позволяет значительно упростить систему энергоподвода.

Патентно-лицензионный поиск не выявил известных конструкций промышленных ВСУ, в которых реализуется процесс сушки в указанных условиях. Отсутствуют также данные экспериментальных исследований, основанные на них методики расчетов и рекомендации по проектированию сублиматоров барабанного типа. Их разработка и промышленное внедрение является актуальной задачей в области вакуум-сублимационной техники и технологии.

Вторая глава посвящена экспериментальному исследованию ВСС в сублиматоре барабанного типа.

Для исследования процесса ВСС в подвижном слое с отделением сухого продукта и удалением его из зоны сублимации в СИНТЭ была создана опытная установка с сублиматором барабанного типа, состоящая из холодильной машины, вакуумной камеры, контрольно-измерительных, управляющих приборов и устройств. Опытная установка

представлена на рис.1а, б. В схеме, приведенной на рис.1а, сублиматор совмещен в одной камере с десублиматором; на рис.1б – сублиматор и десублиматор расположены в различных камерах, соединенных паропроводом.

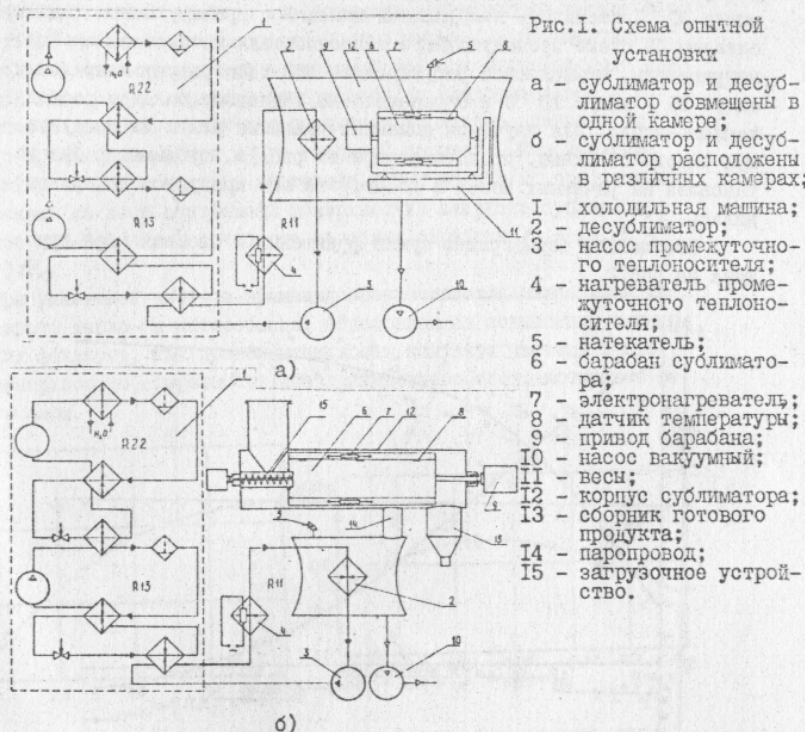


Рис.1. Схема опытной установки

- а – сублиматор и десублиматор совмещены в одной камере;
- б – сублиматор и десублиматор расположены в различных камерах;
- 1 – холодильная машина;
- 2 – десублиматор;
- 3 – насос промежуточного теплоносителя;
- 4 – нагреватель промежуточного теплоносителя;
- 5 – нагреватель;
- 6 – барабан сублиматора;
- 7 – электронагреватель;
- 8 – датчик температуры;
- 9 – привод барабана;
- 10 – насос вакуумный;
- 11 – весы;
- 12 – корпус сублиматора;
- 13 – сборник готового продукта;
- 14 – паропровод;
- 15 – загрузочное устройство.

Для решения задач экспериментального исследования на опытной установке были проведены серии опытов по сушке поро из фруктов, овощей, плодово-молочных и овоще-молочных смесей. Перед загрузкой в сублиматор продукты замораживали в поддонах до температуры минус 10 – минус 18 °С и дробили на гранулы с размерами от $2 \cdot 10^{-2}$ до $1,5 \cdot 10^{-2}$ м. Рабочее давление в вакуумной камере поддерживал на уровне 26,6–66,6 Па. По достижении рабочего давления выключал электронагреватель. Мощность нагревателя регулировали по температуре греющей поверхности барабана, которая в каждом отдельном опыте поддерживалась постоянной на заданном уровне. Опыты прове-

дены в диапазоне значений температуры греющей поверхности 20–65 °С. Угол наклона барабана к горизонтали изменяли от 0° до 5°, частоту вращения барабана – в пределах 0,166–1,5 с⁻¹. Удаление водяных паров в процессе сушки осуществлялось путем их осаждения на холодной поверхности десублиматора, охлаждаемого до температуры минус 45 – минус 50 °С каскадной холодильной машиной с промежуточным теплоносителем. В схеме промежуточного теплоносителя установлен электронагреватель, позволяющий регулировать его температуру в пределах минус 35 – минус 70 °С и определять по тепловому балансу расход теплоносителя. Для изучения динамики удаления влаги из продукта, при работе по схеме, представленной на рис.1а, сублиматор был установлен на рычажных весах и дозагрузка его продуктом не производилась.

Обобщенная термограмма сушки фруктов и овощных пюре приведена на рис.2.

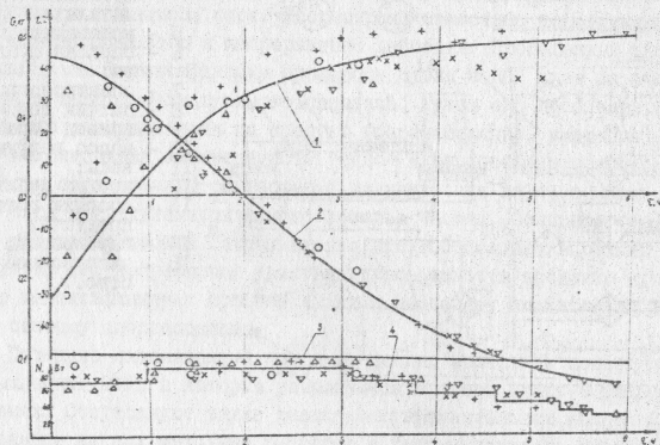


Рис.2. Обобщенная термограмма сушки фруктов и овощных пюре
1 – температура греющей поверхности барабана; 2 – масса продукта в сублиматоре; 3 – температура десублиматора; 4 – мощность, потребляемая нагревателем

Экспериментальное изучение кинетики сушки различного плодово-овощного сырья в сублиматоре барабанного типа показало, что предлагаемый способ сублимационной сушки высокоэффективен при обезвоживании жидких и порообразных продуктов и материалов. В сублима-

торе осуществляется процесс сушки в тонком слое, так как отвод водяных паров происходит с массообменной поверхности, обновляемой за счет непрерывного удаления высушенного слоя. Температура греющей поверхности сублиматора поддерживается на уровне, исключающем возможность перегрева и тепловой порчи продукта. Необходимость поддерживать постоянный уровень энергоподвода обусловлена непрерывной дозагрузкой сублиматора замороженным продуктом. Экспериментально установлено, что максимально допустимый уровень энергоподвода при заданной температуре греющей поверхности, а следовательно, и интенсивность удаления влаги для различных продуктов, зависят от частоты вращения барабана и его удельной загрузки. Максимальная интенсивность энергоподвода составила 2,2–2,45 кВт/м² при удельной (отнесенной ко всей внутренней поверхности) загрузке сублиматора не менее 2,5–3,0 кг/м² и частоте вращения барабана $n = (0,25 - 0,37) n_{кр}$.

При указанной частоте вращения обеспечивается наибольшая интенсивность тепло- и массообмена, обусловленная совместным влиянием таких факторов, как продолжительность контакта частицы с греющей поверхностью, порозность псевдооживленного слоя, истирание высушенного слоя.

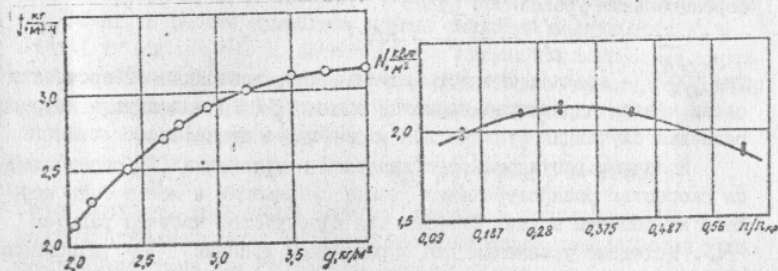


Рис.3. Зависимость интенсивности удаления влаги от удельной загрузки барабана

Рис.4. Зависимость подводимой мощности от частоты вращения барабана

На рис.3, 4 – опытные зависимости интенсивности удаления влаги от загрузки барабана и подводимой мощности от частоты вращения барабана.

В третьей главе предложены математические модели процессов ВСС с измельчением замороженных гранул пищевого продукта.

Предполагается, что пищевые продукты обладают капиллярно-пористой структурой, которая частично заполнена замёрзшей влагой. В результате теплового контакта гранул продукта с поверхностью сублиматора происходит генерация пара с последующим переносом как в свободную часть пористой среды, так и в область, заполненную льдом. Движущаяся граница раздела фаз зависит от температурных полей, возникающих в грануле, и образует две различные капиллярно-пористые структуры, существенно отличающиеся по своей механической прочности. Происходящее затем перемешивание гранул во вращающемся барабане приводит к деструкции поверхностного слоя и измельчению сухих частиц до требуемых размеров. Скорость измельчения гранул определяется двумя факторами: скоростью распространения фронта сублимации (детерминированный фактор) и частотой соударений гранул в барабане (стохастический фактор). Основная задача математического моделирования изучаемых процессов – сокращение времени ВСС и возможность предсказания уменьшения размеров гранул до заранее заданных в процессе измельчения.

Эволюцию размеров замороженной гранулы сферической формы в процессах сублимации и измельчения описывали стохастическим дифференциальным уравнением вида:

$$\frac{d\bar{R}}{d\tau} = \frac{dR}{d\tau} + \xi(\tau) \quad (I)$$

где $\frac{d\bar{R}}{d\tau}$ – средняя скорость измельчения, зависящая от прочности связи частиц капиллярно-пористой среды; $\xi(\tau)$ – дельта – коррелированная случайная функция для марковского процесса.

Величина регулярной составляющей в уравнении (I) определяет скорость распространения фронта сублимации и может быть найдена из решения задачи Стефана для сферической частицы радиуса

R_0 . Исходные уравнения для определения функции $\frac{dR}{d\tau}$ записывали в предположении, что отсутствуют градиенты давлений и концентраций паровой фазы, отвечающие за возникновение эффекта реконденсации. Пространственно-временное распределение температур моделировали уравнением теплопроводности, полагая коэффициенты переноса для каждой из фаз (рис.5) постоянными. Движение фронта сублимации определяли из условия баланса энергии на поверхности раздела фаз

$$p_i \cdot z \frac{dR_f}{d\tau} = \lambda_i \cdot \frac{\partial T}{\partial R} \Big|_{R=R_f}, \quad T = T_f, \quad R = R_f, \quad i = I, II \quad (2)$$

Граничные условия, описывающие контакт греющей поверхности с гранулой, записывали в виде:

$$-\lambda_{II} \frac{dT}{dR} = q, \quad R = R_0 \quad (3)$$

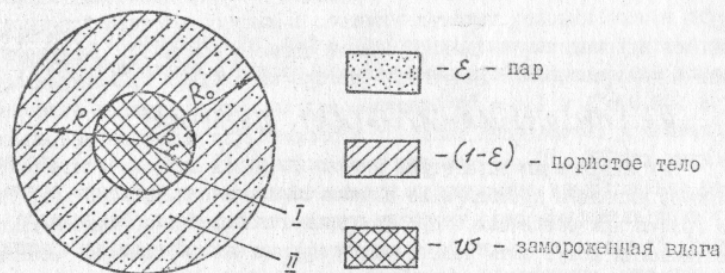


Рис.5. I – капиллярнопористая структура с замороженной влагой (фаза – I); II – капиллярнопористая структура, заполненная паром (фаза – II)

Численное решение задачи проводили в безразмерных переменных в интервале $0 \leq \chi \leq 1$, $\chi = (R_0 - R)/(R_0 - R_f)$ конечно-разностным методом по алгоритму E. Sparrow, W. Chuck на персональном компьютере IBM/PC-AT. В работе приведены данные расчетов зависимости $R_f = f(\tau^*)$ ($\tau^* = \tau \cdot \frac{\lambda \cdot \Delta T}{\rho \cdot z \cdot R_0^2}$), которые имеют выраженный нелинейный характер при $\tau^* > 0,5$. Показано, что для характерных времен соударений между гранулами и поверхностью сублиматора ($\tau < 0,2$) выполняется линейное соотношение между R_f и τ^* :

$$R_f/R \approx 1 - k\tau^*, \quad \text{при } Ste = c \cdot \Delta T / z = const$$

Таким образом, уменьшение радиуса гранулы в результате ВСС и последующего измельчения во вращающемся барабане моделируется уравнением Ланжевена для стохастических процессов –

$$\frac{dR}{d\tau} = -k\tau^* + \xi(\tau)$$

Рассматриваемый случайный процесс характеризуется плотностью вероятности $W(R, \tau)$ того, что гранула размером R_0 , начавшая разрушаться, в момент времени τ достигает значения R . Величина $W(R, \tau)$ определяется решением уравнения Фоккера-Планка

$$\frac{\partial W}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial R} (kRW + D \frac{\partial W}{\partial R}),$$

с соответствующими граничными и начальными условиями: $W = 0$ при $R = R_{min}$; $W = 0$ при $R = R_0$; $W(\tau = 0, R) = f(R)$, где D – коэффициент, характеризующий интенсивность измельчения под воздействием случайных факторов.

Решение уравнения искали методом собственных функций, ограни-

чиваясь первыми членами разложения в ряд, что позволило представить модель эволюции среднего размера гранул в следующей форме:

$$\bar{R} = \int_{R_{min}}^{R_0} RW(R, \tau) \cdot dR = A_1 \exp(A_2 \tau) + A_3 \exp(-A_4 \tau)$$

Идентификацию параметров модели (A_1, A_2, A_3, A_4) для реального аппарата проводили по данным об изменении среднего размера гранул при различных скоростях вращения барабана. Полученные соотношения могут быть использованы при проектировании аппаратов ВСС с измельчением частиц до заранее заданных размеров.

Для более адекватного описания процессов ВСС необходим учет более тонких эффектов, связанных не только с температурными градиентами, но и с фильтрационной и концентрационной неравновесностью, которые стимулируют появление реконденсации паров.

Моделирование температурных и концентрационных полей проводили, исходя из общей системы тепло- и влагопроводности А.В.Лыкова, для гранул сферической геометрии. Влиянием перекрестных членов в выражениях для потоков пренебрегали.

Для каждой из зон уравнения баланса записаны в виде:

$$\frac{\partial T_1}{\partial \tau} = \frac{\alpha_1}{R^2} \cdot \frac{\partial}{\partial R} \left(R^2 \frac{\partial T_1}{\partial R} \right) + \frac{\nu}{(\rho \cdot c_p)_I} \sigma [X_1], \quad R_f(\tau) \leq R < R_0;$$

$$\frac{\partial T_2}{\partial \tau} = \frac{\alpha_2}{R^2} \cdot \frac{\partial}{\partial R} \left(R^2 \frac{\partial T_2}{\partial R} \right), \quad 0 < R < R_f(\tau);$$

$$(\varepsilon - w) \frac{\partial X_1}{\partial \tau} - \frac{\alpha_{m1}}{R^2} \cdot \frac{\partial}{\partial R} \left(R^2 \frac{\partial X_1}{\partial R} \right) + \frac{\alpha_1}{R^2} \frac{\partial}{\partial R} \left(R^2 \frac{\partial P_1}{\partial R} \right) - \sigma [X_1], \quad R_f(\tau) \leq R < R_0;$$

$$\varepsilon \cdot \frac{\partial X_2}{\partial \tau} - \frac{\alpha_{m2}}{R^2} \cdot \frac{\partial}{\partial R} \left(R^2 \frac{\partial X_2}{\partial R} \right) + \frac{\alpha_2}{R^2} \frac{\partial}{\partial R} \left(R^2 \frac{\partial P_2}{\partial R} \right), \quad 0 < R < R_f(\tau);$$

$$\frac{\partial P_1}{\partial \tau} = \frac{\alpha_{D1}}{R^2} \cdot \frac{\partial}{\partial R} \left(R^2 \frac{\partial P_1}{\partial R} \right) - \sigma [P_1], \quad R_f(\tau) \leq R < R_0;$$

$$\frac{\partial P_2}{\partial \tau} = \frac{\alpha_{D2}}{R^2} \cdot \frac{\partial}{\partial R} \left(R^2 \frac{\partial P_2}{\partial R} \right), \quad 0 < R < R_f(\tau);$$

$$\sigma [X_1] = \frac{\partial X_1}{\partial \tau} \cdot \eta; \quad \sigma [P_1] = \frac{\partial P_1}{\partial \tau} \cdot \eta;$$

где $\eta < 1$ - коэффициент реконденсации.

Система уравнений, дополненная начальными и граничными условиями, удовлетворяет балансу влаги и энергии на границе раздела фаз. Для её решения проведено разделение переменных, в результате

которого последовательно выполнен переход от системы дифференциальных уравнений второго порядка к системе 12 дифференциальных уравнений первого порядка с соответствующими условиями задачи ограничениями. Численное решение задачи проводили методом Рунге-Кутты, предварительно представив систему уравнений в безразмерном виде. Основные расчеты проводили для значений $w = 0,1$ и $\varepsilon = 0,85$. Безразмерные величины варьировали в пределах допускаемых изменений феноменологических коэффициентов переноса $\alpha_m, \alpha, \alpha_D$ для каждой из зон. Поскольку экспериментальное определение коэффициента реконденсации представляет сложную проблему, рассматривали качественное влияние η на распространение фронта сублимации по сравнению со случаем $\eta = 0$ (задача Стефана). Обнаружено, что при реконденсации пара в области, заполненной замёрзшей влагой, основное влияние на скорость сублимации оказывают параметры тепло- и влагопроводности для зоны II, в то время, как теплофизические характеристики зоны I приводят к эффектам, которые пренебрежимо малы (при изменении $\eta = 0 \dots 0,8$).

Таким образом, может быть сделан вывод о том, что деструкция поверхностного слоя сублимирующейся гранулы изменяет свойства зоны II и, тем самым, оказывает влияние на интенсификацию процесса сушки.

Четвертая глава посвящена промышленной реализации результатов исследований. В ней сформулированы исходные требования и рекомендации по выбору основных конструктивных характеристик установок непрерывного действия с сублиматором барабанного типа и рабочих параметров процесса ВСС растительного сырья. Изложены принципы организации процесса сушки в подвижном слое с деструкцией гранул и удалением сухих частиц из зоны сублимации. Дано описание основных элементов (сублиматора, десублиматоров и загрузочного устройства) промышленной установки, разработанной ОИИТЭ совместно с Тульским филиалом НИТИ "Прогресс".

Сублиматор (рис.6) выполнен в виде пучка сушильных труб - центральной и периферийных - заключенного в обечайку. В свободное пространство между трубами и обечайкой подается теплоноситель, т.е. имеется одна общая "рубашка" для всех сушильных труб, что упрощает систему подвода теплоты к греющим поверхностям. Гранулированный продукт из загрузочного бункера 2 подается питающим устройством I в центральную трубу. При вращении барабана продукт "растекается" по трубе, через нижнюю кромку её сыпается на внутреннюю поверхность конусного насадка 5 и за счет того, что барабан

наклонен, "перетекает" в периферийные сушильные трубы. Основной процесс сушки идет в периферийных трубах. При интенсивном перемешивании высохший слой продукта непрерывно истирается и отводится из сушильных труб потоком водяного пара в сборник для сухого продукта.

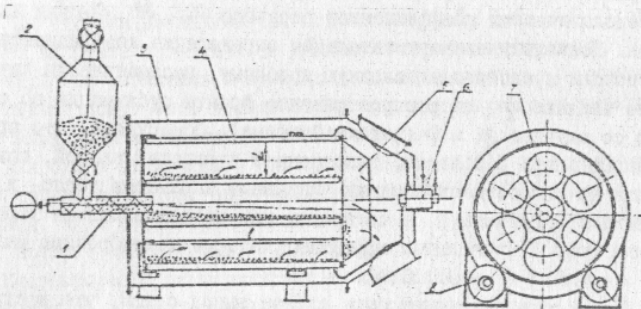


Рис.6. Сублиматор барабанного типа ВСУ непрерывного действия

1 - питающее устройство; 2 - загрузочный бункер; 3 - корпус; 4 - барабан; 5 - конусный насадок; 6 - сальниковое устройство; 7 - сушильная труба; 8 - каток.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ

1. Предложен способ ВСС жидких и пастообразных продуктов в сублиматоре барабанного типа (положительное решение государственной научно-технической экспертизы изобретений ВНИИТЭ на заявку № 484195/24-06(068812) от 29.II.90 г. "Способ сублимационной сушки гранулированных продуктов").

2. Во вращающемся сублиматоре осуществляется режим сублимационной сушки в тонком слое при постоянных значениях сопротивлений тепло- и массообмену и уровне энергоподвода, максимально возможном для заданной температуры греющей поверхности барабана. Температура греющей поверхности поддерживается на уровне, исключающем возможность перегрева и тепловой порчи продукта.

3. Максимальная интенсивность сушки поддерживается при частоте вращения барабана $n = (0,25-0,37)n_{кр}$ и удельной (отнесенной к внутренней поверхности барабана) загрузке $g \geq 3 \text{ кг/м}^2$.

4. Для удаления сухих частиц продукта из зоны сублимации необходимо обеспечить такое соотношение между конструктивными параметрами сушильной трубы и количеством подводимой к продукту теплоты, при котором скорость парогазового потока в любом сечении по пути его движения к десублиматору выше скорости витания частицы заданного размера.

5. Эволюция размеров гранул определяется скоростью распространения фронта сублимации и частотой соударений гранул в барабане и носит вероятностный характер.

6. Деструкция поверхностного слоя сушимой гранулы изменяет её свойства и, тем самым, оказывает существенное влияние на интенсификацию процесса сублимации.

7. На основе проведенного исследования разработана промышленная ВСУ непрерывного действия с сублиматором барабанного типа производительностью по исходному сырью (замороженному продукту) 750 кг в сутки.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Ольшамовский В.С., Терзиев Г.С. Интенсификация процесса сублимационной сушки экстракта кофе. Киев: Техника, "Холодильная техника и технология", 1986, вып.42, С.89-93.

2. Лелица А.Г., Ольшамовский В.С. Влияние температуры хладосигеля и коэффициента теплоотдачи на процесс конденсации водяного пара в вакууме. Всесоюз. науч.-практ. конф. "Искусственный холод в отраслях агропромышленного комплекса", Кишинев, 1987.

3. Ольшамовский В.С., Парцхаладзе Э.Г., Задорожный В.И. Сублимационная установка роторного типа для сушки жидких и пастообразных материалов. Всесоюз. науч.-практ. конф. "Искусственный холод в отраслях агропромышленного комплекса", Кишинев, 1987.

4. Ольшамовский В.С., Задорожный В.И., Парцхаладзе Э.Г. Сублимационная сушка фруктового пюре в установке роторного типа. Киев: Техника, "Холодильная техника и технология", 1988, вып.47, С.94-97.

5. Парцхаладзе Э.Г., Ольшамовский В.С., Острик А.С. Получение вкусо-ароматических порошков из продуктов растительного происхождения в сублимационной установке барабанного типа и их применение. Всесоюз. конф. "Разработка процессов получения комбинированных продуктов питания", М., 1988.

6. Подмазко А.С., Ольшамовский В.С. Безотходная технология обработки пищевого сырья и продуктов. Всесоюз. конф. "Разработка процессов получения комбинированных продуктов питания". - М., 1988.

7. Ольшамовский В.С., Парцхаладзе Э.Г., Коляка В.Ф., Царева Л.А. Безотходная технология переработки плодов и овощей. Республ. науч.-техн. конф. "Интенсификация технологий и совершенствование оборудования перерабатывающих отраслей АПК". - Киев, 1989.

8. Ольшамовский В.С., Парцхаладзе Э.Г., Коляка В.Ф. Сублимационная установка непрерывного действия для получения пищевых порошков. Регион. науч.-практ. конф. "Социально-экономические и научно-технические проблемы АПК". - Одесса, 1989.

9. Деревянко Г.В., Ольшамовский В.С., Парцхаладзе Э.Г., Максимов А.Е. Динамика псевдоожуженного слоя во вращающемся барабане сублиматора роторного типа. Всесоюз. науч.-практ. конф. "Пути интенсификации производства с применением холода в отраслях АПК, в торговле и на транспорте". - Одесса, 1989.

10. Ольшамовский В.С., Парцхаладзе Э.Г., Чумак И.Г., Коляка В.Ф., Савинкин В.И. Способ сублимационной сушки гранулированных продуктов. Положительное решение государственной научно-технической экспертизы изобретений ВНИИГПЭ по заявке № 4841950/24-06(068812) от 29.II.90.

11. Парцхаладзе Э.Г., Савинкин В.И., Ольшамовский В.С. Кристаллизационные процессы в комбинированной криотехнологии получения пищевых порошков из растительного сырья. Тезисы докладов IV Всесоюз. конф. по массовой кристаллизации и кристаллизационным методам разделения смесей. Иваново, 1990.

12. *I. G. Chumak, E. G. Partskhaladze, V. S. Olshamovskiy. Energy-saving technology of producing sublimated food-stuffs out raw vegetable materials. I Conferencia internacional de refrigeracion, climatizacion y energia no convencional, 25-30 de junio de 1990. La Habana, Cuba.*

УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ

λ_m - коэффициент влагопереноса; λ - коэффициент теплопроводности; α_{pl} - коэффициент фильтрационной диффузии пара; η - коэффициент реконденсации; \mathcal{R} - коэффициент проницаемости; ε - порозность; W - объем; занимаемый замороженной влагой; R_0 - радиус гранулы; C - теплоемкость; X - концентрация пара; $St_e = C \cdot \Delta T / \eta$ - число Стефана; I, II - индексы зоны; P - давление; q - тепловой поток; α - температуропроводность; τ - время; α_m, α_s - коэффициенты переноса для соответствующих потоков