

Автореферат Н
143

ОДЕССКИЙ ИНСТИТУТ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ТЕХНИКИ И ЭНЕРГЕТИКИ

На правах рукописи

ЛЕЛИЦА Александр Григорьевич

ПРОЦЕСС ДЕСУБЛИМАЦИИ НА ЛИСТОКАНАЛЬНОЙ
БАТАРЕЕ В УСЛОВИЯХ ВАКУУМА

Специальности: 05.04.03 - Машины и аппараты холодильной и
криоганной 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

Научные руководители – заслуженный деятель науки УССР,
доктор технических наук,
профессор Чумак И.Г.;

кандидат физико-математических наук,
доцент Кириллов В.Х.

Официальные оппоненты – доктор технических наук,
профессор Гришин М.А.
доктор технических наук,
профессор Войтко А.М.

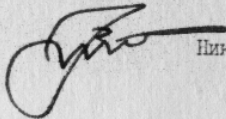
Ведущая организация – НПО "Консервпромкомплекс",
г. Одесса

Защита диссертации состоится " ___ " _____ 1991 г.
в _____ 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.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке института.

Автореферат разослан " ___ " _____ 1991 г.

рач
лительный секретарь
изированного совета,
мент


Никольшин Р.К.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Одним из перспективных технологических процессов при производстве продуктов пищевой, микробиологической, химической и др. отраслей промышленности является вакуумная сублимационная сушка. Этот весьма энергоемкий процесс в ряде случаев оказывается, однако, единственно возможным. Экономика и определяющие ее вопросы технического оформления процесса являются сейчас решающими. Интенсивность, длительность, и, следовательно, экономичность сушки в значительной мере определяются скоростью и стоимостью эвакуации образующегося пара. Промышленности необходимы надежные, эффективные конструкции и инженерные методы расчета вакуумных сублимационных конденсаторов, гарантирующие их высокий технико-экономический уровень. Существующие экспериментальные и расчетные данные не позволяют в полной мере оценить тепломассообменные процессы, протекающие в вакуумных конденсаторах /десублиматорах/, а, следовательно, обеспечить надежность их проектирования.

Цель работы. Основной целью проведенных исследований являлось:

- разработка конструкции десублиматора водяных паров, в которой было бы минимальное гидравлическое сопротивление движению пара от поверхности сублимации к поверхности конденсации;
- разработка методики теоретических и экспериментальных исследований процесса десублимации водяного пара в лед под вакуумом в диапазоне температур 243...223 К при величинах остаточного давления в установке от 66,6 до 333,2 Па;
- уточнение физической модели процесса десублимации, отражающего процесс осаждения льда;
- создание математической модели процесса десублимации водяного пара на плоской и цилиндрической поверхностях;
- сопоставление результатов расчета теоретических зависимостей математической модели процесса с экспериментальными данными;
- получение практических рекомендаций по способам организации процесса десублимации водяного пара и интенсификации его для разработки оптимального варианта конструкции десублиматора.

Научная новизна. Математическое моделирование процесса де-

XV 1243

ИНСТИТУТ ХОЛОДА
ОНАХТ
Бібліотека

сублимации на основе одномерной квазистационарной краевой задачи с подвижной границей, представляющей собой сопряженные уравнения теплопроводности для стенки и для слоя льда адекватно описывает динамику продолжительности намораживания слоя льда на охлаждаемой поверхности при соответствующем выборе теплофизических свойств льда. Аналитическое решение исходной задачи получено методом Лейбензона, что послужило отправной точкой для разработки теоретических основ проектирования панельных десублиматоров, обладающих минимальным сопротивлением движению водяного пара и высокой эффективностью процесса тепло- и массопереноса.

Основные научные положения, защищаемые в работе:

- процесс десублимации водяного пара в условиях вакуума с достаточной точностью описывается в виде сопряженной краевой задачи теплопроводности с подвижной границей на плоской и цилиндрической поверхностях;

- экспериментально и теоретически доказана необходимость интенсификации теплообмена со стороны хладоносителя для ускорения процесса десублимации.

Практическая ценность работ. Уточнена физическая модель процесса десублимации, что позволяет выяснить характер изменения толщины слоя льда на поверхности конденсатора, имеющего плоскую или цилиндрическую формы. Получены аналитические зависимости, которые описывают процесс образования слоя льда в различные периоды, обусловленные различной температурой десублиматора.

Разработана конструкция десублиматора и предложена методика его расчета, которые могут быть использованы при проектировании эффективных десублиматоров водяного пара, а также для продолжения исследований процессов с фазовыми переходами.

Результаты исследований внедрены Тульским филиалом научно-исследовательского технологического института "Прогресс".

Публикации. По материалам диссертации опубликовано 6 печатных работ.

Апробация работ. Результаты проведенной работы частично докладывались на Всесоюзной научно-практической конференции "Искусственный холод в отраслях агропромышленного комплекса", Г. Кишинев /1987 г./; на научно-технических конференциях профессорско-преподавательского состава и научных сотрудников Одесского института низкотемпературной техники и энергетики /1978, 1980, 1984,

1986, 1988, 1989 гг./.

Структура и объем диссертации. Работа состоит из введения, четырех глав, выводов, списка использованной литературы и приложений. Диссертация содержит 145 страниц машинописного текста, 5 таблиц, 60 рисунков. Библиография включает 119 названий.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Введение содержит обоснование актуальности проблемы исследования, постановки задачи, а также основные научные и практические результаты.

В первой главе проводится обзор исследований и анализ физических представлений о механизме процесса десублимации водяного пара в вакууме, а также рассмотрение термодинамических и теплофизических свойств льда. Теоретические и экспериментальные исследования процесса десублимации были проведены советскими учеными А.В. Дыковым, Г.Б. Чижовым, И.С. Максимовской, К.П. Шумским, Э.И. Гуйго, Э.И. Квухчешвили, Л.С. Малковым, П.А. Новиковым, А.З. Волинцом, Е.Ф. Андреевым и др. и зарубежными учеными Е. Флорджем, Ц. Исидой, Г. Карслоу, Х. Бадером, К. Кессом и др.

Анализ методик исследований и механизмов процесса, рассмотренных различными авторами, показал:

- экспериментальные исследования некоторых авторов проводились на маломощных вакуумных установках, измерения основных параметров исследуемого процесса проводились с недостаточной точностью, что не позволяет проводить обобщение данных и перенести их на промышленные установки;

- в исследованиях некоторых авторов недостаточно конкретно определен механизм процесса десублимации и его движущие силы;

- как правило, исследования проводились на различных поверхностях теплообмена, что не позволяет выявить механизм процесса льдообразования из-за конструктивных особенностей поверхности десублиматора и способов отбора парового потока;

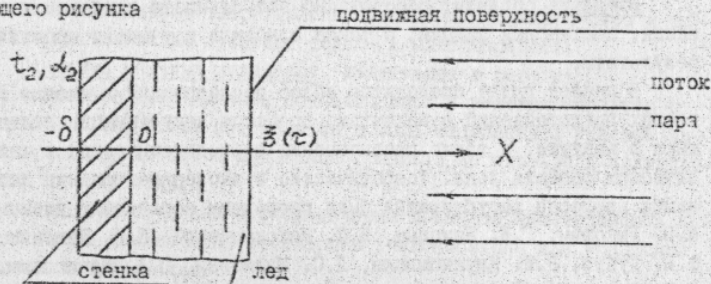
- отсутствуют данные о влиянии коэффициента теплоотдачи α_2 к хладоносителю на скорость процесса десублимации;

- существующие конструкции десублиматоров недостаточно эффективны для сублимационных установок из-за неравномерности распределения тепловой нагрузки /десублиматора/ по объему аппарата, что влечет за собой необходимость разработки новых методов иссле-

дований теплопереноса и совершенствования конструкций десублиматоров.

Во второй главе помещены материалы, доказывающие первое научное положение работы и касающиеся математической модели процесса десублимации водяного пара на плоской и цилиндрической поверхностях.

Схему процесса десублимации можно изобразить с помощью следующего рисунка



Простейшая математическая модель процесса десублимации водяного пара на плоской охлаждаемой поверхности в условиях вакуума представляется следующей отомерной нестационарной краевой задачей:

$$1/ \text{ для стенки: } \frac{\partial T_c}{\partial \tau} = \alpha_c \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \quad -\delta \leq x \leq 0 \quad /1/$$

$$\tau = 0 \quad T_c = T_*(x); \quad x = -\delta \quad \lambda_c \frac{\partial T_c}{\partial x} = \alpha_2 (T_c - t_2).$$

$$2/ \text{ для слоя льда: } \frac{\partial T_\lambda}{\partial \tau} = \alpha_\lambda \frac{\partial^2 T_\lambda}{\partial x^2} \quad 0 \leq x \leq \bar{z}(\tau) \quad /2/$$

$$\tau = 0 \quad T_\lambda = T_D(0); \quad x = \bar{z}(\tau) \quad T_\lambda = T_D(\bar{z}).$$

3/ условия сопряжения:

$$x = 0 \quad T_c = T_\lambda, \quad \lambda_c \frac{\partial T_c}{\partial x} = \lambda_\lambda \frac{\partial T_\lambda}{\partial x}$$

$$x = \bar{z}(\tau) \quad \tau_0 \rho_\lambda \frac{d\bar{z}}{d\tau} = \lambda_\lambda \frac{\partial T_\lambda}{\partial x} \quad /3/$$

4/ условия /Герца-Кнудсена/ внешнего массообмена:

$$\rho_\lambda \frac{d\bar{z}}{d\tau} = \bar{\alpha} \frac{P_s - P_2(\bar{z})}{\sqrt{2\pi R T_2(\bar{z})}}, \quad \tau = 0 \quad \bar{z} = 0 \quad /4/$$

здесь коэффициента конденсации $\bar{\alpha} = \bar{\alpha}(T_s)$ и давление насыщения водяных паров $P_s = P_s(T_s)$ могут быть представлены в виде аппроксимационных зависимостей

$$\bar{\alpha} = A + \frac{B T_s^{1/2}}{P_s}, \quad P_s = M + N T_s \quad /5/$$

Аналитическое решение задачи /1/ - /5/ в предположении постоянства теплофизических характеристик основано на квазистационарном приближении и получено методом Лейбениона.

В результате:

1/ для режима низкой теплоотдачи со стороны хладоносителя $2 \cdot 10^2 \leq \alpha_2 \leq 6 \cdot 10^2$ температура на свободной поверхности льда и толщина слоя определяются следующими соотношениями:

$$T_D(\bar{z}) = T_s \left(1 - \frac{\gamma_s}{\delta t_s (1 + \frac{\delta}{\bar{z}})} \right), \quad t_s = \frac{T_s}{T_s - t_2} \quad /6/$$

$$\tau = \frac{\rho_\lambda \tau_0 t_s}{3600 \lambda_\lambda T_s} \left[(\gamma_s + \delta) \bar{z} + \frac{\bar{z}^2}{2} - \gamma_s^2 \delta^2 \frac{1 - 2\sqrt{\frac{\bar{z}}{t_s}}}{t_s} \ln \left(1 + \frac{\bar{z}}{\delta} \right) \right],$$

$$\text{где } \gamma_s \delta = \frac{\lambda_\lambda \sqrt{2\pi R T_s}}{\alpha K \tau_D}, \quad \delta \delta = \frac{\lambda_\lambda}{\alpha_2} \left(1 + \frac{\delta \alpha_2}{\lambda_c} \right)$$

2/ для режима интенсивной теплоотдачи $1 \cdot 10^3 \leq \alpha_2 \leq 1,5 \cdot 10^3$ соответственно получено

$$T_D = t_2 + \frac{(T_s - t_2) \bar{z}}{\bar{z} + \gamma}, \quad \tau = \frac{\rho_\lambda \tau_0 \gamma \bar{z} t_s}{3600 \lambda_\lambda T_s} \left(1 + \frac{\bar{z}}{2\gamma} \right), \quad /7/$$

$$\text{где } \gamma = \frac{\lambda_\lambda \sqrt{2\pi R t_2}}{\alpha K \tau_D}$$

Для других режимов теплоотдачи в виду громоздкости соответствующие решения не приводятся.

По известной продолжительности намораживания слоя льда $\tau = \tau(\bar{z})$ определены коэффициенты теплоотдачи и теплопередачи

$$\alpha_{эф}(\tau) = \frac{\lambda_\lambda}{\bar{z}(\tau)}, \quad K(\tau) = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_2} + \frac{\delta c}{\lambda_c} + \frac{1}{\alpha_{эф}(\tau)}} \quad /8/$$

В третьей главе рассматриваются методика и техника экспериментальных исследований процесса десублимации водяного пара в вакууме на цилиндрической поверхности панельного десублиматора.

Исследования проводились на спроектированном специальном стенде, позволяющем рассматривать процессы сублимации и десублимации взаимосвязанно, создавать заданный поток водяного пара, определять нестационарную величину теплоты десублимации и толщины формирующегося на поверхности панели слоя льда, определять величину коэффициента теплоотдачи α_2 от стенки десублиматора к теплоносителю, определять интенсивность и характер процесса десублимации в вакуумной камере /температуры поверхности десублимации, общего давления в аппарате и т.д./.

Экспериментальная установка состоит из сублиматора, внутри которого соосно установлен десублиматор; пульта управления и систем: удаления неконденсирующихся газов, измерения разрежения в вакуумной камере, охлаждения десублиматора и измерения температур.

Корпус вакуумной камеры выполнен в виде цилиндра, установленного горизонтально. В камере помещен соосно десублиматор, а также весы, на которых установлен парогенератор с сублимируемым льдом. Снаружи стенки аппарата термостатированы.

Изучение процесса десублимации пара проводилось в условиях, характерных для современных высокоинтенсивных сублимационных установок с инфракрасным теплоподводом. Парогенератор был изготовлен из двухцокольных электрических ламп типа РН-220-40-1,

Основные достоинства лучистого энергоподвода — его поляризующее воздействие, нагрев всего облучаемого участка поверхности материала, интенсификация внешнего тепло- и массообмена.

Заданный вакуум в барокамере поддерживали вакуумным насосом ВН-1МГ. Контроль давления в вакуумной камере осуществляли с помощью вакуумметров ВИТ-1 и ВСЕ-1, а также U-образными манометрами с использованием специальных жидкостей с малой плотностью и незначительной упругостью насыщенных паров в условиях измерений.

Температуру меряли термопарами. Измерения показаний термопар проводились цифровым ампервольтметром Ф-30. Термопары были проградуированы с точностью до 0,05 °С.

В ходе проводимых исследований измеряли толщину нарастающего слоя льда и его температуру специальным измерителем, сконструированным и изготовленным в лаборатории.

На основании физической и математической модели можно сделать

заключение, что максимальная интенсификация процесса сублимационной сушки может быть достигнута при фронтальном расположении теплообменной поверхности относительно потока пара, при минимальном расстоянии между поверхностями сублимации и десублимации.

Учитывая это, был сконструирован, изготовлен и испытан десублиматор водяных паров цилиндрической формы из стандартных листовых батарей /панелей/. Длина батареи — 1350 мм, ширина — 635 мм. Данная панель имела 32 шпанга с шагом 40 мм. Площадь поверхности — 0,886 м².

Десублиматор такой конструкции имеет следующие преимущества:

- экономия вакуумного объема аппарата;
- расстояние, отделяющее зону сублимации от зоны десублимации, сведено к минимуму, что интенсифицирует процесс;
- охлаждаемая поверхность десублиматора фронтально расположена относительно потока водяного пара;
- сведены к минимуму гидравлические и диффузионные сопротивления на пути движения пара от поверхности сублимации к поверхности конденсации.

Десублиматор охлаждался промежуточным хладагентом, в качестве которого использован хладон-11, охлаждаемый с помощью каскадной холодильной установки.

Преимущества принятой системы охлаждения десублиматора по сравнению с системой с непосредственным испарением аммиака следующие:

- хладагент не токсичен;
- не происходит замасливания теплообменной аппаратуры, что улучшает ее работу;
- отпадает необходимость точного, равномерного распределения жидкого хладагента по отдельным секциям или трубам десублиматора;
- не требуется установка удерживателей жидкости в десублиматоре.

Процесс десублимации водяного пара в вакууме исследовался в диапазоне остаточных давлений от 400 до 66,6 Па при различных потоках пара к охлаждаемой поверхности, температура которой изменялась от 243 до 223 К при изменении коэффициента теплоотдачи от стенки десублиматора к теплоносителю в пределах от 200 до 1500 $\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}$

В четвертой главе представлены результаты экспериментальных исследований процесса десублимации водяного пара на цилиндрической поверхности панели и их анализ.

Проведенные эксперименты показали, что максимальная конденсация достигается при фронтальном расположении теплообменной поверхности потоку водяного пара.

В ходе экспериментов было замечено, что шероховатость поверхности льда изменяется во времени и зависит от температуры и скорости потока водяного пара. При этом было отмечено, что с ростом толщины намораживаемого слоя льда, шероховатость его уменьшается. Сама же шероховатость, как выяснилось, зависит от гидродинамического режима, продолжительности процесса, концентрации и температуры парогазового потока.

При изучении процессов тепло- и массопереноса в разреженной газовой среде при десублимации характерной величиной является интенсивность десублимации, по изменению которой можно оценить влияние физических параметров на течение процесса тепло- и массопереноса.

На рис. 1 показано, что при понижении температуры на поверхности раздела фаз /пар - лед/ в пределах опыта интенсивность десублимации увеличивается в 3 раза.

На рис. 2 представлен график скорости и интенсивности десублимации при различных величинах коэффициента теплоотдачи α_2 от стенки десублиматора к хладонносителю. Анализ данного графика показывает, что при увеличении коэффициента теплоотдачи α_2 от 300 до 1500 Вт/м²·К и интенсивность и скорость десублимации увеличиваются примерно в 2 раза.

На рис. 3 показан комплексный график скорости десублимации $\frac{\Delta G}{\Delta \tau}$ в зависимости от времени процесса при постоянном остаточном давлении $P_{\text{общ}} = 133,3$ Па и температуре раздела фаз $T_D = 233$ К, для различных коэффициентов теплоотдачи α_2 . Из него следует, что при идентичных условиях процесса с увеличением коэффициента теплоотдачи α_2 скорость десублимации, возрастает. Однако, это приращение зависит от времени и с его течением постепенно сокращается. Если после первого часа показания на кривых 1 и 4 отличались в 3,5 раза, то после четырехчасовой работы - только в 1,7 раза. Такая зависимость объясняется ростом слоя льда на поверхности

теплообмена.

Представленные графики показывают, что скорость отвода теплоты десублимации зависит от коэффициента теплоотдачи α_2 , толщины намороженного слоя льда, температуры на поверхности льда T_D и интенсивности десублимации.

После обработки на ЭВМ зависимостей по определению толщины десублимирующегося льда и его температуры на границе лед - пар, были получены выражения, позволяющие определить толщину слоя льда в любой определенный промежуток времени работы установки, а также температуру поверхности намороженного льда определенной толщины:

$$\bar{z} = 1,47 \frac{T_s - T_2}{\sqrt{T_2}} \cdot \tau, \text{ мм} \quad (0 \leq \bar{z} \leq 12) \quad /9/$$

$$T_D = T_2 + 0,153 \frac{T_s - T_2}{\sqrt{T_2}} \cdot \bar{z}, \text{ К} \quad /10/$$

где T_s - температура насыщения, К; T_2 - температура хладонносителя, К; τ - время десублимации, ч; \bar{z} - толщина слоя льда, мм; T_D - температура льда на границе пар - лед, К.

На основании полученных данных была построена зависимость температуры поверхности льда T_D от толщины нарастающего льда при различных давлениях в аппарате /рис. 4/. График свидетельствует о том, что, независимо от общего давления в аппарате, с ростом толщины слоя льда температура его поверхности повышается. Роль давления в этом случае, осталась невыясненной.

На рис. 5 дано распределение полей температур в нарастающем слое десублимированного льда в зависимости от толщины слоя и коэффициента теплоотдачи α_2 . Кривые 1 и 3 показывают распределение температур по толщине слоя льда в 5 мм, а кривые 2 и 4 - соответственно в 10 мм. Из графиков следует, что распространение температур в слое льда имеет не линейный характер. В этом случае температурный перепад ΔT в нарастающем слое льда составляет для 5 мм 1,8 °, для 10 мм - 3,7 °. Как показывают кривые 3 и 4, при уменьшении α_2 до 350 Вт/м²·К температурный перепад изменяется и составляет: для 5 мм - 2,8 °, для 10 мм - 5,5 °. Во всех экспериментах отмечено, что с ростом толщины льда растет и $\Delta T (\Delta T = T_D - T_w)$. Из этого рисунка следует и то, что с уменьшением α_2 /при прочих равных условиях/ происходит рост температуры на поверхности слоя

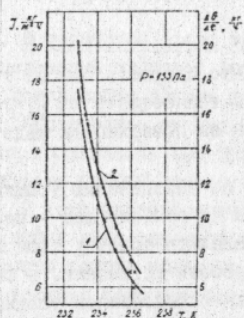


Рис. 1 Зависимость интенсивности и скорости десублимации от температуры на поверхности льда T_s
1 - интенсивность десублимации
2 - скорость десублимации

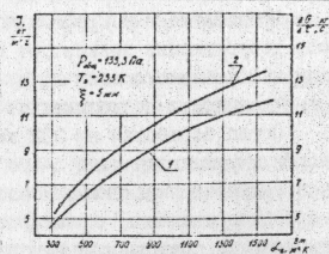


Рис. 2 Зависимость максимальной интенсивности и скорости десублимации от коэффициента теплоотдачи α_2

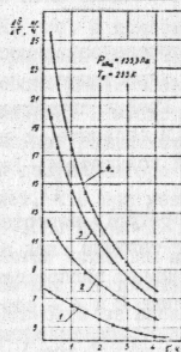


Рис. 3 Зависимость скорости десублимации от времени процесса и коэффициента теплоотдачи

1 -	$\alpha_2 = 350$ Вт/м ² ·К
2 -	$\alpha_2 = 600$ Вт/м ² ·К
3 -	$\alpha_2 = 1050$ Вт/м ² ·К
4 -	$\alpha_2 = 1450$ Вт/м ² ·К

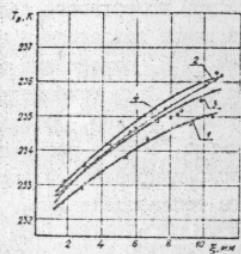


Рис. 4 Зависимость температуры поверхности льда T_s от толщины нарастающего слоя льда δ и общего давления в аппарате p

1 -	$p = 66,6$ Па
2 -	$p = 133,0$ Па
3 -	$p = 200,0$ Па
4 -	$p = 266,0$ Па

льда, что влечет за собой снижение интенсивности десублимации и увеличение времени всего процесса. Эти выводы являются подтверждением второго научного положения работы.

В процессе исследований, при изменении коэффициента теплоотдачи α_2 в пределах от 300 до 1500 Вт/м²·К, были отмечены два режима теплоотдачи:

- 1/ режим низкой теплоотдачи $300 \leq \alpha_2 \leq 600$;
- 2/ режим интенсивной теплоотдачи $1000 \leq \alpha_2 \leq 1500$.

Выявленные режимы теплоотдачи влияли на температуру движущейся поверхности слоя льда и на время процесса десублимации. Для намораживания слоя льда толщиной 5 мм /при прочих равных условиях/, в режиме низкой теплоотдачи время процесса десублимации составляет от 3,4 до 3,0 часов, а в режиме интенсивной теплоотдачи оно сократилось до 1,75 до 1,25 часа /рис. 3/, т.е. при изменении α_2 от 350 до 1450 Вт/м²·К время процесса десублимации уменьшается в 2.7 раза с ослаблением темпа во второй стадии процесса, при этом, коэффициент теплопередачи десублиматора увеличивается с 275 до 600 Вт/м²·К.

Для характеристики скорости десублимации используем коэффициент конденсации $\bar{\alpha}$, который для исследуемого диапазона величин остаточного давления определяли по уравнению:

$$\bar{\alpha} = \frac{A \rho \sqrt{2gRT_D}}{P_S - P_D} \quad /11/$$

где: A - скорость десублимации, м/ч; ρ - плотность десублимированного льда, кг/м³; T_D - температура поверхности льда на границе пар - лед, К.

Величины P_S и P_D - давления насыщения над льцом и на поверхности льда определяются уравнениями:

$$\lg P_S = -2668,72 / T_S + 10,431112$$

$$\lg P_D = -2668,72 / T_D + 10,431112 \quad /12/$$

Из представленных графиков /рис. 7 и 8/ видно, что темп изменения коэффициента конденсации $\bar{\alpha}$ неравномерен и оказывается наибольшим в районе температуры 233 К, что позволяет считать ее наиболее эффективной. Из графиков также следует, что при понижении давления в аппарате коэффициент конденсации растет, а при заданном давлении уменьшается с ростом толщины слоя льда.

Полученные значения коэффициента конденсации $\bar{\alpha}$ в вакууме

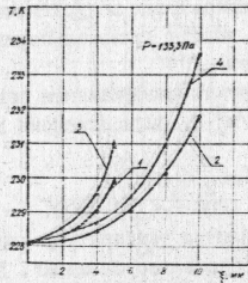


Рис. 5 Распределение полей температур в слое десублимированного льда в зависимости от его толщины и коэффициента теплоотдачи

- | | | |
|-----|-------------------|--|
| 1 - | $\delta = 5$ мм, | $\alpha_2 = 1050$ Вт/м ² ·К |
| 2 - | $\delta = 10$ мм, | $\alpha_2 = 1050$ Вт/м ² ·К |
| 3 - | $\delta = 5$ мм, | $\alpha_2 = 350$ Вт/м ² ·К |
| 4 - | $\delta = 10$ мм, | $\alpha_2 = 350$ Вт/м ² ·К |

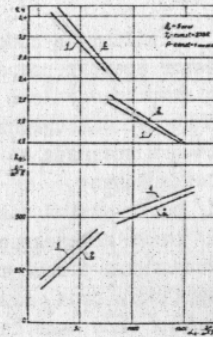


Рис. 6 Зависимость времени десублимации и коэффициента теплопередачи десублиматора от коэффициента теплоотдачи α_2

- | | |
|-----|-------------|
| 1 - | теория |
| 2 - | эксперимент |

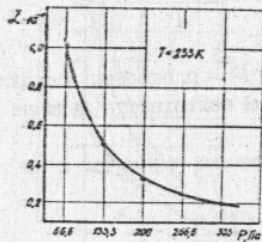


Рис. 7 Изменение коэффициента конденсации α от величины остаточного давления в аппарате P

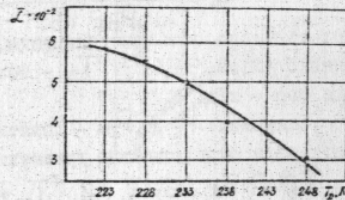


Рис. 8 Изменение коэффициента конденсации α от температуры на поверхности льда T_s

$0,012 \leq \alpha \leq 0,058$ /значительно меньше единицы, что можно объяснить тем, что только некоторые молекулы, уходящие из отсорбируемого слоя в результате столкновения с другими в паровой фазе, возвращаются на охлаждаемую поверхность. Эти результаты согласуются с работами других исследователей.

ВЫВОДЫ

1. На основе анализа литературных источников уточнена физическая и разработана математическая модели процесса десублимации, учитывающие изменение коэффициента теплоотдачи α_2 к хладагенту; разработан алгоритм и составлена программа для решения на ЭВМ системы уравнений, входящих в предложенную математическую модель.

2. Эффективная работа десублиматора достигается за счет совмещения конденсатора в одном корпусе с сублиматором и созданием новой формы конденсатора, обеспечивающей максимальное приближение зоны сублимации к зоне десублимации, что сводит к минимуму сопротивление для транспорта водяного пара от сублимируемого продукта к охлаждаемой поверхности.

3. На основании экспериментальных исследований установлено, что на скорость десублимации влияет температура поверхности льда T_D /температура поверхности раздела сред пар-лед/, а также движущая сила процесса, - разность давлений между давлением насыщения P_D и давлением на поверхности десублимированного льда P_D .

4. В процессе исследований при изменении коэффициента теплоотдачи α_2 от стенки десублиматора к хладагенту в пределах от 300 до 1500 Вт/м²·К были отмечены два режима теплоотдачи: режим низкой теплоотдачи $300 \leq \alpha_2 \leq 600$ и режим интенсивной теплоотдачи $1000 \leq \alpha_2 \leq 1500$. При изменении α_2 от 350 до 1450 Вт/м²·К время процесса десублимации уменьшается в 2,7 раза.

5. В результате обработки экспериментальных данных получены инженерные зависимости, по которым можно определить толщину слоя льда в любой определенный промежуток времени работы установки, а также температуру поверхности намороженного льда определенной толщины:

$$\xi = 1,47 \frac{T_s - T_2}{\sqrt{T_2}} \cdot \tau, \text{ мм}$$

$$T_D = T_2 + 0,153 \frac{T_s - T_2}{\sqrt{T_2}} \cdot \xi, \text{ К}$$

6. Экспериментально подтверждена теоретически обоснованная Стриклендом-Констэблем зависимость α - коэффициента конденсации водяного пара в лед от давления. В диапазоне величин остаточных давлений от 66,6 до 333,0 Па α изменяется в пределах от 0,012 до 0,058, что удовлетворительно согласуется с дискретными значениями α , полученными Н.В. Чураевым, М.К. Баранцевым, Л.Делансем, Е.Ф. Андреевым и некоторыми другими авторами с использованием иных экспериментальных методов.

7. Для процесса десублимации не существует стационарного периода /периода с постоянной скоростью десублимации/. Наиболее активно процесс десублимации протекает на фронтальной поверхности десублимированного слоя льда.

8. На экспериментальной установке проверена адекватность ма-

XV 1243

ИНСТИТУТ ХОЛОДА
С.-ПЕТЕРБУРГ
Библиотека

тематической модели по основным параметрам процесса десублимации.
9. Разработана методика инженерного теплового расчета вакуумного десублиматора, работающего при давлениях ниже тройной точки водяного пара.

Основное содержание диссертации изложено в следующих работах:

1. Чумак И.Г., Кириллов В.Х., Лелица А.Г. Расчет продолжительности намораживания льда на испарителе-конденсаторе сублимационной установки. // Холодильная техника и технология: Республиканский межвед. научно-техн. сб. - 1979. - вып. 29. - с. 13-16.
2. Кириллов В.Х., Лелица А.Г., Чумак И.Г. Расчет продолжительности десублимации водяного пара в вакууме на цилиндрической поверхности. // Холодильная техника и технология: Респ. межвед. научно-техн. сб. - 1981. - вып. 33. - с. 79-81.
3. Кириллов В.Х., Лелица А.Г. Кинетика десублимации водяного пара в вакууме на плоской поверхности. // Холодильная техника и технология: Респ. межвед. научно-техн. сб. - 1984. - вып. 38. - с. 81-85.
4. Лелица А.Г. Особенности процесса десублимации водяного пара в условиях разрежения. // Холодильная техника и технология: Респ. межвед. научно-техн. сб. - 1986. - вып. 43. - с. 87-91.
5. Лелица А.Г., Олышамовский В.С. Влияние температуры хладоносителя и коэффициента теплоотдачи на процесс конденсации водяного пара в вакууме. // Тезисы докладов Всесоюзной научно-практической конференции "Искусствен. холод в отраслях агропром. комплекса", - Кишинев, ЦНТ СССР, - 1987, с. 34.
6. Лелица А.Г., Кириллов В.Х., Варивода В.А. и др. Кинетика десублимации водяного пара на плоской поверхности в условиях вакуума. // Холодильная техника и технология: Респ. межвед. научно-техн. сб. - 1988. - вып. 47. - с. 92-94.

Принятые обозначения

α - коэффициент температуропроводности материала; λ - коэффициент теплопроводности материала; ρ - плотность материала;
 δ - толщина; z - переменная во времени толщина слоя льда;
 T, t - температура; τ - время; α - коэффициент конденсации;
 $\alpha_{\text{эф}}$ - коэффициент теплоотдачи; $\alpha_{\text{эф}}$ - эффективный коэффициент теплоотдачи; R - удельная газовая постоянная водяного пара; χ_D - теплога десублимации; P - давление; A - скорость десублимации;
 B - коэффициент массопереноса; Bi - число Био; k - коэффициент теплопередачи; G - масса, массовый расход; F - поверхность;
 J - интенсивность процесса десублимации.

Подстрочные индексы

σ - стенка; Λ - лед; 0, 2, КЛ - хладоноситель; S - насыщение; D - поверхность льда; V' - стенка десублиматора; *общ.* - общее давление в аппарате.