

Автореферат
В18

ОДЕССКИЙ ИНСТИТУТ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ТЕХНИКИ И ЭНЕРГЕТИКИ

На правах рукописи

Варивода Василий Андреевич

ДИНАМИКА ИНЕЕОБРАЗОВАНИЯ НА ТЕПЛООБМЕННЫХ ПОВЕРХНОСТЯХ
ХОЛОДИЛЬНЫХ АППАРАТОВ

Специальность 05.14.05 - Теоретические основы
теплотехники

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Одесса - 1990



XV 932



Работа выполнена в Одесском институте низкотемпературной техники и энергетики

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

Официальные оппоненты - доктор технических наук, профессор Чепурненко В.П.
- кандидат технических наук, доцент Маринюк Б.Т.

Ведущая организация - Всесоюзный научно-исследовательский конструкторско-технологический институт плодоовощной промышленности (ВНИКТИплодпром)

Защита диссертации состоится "28" декабря 1990 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 института.

Автореферат разослан "22" ноября 1990 г.

секретарь

с.к.с.

Р.К. Никульшин

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. В настоящее время трудно представить массовое хранение пищевых продуктов без применения искусственного холода. Интенсификацию производства искусственного холода все более увязывают с применением воздухоохладителей (ВО) - аппаратов, в которых, для улучшения теплообменных качеств, организована принудительная циркуляция охлаждаемого воздуха. Однако на пути повышения холодопроизводительности аппарата исследователь непременно сталкивается с проблемой сопутствующей активности инееобразования.

Иней, нарастающий на теплообменной поверхности, способен существенно ухудшить теплообмен, особенно если он формируется рыхлым и большой толщины. Поэтому конструктивный расчет теплообменной поверхности должен быть выполнен прежде всего с учетом инееобразования. И так как нет пока эффективного способа избежать инееобразования, то очень важно научиться управлять этим процессом. Управление должно обеспечить формирование медленно растущего, плотного инея.

Перед исследователем, таким образом, стоит главный вопрос: какое сочетание конструктивных параметров ВО и допустимых внешних физических условий обеспечит оптимальный по холодопроизводительности (или другому важному качеству) режим инееобразования? Ответ на него может быть получен на основании хорошо разработанной теории.

Исследованию процессов тепломассообмена в условиях инееобразования посвящено много работ, абсолютное большинство из которых - экспериментальные. Не умаляя важности таких работ, следует отметить и их бесспорные недостатки - зависимость результатов от конкретного аппарата, погрешностей измерительных приборов, вызванных уникальными свойствами инея как объекта измерения. Почти все авторы отмечают сложность и недостаточную изученность, отсутствие теории этого процесса, свободной от указанных недостатков.

Предлагаемая работа посвящена теоретическому исследованию тепломассообменных процессов в условиях инееобразования и в этом ее актуальность.

Цель работы. Исследование динамики инееобразования на низкотемпературных теплообменных поверхностях и его влияния на интенсивность теплопередачи для создания более точных, чем существующие теоретических и программных средств расчета теплообменных ап-

паратов и режимов их работы.

Задачи исследования. 1. Анализ существующих и создание новых, более общих моделей инеобразования, пригодных для качественного (теоретического) исследования этого процесса.

2. Постановка и аналитическое решение краевых задач теплообмена в условиях инеобразования (для краткости – задач инеобразования) для областей теплообменника и, растущего на его поверхности, иневого слоя.

3. Разработка рабочих программ для расчета средствами ПЭВМ на основании полученных теоретических зависимостей основных характеристик исследуемого процесса.

4. Проведение расчетов, их обработка и сравнение с известными экспериментальными данными.

Научная новизна. 1. Поставлены и решены аналитически новые сопряженные краевые задачи теплообмена для плоских и цилиндрических областей, для продольного и радиального ребер с инеем. Под решением имеется в виду: а) получение температурных полей в области формирующегося инея и в материале теплообменника; б) получение зависимостей, определяющих динамику роста и одновременного уплотнения уже выросшего инея; в) определение интенсивности полезного теплообмена как функции толщины и плотности образующегося иневого слоя; г) определение эффективных значений внешних коэффициентов тепло- и массообмена; д) определение наибольшей толщины иневого слоя.

2. Создана новая методика расчета теплообменных поверхностей ВО, предназначенных для работы в условиях инеобразования. Эта методика учитывает взаимовлияние процесса инеобразования и изменения внешних условий тепло- и массообмена, имеющее место вследствие уменьшения живого сечения для прогона охлаждаемого воздуха через межреберное пространство.

Научное положение, защищаемое в работе. Теорию инеобразования следует развивать, используя квазистационарный характер этого процесса.

Основные научные результаты работы. 1. Использование квазистационарности дало хорошее согласование построенной теории с известными экспериментальными данными для инеобразования спустя 1-2 часа от его начала (далее – лучшее), но плохое – в самом начале.

2. Предложена новая модель образования инея, отличающаяся от других известных моделей тем, что только на ее основе получены аналитические решения задач инеобразования, учитывающие неодно-

родности плотности и теплопроводности формирующегося инея по толщине слоя и во времени, влияние объемных источников тепла фазового перехода.

3. Предложена новая методика расчета теплообменных поверхностей ВО, отличающаяся от других известных методик тем, что только она учитывает динамическое влияние формирующегося инея на теплообмен: локальные изменения плотности и теплопроводности инея, температуры воздуха по его ходу в аппарате и во времени; определяет: температуру воздуха и его влагосодержание на выходе из аппарата, время цикла, массу выросшего инея и другие, важные для прогнозирования качества работы будущего аппарата, параметры.

Практическая ценность работы. Полученные средства прогнозирования дают возможность разработчику выбрать наиболее подходящую конструкцию теплообменной поверхности аппарата, предназначенного для работы в условиях инеобразования, избавляя его от больших затрат, уходящих до настоящего времени на создание и испытание огромного количества опытных образцов.

Атробация работы. Основные результаты диссертации доложены на научных конференциях профессорско-преподавательского состава ОИИТЭ (ОТИХП) (Одесса, апрель 1986 и апрель 1988 гг.); научном семинаре ЦИИЛ ОТИХП "Научно-технические проблемы тепло- и хладотехники" (Одесса, 11 мая 1985 г.); Всесоюзной научно-практической конференции "Интенсификация производства и применения искусственного холода" (Ленинград, ЛТИХП, 16 октября 1986 г.); научном семинаре кафедры "Теоретические основы теплохладотехники" (Ленинград, ЛТИХП, 14 апреля 1987 г.); Республиканской научной конференции "Дифференциальные и интегральные уравнения и их приложения" (Одесса, ОГУ, 23 сентября 1987 г.); научно-техническом совете ИО "Веста" (Киев, 22 июня 1989 г.); Всесоюзной научно-практической конференции "Пути интенсификации производства с применением искусственного холода в отраслях агропромышленного комплекса, торговле и на транспорте" (Одесса, ОИИТЭ, 25 октября 1989 г.).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 9 работ.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав, выводов, списка использованной литературы (38 наименований) и II приложений. Работа изложена на 89 страницах машинописного текста, содержит 21 рисунок и 10 таблиц. Приложения занимают 47 страниц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность работы. Сформулированы ее цель, научная новизна, научные положения, практическая значимость. Изложены методика исследования, достоверность исследования, апробация, публикации, объем и структура работы.

В главе I анализируются работы, которые близки к исследованию по теме диссертации, известные модели инееобразования на предмет пригодности к теоретическому исследованию (получению аналитических решений для качественного исследования процесса).

Отмечается, что известные теоретические исследования сводятся к аналитическому решению так называемой задачи Стефана – краевой задачи о промерзании среды, содержащей жидкость (например, воду), так как температура фазового перехода (криоскопическая температура) принимается постоянной (задается или является одной из искомым величин). Т.е., применительно к водной среде, задача Стефана – это задача об образовании водного льда. Однако на теплообменных поверхностях аппаратов искусственного холода образуется, главным образом, не лед из воды, а иней из пара, содержащегося в воздухе.

При образовании инея условие постоянства температуры фазового перехода является неприемлемым. Поэтому для замыкания краевой задачи тепломассообмена в условиях инееобразования следует принять некоторые дополнительные условия, описывающие механизм тепломассопереноса.

При инееобразовании сложным образом взаимодействуют несколько механизмов тепломассопереноса (Напалков Г.Н. Тепломассоперенос в условиях образования инея. М.: Машиностроение, 1983). По этой причине исследователи инееобразования обращаются к построению упрощенных моделей и гипотез этого сложного явления.

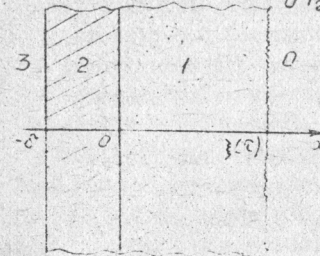
В литературе описано большое число моделей, отличающихся дополнительными условиями, замыкающими задачу типа Стефана, но не позволивших, однако, авторам получить аналитические решения задач инееобразования в достаточно общей постановке. Предлагаемая работа предпринята для восполнения этого пробела.

Математическое описание процессов тепломассообмена в условиях инееобразования на плоской стенке теплообменника представляется нам следующей одномерной сопряженной краевой задачей математической физики (рис. I).

Уравнения теплопроводности для слоя инея и стенки:

$$c_1 \rho_1 \partial T_1 / \partial \tau = (\partial / \partial x) (\lambda_1 \partial T_1 / \partial x) + \omega r_2 \rho_1 d \rho_1 / d \tau, \quad -\delta < x < \xi \quad (1)$$

$$\partial T_2 / \partial \tau = a_2 \partial^2 T_2 / \partial x^2, \quad -\delta < x < 0 \quad (2)$$



Граничные условия третьего рода на теплообменной поверхности со стороны хладагента:

$$\lambda_2 \partial T_2 / \partial x = \alpha_3 (T_2 - T_3), \quad x = -\delta \quad (3)$$

Условия сопряжения на внешней поверхности теплообменника:

$$T_1 = T_2, \quad x = 0 \quad (4)$$

Рис. I. Области: 0 – охлаждаемого влажного воздуха; 1 – инея; 2 – стенки; 3 – хладагента.

$$\lambda_1 \partial T_1 / \partial x = \lambda_2 \partial T_2 / \partial x, \quad x = 0 \quad (5)$$

Условия теплообмена на подвижной свободной поверхности инея:

$$\lambda_1 \partial T_1 / \partial x = \alpha_0 (T_0 - T_1) + r_2 \rho_1 d \xi / d \tau, \quad x = \xi \quad (6)$$

Условия массообмена:

$$(d/d\tau) \int_0^{\xi} \rho_1(x, \tau) dx = \beta (\rho_0 - \rho_1^*), \quad x = \xi \quad (7)$$

Начальные условия:

$$\xi = 0, \quad \tau = 0 \quad (8)$$

Исходя из постановки задачи (I) – (8), проанализируем влияние массообмена на теплообмен. Вследствие разности парциальных давлений из охлаждаемого влажного воздуха к свободной поверхности инея поступает пар, который затем вымораживается, изменяя массу инеевого слоя. Изменение массы инея

$$(d/d\tau) \int_0^{\xi} \rho_1(x, \tau) dx = \int_0^{\xi} (d\rho_1/d\tau) dx + \rho_1(\xi, \tau) d\xi/d\tau$$

обеспечивается, как видно, локальным изменением плотности по всему уже образованному инеевому слою и изменением толщины этого слоя. Изменение локальной плотности инея образует объемные источники тепла фазового перехода (см. последнее слагаемое уравнения (I), где множитель ω учитывает частичное ($\omega < 1$) или полное ($\omega = 1$) вымораживание влаги, оказавшейся в порах инеевого слоя). Изменение толщины слоя образует поверхностное распределение источников тепла фазо-

вого перехода (см. последнее слагаемое уравнения (6)).

Внешний коэффициент теплоотдачи α_0 , зависящий от физических параметров воздуха, его скорости и формы обтекаемой поверхности теплообменника, может быть определен на основании соответствующих критериальных соотношений между числами Нуссельта и Рейнольдса, предложенных Гоголиным А.А., Карасиной Э.С., Юдиным В.Ф., Шмидтом Т.Е., Барроном и Хэном и др. Внутренний коэффициент теплоотдачи (со стороны хладагента) принимался постоянным. Для коэффициента массоотдачи, приведенного к парциальным давлениям, имеем зависимость

$$\beta = \alpha_0 / (1,84 c_p \rho_0), \quad (9)$$

полученную на основании подобия процессов тепло- и массообмена (Берман Л.Д. Испарительное охлаждение циркуляционной воды. М.-Л.: Госэнергоиздат, 1957). При небольших температурных напорах парциальные давления пара аппроксимируются линейно по температуре (Чижов Г.Б. Линейная аппроксимация зависимости давления водяного пара над льдом, насыщающего воздух, от его температуры // Холодил. техника.- 1971.- № 9)

$$P_0 = \varphi (A + B T_0); \quad P_1'' = A + B T_1(\xi, \zeta), \quad (10)$$

где $A = (T_0 P_3'' - T_3 P_0'') / (T_0 - T_3); \quad B = (P_0'' - P_1'') / (T_0 - T_3)$ (11)

Задача (I) - (8) еще не является замкнутой. Для однозначного описания динамики инееобразования необходимо задать, кроме того, теплофизические и макроструктурные (феноменологические) характеристики инея

$$\rho_i = \rho_i(x, \xi); \quad \lambda_i = \lambda_i(\rho_i); \quad c_i = c_i(\rho_i, T_i); \quad \omega \quad (12)$$

В работе рассмотрены аналитические решения задачи (I) - (8) при различных дополнительных условиях (2), замыкающих ее; выясняется влияние отдельных источников членов на динамику инееобразования и теплообмен.

В начале главы 2 рассмотрена простейшая задача инееобразования ($\rho_{ин} = const$) и две задачи образования льда. Все, приведенные в диссертации, аналитические решения задач инееобразования являются новыми, включая решение и этой простейшей задачи. Задачи льдообразования приведены для того, чтобы подчеркнуть, не отмеченные досих пор в литературе, различия в постановках краевых задач инее- и льдообразования.

Нами предложена новая модель инееобразования, основанная на гипотезе о распределении плотности инея по слою и во времени. Она состоит в том, что в качестве дополнительного условия (I2) берется

$$\rho_1(x, \xi) = \rho_2(1 - \kappa x / \xi) \quad (13)$$

Поясним выражение (13). Для этого выделим в слое инея параллелепипед со сторонами $\xi, 2\gamma, 1$, причем последняя сторона (назовем ее высотой) направлена перпендикулярно к плоскости рис.2. Пусть параллелепипед занят инеем плотности ρ_0 , за исключением макropоры - призмы той же высоты и треугольного основания (с вершиной треугольника в точке 0 и противоположной стороной длины 2γ , расположенной вдоль свободной поверхности инея $x = \xi$ (C)). Тогда можно рассматривать иней как сплошную среду, принимая следующую гипотезу

$$\rho_1(x, \xi) V = \rho_2 V_2, \quad (14)$$

где $V = 2\gamma \Delta x$ - объем части параллелепипеда между координатами x и $x + \Delta x$; $V_2 = V - V_1$ - часть объема V , занятая инеем плотности ρ_0 . При малых Δx $V_1 = 2\gamma \kappa \Delta x / \xi$ и гипотеза (14) дает условие (13), где $\kappa = V / \gamma < 1$.

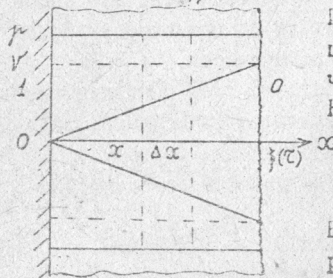


Рис.2. Схема предлагаемой модели инееобразования: 0 - область охлаждаемого влажного воздуха; 1 - область хладагента; $x=0$ - теплообменная поверхность.

Предполагая верной связь между коэффициентами тепло- и массообмена (9), получаем определяющую зависимость параметра κ модели (13)

$$\kappa = \frac{2}{\frac{B T_0 (P_0 - P_1'')}{4,83 c_p \rho_0 (1 - \varphi) P_0''} + 1} \quad (15)$$

В конце главы 2 на основании модели (13) решены две задачи инееобразования на плоской поверхности: одна с граничными условиями первого рода на внешней поверхности и вторая - сопряженная. Покажем здесь квазистационарное решение сопряженной задачи (I)-(8) с переменной теплопроводностью инея. Пусть $\lambda_i = k_i \rho_i(x, \xi)$. Тогда решение имеет вид

$$T_1(x, \xi) = T_3 - b_3(\xi + b_4) / (\xi + b_5) \left[(\xi / \kappa \lambda_2) \ln(1 - \kappa x / \xi) - \sigma^2 / \lambda_2 - 1 / \alpha_3 \right] + (\rho_0 \gamma b_6 / 2 \lambda_2) (\xi - b) / [\xi (\xi + b_5)] \left[x(x/2 + \xi / \kappa) + (\xi / \kappa)^2 \ln(1 - \kappa x / \xi) \right] \quad (16)$$

$$T_2(x, \xi) = T_3 + b_3(\xi + b_4) / (\xi + b_5) \left[(x + \sigma) / \lambda_2 + 1 / \alpha_3 \right] \quad (17)$$

$$\tau(\xi) = (1 / b_6) \left[\xi + (b_5 + b) \ln(1 - \xi / b) \right] \quad (18)$$

$$\eta(\xi) = [T_0 - T_1(\xi, \xi)] / [T_0 - T_1(0, 0)] \quad (19)$$

$$\xi_{max} = \delta = -\kappa \lambda_c / [\lambda_c \ln(1-\kappa)] \{ (\rho_0 - \rho_3) / [(1-\varphi)\rho_0] - \lambda_c (\delta^2 / \lambda_2 + 1 / \lambda_3) \}, \quad (20)$$

где $\lambda_c = k_1 \rho_c$ - коэффициент теплопроводности инея непосредственно на стенке ($x=0$ на рис.1). Используя зависимость Шмидта (Напалков Г.Н. Теплоперенос в условиях образования инея. М.: Машиностроение, 1963), имеем: $\lambda_c = 2,73 \cdot 10^{-6} \rho_c^2$. Постоянные δ_i ($i=3,4,5,6$), входящие в решения (16)-(20), имеют конкретные выражения через исходные данные задачи.

Учет объемных источников тепла фазового перехода в уравнении (I) позволил выявить нелинейный характер температурных полей в инее по слою (см. решения (16)).

Глава 3 посвящена постановке и аналитическому решению краевых задач инеобразования на цилиндрической поверхности, на продольном и радиальном ребрах. Главная цель исследования данной главы состоит в том, чтобы выявить - при каких условиях процессы инеобразования на поверхностях, обладающих кривизной, и развитых путем оребрения подобны процессам инеобразования на плоской поверхности. Это необходимо для использования в инженерной практике по возможности более простых формул инеобразования на плоской поверхности.

В главе 4 предложена организация расчета на ЭВМ динамики инеобразования. Для удобства иллюстраций результатов вычислений, задачи, решенные в главах 2 и 3, пронумерованы следующим образом.

1. Простейшая задача инеобразования на плоской поверхности.
2. Задача льдообразования при $T_0 < T_x$.
3. Задача льдообразования при $T_0 = T_x$.
4. Задача инеобразования на плоской поверхности с учетом неоднородности плотности инея во времени. Упрощенное решение.
5. Асимптотическое решение предыдущей задачи.
6. Задача инеобразования на плоскости (без учета стенки) в предположении неоднородностей плотности и теплопроводности инея не только во времени, но и по толщине слоя.
7. Сопряженная задача инеобразования в тех же предположениях, что и в предыдущей задаче, но с учетом толщины, теплопроводности стенки теплообменника и теплоотдачи со стороны хладагента.
8. Задача инеобразования на цилиндрической поверхности.
9. Задача инеобразования на продольном ребре.
10. Задача инеобразования на радиальном ребре.

Приводятся графики изменения основных параметров инеобразова-

ния: времени инеобразования, интенсивности теплообмена, температур теплообменника и свободной поверхности инея в зависимости от толщины инеерого слоя, высоты ребра и др. Дан сравнительный анализ результатов расчета, полученных на основании различной общности моделей и с экспериментальными данными. Приведем здесь только графики для сравнительного анализа (рис. 3, 4)

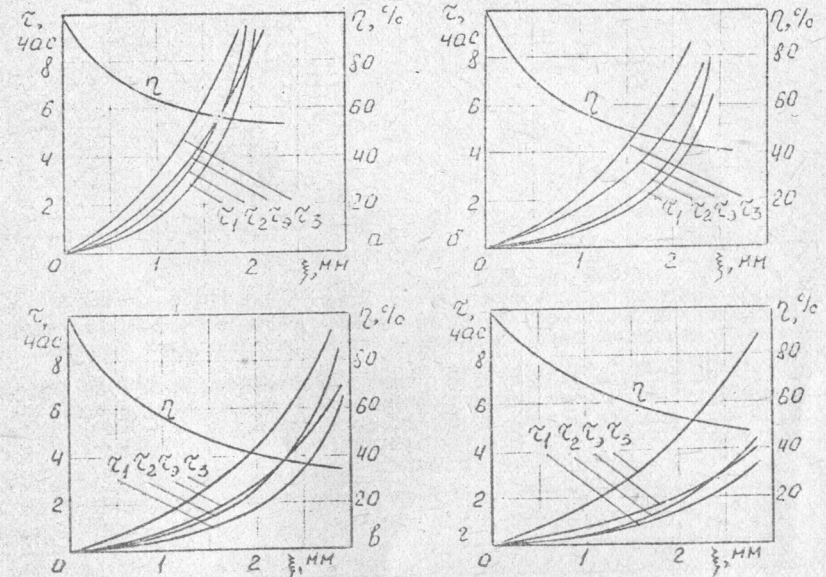


Рис.3. Графики зависимостей времени инеобразования и интенсивности теплообмена от толщины инеерого слоя при следующих значениях основных исходных данных: $T_0 = 0^\circ\text{C}$; $T_x = -5^\circ\text{C}$; $p_0^* = 610 \text{ Па}$; $p_3^* = 309,4 \text{ Па}$; $\lambda_3 = 500 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К)}$; $\lambda_2 = 45 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К)}$; $\delta^* = 10^{-3} \text{ м}$; $\rho = 1,293 \text{ кг/м}^3$. Параметры с индексами 1 и 2 соответствуют формулам двух решений задачи 7 (в автореферате приведено только второе); с индексами 3 и "э" - теоретической формуле и экспериментам Ивановой. Относительная влажность воздуха и его массовая скорость варьировались (см. табл.1).

Варианты:	φ	$(W\rho)_0$	Результаты расчета по формулам предлагаемых решений сравнивались между собой, а также с результатами расчета по формулам Чукулина (Чукулин С.Г., Мартыновский В.С., Мельцер Л.З. Холодильные установки. -М.: ГИТЛ, 1961), Герасимова (Герасимов Н.А., Румянцев Ю.Д., Сундиев И.П. Влияние толщины слоя инея на эффективность
		$\text{кг/(с} \cdot \text{м}^2)$	
а	0,74	4,28	
б	0,78	4,13	
в	0,82	4,24	
г	" "	8,55	

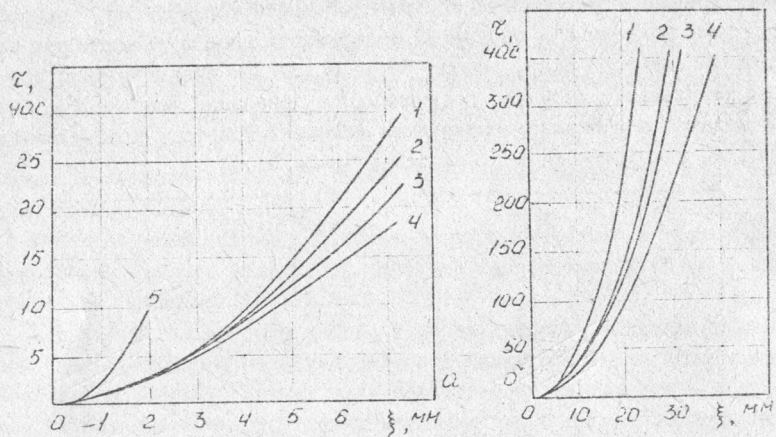


Рис.4. Графики зависимости времени инееобразования на плоской, цилиндрической поверхностях, на продольном ребре от толщины инеевого слоя, построенные на основании расчетов при одинаковых исходных данных таблицы 2:
 а) 1 - по формуле задачи 9; 2 - по формуле задачи 8; 3 - по формулам задач 1, 4, 6; 4 - по формуле Чулкина; 5 - по формуле Герасимова;
 б) 1 - по формуле задачи 9; 2 - по формуле задачи 6; 3 - по формулам задач 1, 4; 4 - по формуле Чулкина.

Табл.2

T_0	T_3	P_0''	P_3''	φ	L_0	L_3	λ_1	λ_2	β	σ	$\rho_{ин}$
-6,75	-16	345	150,6	0,98	46	800	0,142	45	$2,775 \cdot 10^{-7}$	$1,75 \cdot 10^{-3}$	200

работы воздухоохлаждателей // Холодил. техника.-1981.-№ 4), Ивановой (Иванова В.С. Нарастание инея в зависимости от условий эксплуатации воздухоохлаждателей // Холодил. техника.-1978.-№ 9), а также с экспериментальными данными Ивановой (там же) и Хмаладзе (Хмаладзе О.Ш. Тепломассообмен и аэродинамика биметаллических поверхностей в воздухоохлаждателях камер замораживания мяса: Дисс. на соискание уч. ст. канд. техн. наук.-Одесса, ОТХП, 1984). Пример сравнения показан в табл.3 по состоянию на 20 и 200 час работы аппарата.

На основании сравнительного анализа определены следующие границы применимости предлагаемых моделей инееобразования: для малых времен (2+20 час) при небольших кривизнах теплообменных поверхностей (радиуса 10 мм и больше), толщинах стенок (1+5 мм), большой теплопроводности теплообменника (45 Вт/(м²·К) и выше), больших относительных влажностях воздуха (0,92+0,98), больших скоростях воздуха

(6+14 м/с) инееобразование на цилиндрических и оребренных поверхностях подобно инееобразованию на плоской поверхности, причем в указанных пределах основных параметров целесообразно применять простейшую модель инееобразования ($\rho_{ин} = const$) задачи 1, дающую здесь погрешность 10+15 % по сравнению с наиболее общей из приведенных моделей.

Табл.3

№	Рассчетные формулы	20 час		200 час	
		ξ , мм	Δ , %	ξ , мм	Δ , %
1	Чулкина	7,60	10,1	28,8	-23,6
2	Герасимова	3,30	-52,2	-	-
3	Задачи 1	6,90	0	24,5	-5,2
4	" - 4	6,90	0	24,5	-5,2
5	" - 6	6,90	0	23,3	0
6	" - 8	6,38	-7,5	21,2	9,0
7	" - 9	5,95	-13,8	19,0	18,4

В главе 5 изложена методика расчета теплообменных поверхностей ВО, учитывающая динамику инееобразования. Основные исходные данные предлагаемой методики составляют группу из следующих двадцати параметров: $T_0, P_0'', C_P, P_3, P_3'', \lambda_B, V_B, \varphi, G_0$ - соответственно температура воздуха на входе в ВО, парциальное давление насыщенного пара при T_0 , теплоемкость, давление, плотность, коэффициент теплопроводности, кинематическая вязкость, относительная влажность и массовый расход воздуха; T_3, P_3'' - температура материала теплообменника и парциальное давление насыщенного пара при T_3 ; R_B - скрытая теплота десублимации; δ, u_0 - толщина и шаг ребер; u_1, u_2 - шаг труб по фронту и шаг труб по глубине ВО; d - диаметр труб пучка; l_6, l_7 и l_8 - ширина, высота и глубина ВО.

Дополнительные исходные данные. Радиальные ребра: h_p - высота ребра; Pr - число Прандтля; s и n - постоянные, входящие в критериальную зависимость Карасиной Э.С. (Андреев П.А. и др. Теплообменные аппараты ядерных энергетических установок.-Л.: Судостроение, 1969), используемую нами для определения внешнего коэффициента теплоотдачи. Пластинчатое оребрение: a - параметр, входящий в критериальную зависимость Гоголина (Гоголин А.А. Кондиционирование воздуха в мясной промышленности.-М.: Пищевая промышленность, 1966) для определения внешнего коэффициента теплоотдачи.

Результаты вычислений, выводимые на печать. Постоянные параметры: общая площадь теплообменной поверхности, число ребер на одной трубе, число труб в пучке по ходу воздуха и по фронту, мощность начальной полезной теплосдачи (без инея), масса выросшего инея за

цикл между соседними двумя оттайками и длительность этого цикла. Параметры, зависящие от времени (толщины инея): интенсивность теплопередачи, аэродинамическое сопротивление пучка труб прогону воздуха. Параметры, зависящие от времени и от координаты x по глубине ВО: толщина инея, скорость воздуха, внешние коэффициенты тепло- и массоотдачи, температура воздуха (в том числе и на выходе из аппарата), температура поверхности инея, общая площадь живого сечения, коэффициент теплопроводности инея, коэффициент K принятой модели инеобразования, необходимый для определения локальной плотности инея

$$\rho(x, y, \xi) = \rho_c [1 - \kappa(x, \xi) \psi / \xi],$$

где x, y - координаты по глубине ВО и по толщине инея.

Приведем графики (рис.5) и данные (табл.4) для сравнительного анализа результатов расчета по предлагаемой методике и экспериментов Хмаладзе.

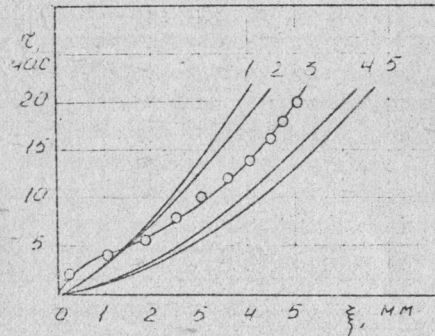


Рис.5. Графики зависимости времени инеобразования на обрешенных теплообменных поверхностях ВО (радиальные ребра): 1 и 5 - на последнем и первом рядах труб при шахматном расположении; 2 и 4 - на последнем и первом рядах труб при коридорном расположении; 3 - экспериментальная кривая усредненных значений Хмаладзе при шахматном расположении труб в пучке.

Табл.4

№ п/п	Часы	Вх, мм	Вых, мм	ср, мм	ε ср, мм	Δ, %
1	2	1,40	0,62	1,01	0,20	405,0
2	4	2,30	1,14	1,72	1,10	56,4
3	6	3,03	1,59	2,31	1,65	24,9
4	8	3,65	2,00	2,62	2,50	13,0
5	10	4,21	2,38	3,30	3,00	9,0
6	12	4,71	2,73	3,72	3,60	3,3
7	14	5,18	3,06	4,12	4,10	0,5
8	16	5,61	3,35	4,50	4,50	0
9	18	6,01	3,67	4,84	4,75	1,9
10	20	6,38	3,96	5,17	5,00	3,4

Приведенные на рис.5 кривые получены при следующих исходных данных Хмаладзе по экспериментальному исследованию аппарата ВО-БЛП-50: $T_1 = -6,75^\circ\text{C}$; $T_2 = -14^\circ\text{C}$; $p_1^* = 345 \text{ Па}$; $p_2^* = 181 \text{ Па}$; $\gamma_2 = 2,8262 \cdot 10^6 \text{ Дж/кг}$; $\sigma^* = 1,75 \cdot 10^{-3} \text{ м}$; $d = 0,04 \text{ м}$; $U_0 = 0,015 \text{ м}$; $U_1 = 0,12 \text{ м}$; $U_2 = 0,105 \text{ м}$ (шахматный пучок); $l_6 = 0,9 \text{ м}$; $l_7 = 0,72 \text{ м}$; $l_8 = 1,575 \text{ м}$; $c_p = 1008 \text{ Дж/(кг}\cdot\text{K)}$; $\rho_B = 1,332 \text{ кг/м}^3$; $\lambda_B = 0,0238 \text{ Вт/(м}\cdot\text{K)}$; $\nu = 1,26 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2/\text{с}$; $p_B = 101300 \text{ Па}$; $\psi = 0,98$; $G_0 = 1,73 \text{ м}^3/\text{с}$; $\rho_c = 300 \text{ кг/м}^3$; $c = 0,251$; $n = 0,65$ (шахматный пучок); $P_n = 0,711$; $h_p = 0,025 \text{ м}$. В случае коридорного пучка труб $U_2 = 0,12 \text{ м}$; $c = 0,117$; $n = 0,72$.

Основные выводы

1. Для развития теории инеобразования наиболее плодотворным является использование квазистационарности этого процесса.
2. Процесс инеобразования в ВО, как и на одиночных поверхностях, также переходит в квазистационарный, но несколько позже. Для одиночных поверхностей он наступает спустя 2-4 часа от начала инеобразования; в аппарате - спустя 4-8 часов.
3. Эффективное значение плотности инея, используемое простейшей моделью ($\rho_{ин} = \rho_c \int (1 - \kappa x / \xi) dx = \rho_c (1 - \kappa / 2)$), может быть вычислено по формуле

$$\rho_{ин} = (\rho_c / \xi) \int_0^{\xi} (1 - \kappa x / \xi) dx = \rho_c (1 - \kappa / 2),$$

- где ρ_c можно брать втрое меньшим плотностью льда - установлено на основании сравнений с экспериментами Ивановой и Хмаладзе.
4. Простейшая модель непригодна в случае инеобразования при естественной конвекции и при малой относительной влажности воздуха, т.к. в этом случае плотность формирующегося инея существенно переменно по толщине слоя. Тогда необходимо применять модель (13) либо диффузионную модель Дюна-Шаркера.
 5. С наступлением периода квазистационарности процесса предложенная методика расчета теплообменных поверхностей ВО дает погрешность в пределах 15%.
 6. Предложенная методика определяет локальные по времени и координатам значения внешних коэффициентов тепло- и массообмена, плотности и теплопроводности инея. Т.е. ее можно считать и обратной задачей теплообмена.
 7. При больших ψ , T_0 , $T - T_0$ или меньшем p_0 (барометрическом давлении воздуха) образующийся иней более плотный.
 8. Шахматное расположение пучков труб имеет преимущества перед коридорным расположением по холодопроизводительности, но теряет по времени цикла и аэродинамическому сопротивлению прогону воздуха (при прочих равных условиях).
 9. Пластинчатое обрешение пучка труб имеет большие преимущества над обрешением радиальными ребрами по холодопроизводительности и аэродинамическому сопротивлению, по компактности теплообменной поверхности.

Основное содержание диссертации опубликовано в работах:
 1. Баривола В.А., Кириллов В.К. Инеобразование на плоской поверхности // ХТ и Т: Респ. мехвед. науч.-техн. сб.-1966.-Вып.43.-С. 91-96.
 2. Баривола В.А. Внешнее инеобразование на цилиндрической поверхности // ХТ и Т.-1967.-Вып.44.-С. 77-82.

3. Варивода В.А. Математическая модель динамики роста слоя инея на радиальном ребре развитой теплообменной поверхности // Материалы Респ. науч. конф. "Дифференциальные и интегральные уравнения и их приложения" (ОГУ.-Одесса. 1987.-Ч. I.-С. 37).
4. Варивода В.А. Новая модель инееобразования, основанная на гипотезе о плотности инея // ХТ и Т.-1987.-Вып.45.-С. 47-52.
5. Варивода В.А., Кириллов В.Х. Квазистационарные решения краевых задач образования инея и льда // ХТ и Т.-1988.-Вып.46.-С. 53-58.
6. Варивода В.А. Соприженная краевая задача теплопроводности в условиях инееобразования, основанная на гипотезе о распределении плотности инея // ХТ и Т.-1988.-Вып.47.-С. 85-92.
7. Варивода В.А., Кириллов В.Х. Уравнение теплопроводности для радиального ребра с инеем. Решение краевой задачи для ребра прямоугольного профиля // ХТ и Т.-1989.-Вып.48.-С. 26-31.
8. Варивода В.А., Кириллов В.Х. Квазистационарное уравнение теплопроводности для продольного ребра с инеем // Изв. вузов СССР. Пищевая технология.-1989.-№ 2.-С. 104-107.
9. Варивода В.А. К методике расчета теплообменных поверхностей воздухоохладителей, работающих в условиях инееобразования // УП. Тепломассоперенос в холодильных и криогенных установках: Тез. докл. Всес. науч.-практ. конф. "Пути интенсификации производства с применением искусственного холода в отраслях агропромышленного комплекса, торговле и на транспорте" (24-26 октября 1989 г.) / ОИМТЭ.-Одесса, 1989.-С. 45.

Основные условные обозначения

τ - время, с; x, y - геометрические координаты, м; φ - относительная влажность воздуха; p_0 - парциальное давление пара в охлаждаемом воздухе с влажностью φ ; p_i^0 ($i=0,1,3$) - парциальное давление насыщенного пара в воздухе, Па при температуре T_i ; T_i - температура, К или $^{\circ}\text{C}$ ($i=0,1,2,3$) - номер области); $T_{\text{з}}$ - температура заморозания воды (криоскопическая), К; c_p - теплоемкость, Дж/(кг·К); ρ - плотность, кг/м³; λ_i - коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К) ($i=1,2$ - номер области); δ - толщина инея, м; $\delta_{\text{н}}$ - наибольшая толщина инея, м; δ^* - толщина стенки, м; $q_{\text{д}}$ - скрытая теплота десублимации, Дж/кг; α_i - коэффициент теплоотдачи, Вт/(м²·К) ($i=0,3$ - номер области); β - коэффициент массоотдачи, приведенный к парциальному давлению, с/м; A (Па), B (Па/К) - коэффициенты линейной аппроксимации парциального давления пара по температуре.

Индексы

s - стенка; $ин$ - иней; $ин-поверхность$ инея; p - ребро; $в$ - воздух.

XV 932
 Институт холода
 ОНАХТ
 Библиотека