

МОСКОВСКИЙ ордена ЛЕНИНА и ордена ОКТЯБРЬСКОЙ РЕВОЛЮЦИИ
ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ

На правах рукописи

МЛЫНСКИЙ АЛЕКСАНДР ВЛАДИСЛАВОВИЧ

УДК 621.528:621.592 .2

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ КОНДЕНСАЦИИ ПРИ НИЗКИХ
ТЕМПЕРАТУРАХ. РАЗРАБОТКА РЕКОМЕНДАЦИЙ ПО
ПРОЕКТИРОВАНИЮ СРЕДСТВ КРИОВАКУУМНОЙ ОТКАЧКИ

Специальность 01.04.09 - физика низких температур
и криогенная техника

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

Москва, 1990

Работа выполнена в Московском ордена Ленина и ордена Октябрьской Революции энергетическом институте.

Научный руководитель: кандидат технических наук, доцент КРЮКОВ А.П.

Официальные оппоненты: доктор технических наук,
ЯРЫГИН В.Н.

кандидат технических наук,
КРАВЧЕНКО В.А.

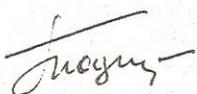
Ведущая организация: Научно-исследовательский институт
вакуумной техники им. С.А.Векшинского

Захита диссертации состоится "23" марта 1990 г.
в 14 час. 00 мин. на заседании специализированного совета
К-053.И6.02 в Московском энергетическом институте, Красноказарменная ул.,
д. 17, корп. "Т", 2 этаж, к. 206.

Отзывы на автореферат, заверенные печатью, просим присыпать
по адресу: 105835, ГСП, Москва Е-250, Красноказарменная ул.,
д. 14, Ученый совет МЭИ.

Автореферат разослан "20" февраля 1990 г.

Ученый секретарь
специализированного совета
К-053.И6.02

 Е.Е.Точкий

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Последние три десятилетия характеризуются активным развитием и использованием криогенных методов получения вакуума, а именно, криоконденсационных, криосорбционных и криозахватных средств откачки. Наибольшее распространение получили криоконденсационные и криосорбционные насосы. Как высоковакуумные средства откачки (давление ниже 10^{-2} Па) они нашли широкое применение во многих отраслях науки и техники. Также уделяется большое внимание разработке и использованию криоконденсационных насосов для области среднего и низкого вакуума (диапазон давлений $10^5 + 10^{-2}$ Па), которые могут быть использованы например следующим образом:

- для обеспечения абсолютно "чистых" вакуумных условий в камерах и установках, используемых в электронной технике;
- для откачки сверхзвуковой струй газа в газодинамических установках и в имитаторах космического пространства.

Однако фактором, сдерживающим применение криоконденсационных средств откачки для области среднего и низкого вакуума, является отсутствие методики расчета насосов, опирающейся на теоретическое и экспериментальное исследование процесса конденсации направленных газовых потоков на охлаждаемых поверхностях. В настоящее время конструкции данного типа насосов в основном рассчитываются с использованием полуземпирических зависимостей, справедливых только в узком диапазоне параметров. Таким образом, для разработки инженерных методик расчета и проектирования криоконденсационных насосов необходимо дальнейшее комплексное изучение процессов, реализующихся в криоконденсационных системах.

Цель работы. На основании проведенных исследований выявить критерии, определяющие характерные режимы истечения откачиваемого газа в вакуумную полость крионасоса, с тем, чтобы на этой основе рекомендовать соответствующие расчетные соотношения для нахождения параметров течения.

Экспериментально определить параметры, влияющие на интенсивность процесса конденсации при откачке в области свободно-молекулярного течения. На основании этих исследований предложить рекомендации для расчета и проектирования криоконденсационных насосов, работающих в области высокого вакуума.

Исследовать процессы конденсации газовых потоков и струй в вязкостном режиме течения (большие интенсивности и скорости) для создания эффективных криоконденсационных средств откачки, работающих в области среднего и низкого вакуума.

Определить параметры, влияющие на интенсивность конденсации газовых потоков при вязкостном течении у криопанели. Установить взаимосвязь параметров газового потока с температурой поверхности конденсации, при которой нарушается процесс полной конденсации. На основании анализа полученных результатов предложить методику расчета процессов, реализующихся в криоконденсационных вакуумных насосах, позволяющую определять основные характеристики насосов данного типа.

Экспериментально получить значения коэффициента теплопроводности твердых конденсатов. Установить взаимосвязь между этими значениями и толщиной криослоя для различных условий (интенсивностей) его образования.

Научная новизна. На основании проведенных экспериментальных исследований показано, что при анализе процесса истечения откачиваемого газа в вакуумную полость крионасоса для определения режима течения следует пользоваться критерием, предложенным Ребровым А.К.

Обнаружено, что интенсивность конденсации при свободно-молекулярном истекании газа на криопанель зависит только от температуры криопанели и от величины удельного массового потока. При реализации сплошного течения газа у криопанели эффективность конденсации существенным образом зависит от рода газового источника, его размеров и расположения относительно криопанели, а также от температуры газа в откачиваемом объеме.

Предложен алгоритм расчета параметров газового потока у криопанели для различных конструкций криоконденсационных насосов.

Разработана методика комплексного расчета процесса конденсации откачиваемого газа, позволяющая при известных параметрах газа в откачиваемом объеме и условиях охлаждения криопанели определять характеристики криоконденсационного насоса.

Получены новые экспериментальные результаты по измерению теплофизических свойств твердых газовых конденсатов. Показано, что теплопроводность криослоев зависит от их толщины.

Практическая ценность. Экспериментальные результаты по конденсации свободно-молекулярных потоков могут быть использованы при конструировании высоковакуумных криоконденсационных насосов.

Разработанная методика комплексного расчета процесса конденсации сплошных газовых потоков позволяет на стадии проектирования форвакуумных криоконденсационных средств определять основные эксплуатационные характеристики насосов, пути их совершенствования и повышать эффективность использования.

Апробация работы. Основные результаты работы докладывались и обсуждались на IV Всесоюзной научно-технической конференции по криогенной технике в 1987 году, на IX и X Всесоюзных конференциях по динамике разреженных газов в 1987 и 1989 году, на II Всесоюзной конференции "Теплофизика и гидрогазодинамика процессов кипения и конденсации" в 1988 году, на IX Всесоюзной конференции "Взаимодействие атомных частиц с твердым телом" в 1989 году, на 4-ой Международной конференции "Расчетные методы и экспериментальные измерения" в 1989 году.

Автор защищает:

1. Результаты экспериментальных исследований по определению режимов истечения газов из различного рода источников в вакуум.
2. Результаты экспериментальных исследований процесса конденсации свободно-молекулярных и сплошных газовых потоков. Зависимость указанных процессов от рассматриваемых в работе параметров.

3. Алгоритм определения параметров газового потока у криопанели и разработанную на его основе методику комплексного расчета процессов, реализующихся в криоконденсационных вакуумных системах.

4. Результаты экспериментального определения коэффициентов теплопроводности твердого азота для слоев (толщина слоя криосадка $(0,5 + 1,5) \cdot 10^{-2}$ м).

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, шести глав, выводов и приложений. Работа имеет общий объем 183 стр., в том числе 127 стр. машинописного текста, 81 рисунок.

Список литературы включает 108 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В первой главе дано изложение общего состояния проблемы изучения процессов конденсации газов, реализующихся в криоконденсационных насосах. Представлены основные конструктивные схемы данного типа насосов. Рассматриваются методы определения основных эксплуатационных характеристик. Анализируются имеющиеся экспериментальные и расчетные результаты по конденсации свободно-молекулярных и сплошных (больших интенсивностей и скоростей) газовых потоков на охлаждаемых поверхностях.

Проведенный анализ показывает, что разработано несколько экспериментальных методик измерения коэффициентов конденсации газов для области свободно-молекулярного течения. В ряде работ отмечается существенное влияние на интенсивность процесса конденсации значения температуры криопанели.

Для области вязкостного режима течения показано, что быстрая откачки в этом случае может быть примерно (в зависимости от рода откачиваемого газа) в два раза больше, чем при откачке в молекулярном режиме. В некоторых работах авторы на основе анализа экспериментальных и расчетных результатов приходят к выводу о том, что в определенных условиях при конденсации сверхзвуковых потоков у поверхности возникает скачок уплотнений. Нарушение полной конденсации откачиваемого газа в данном случае приводит к быстрому росту давления в вакуумной полости крионасоса.

Вместе с тем анализ показал – процессы, реализующиеся при конденсации откачиваемых газов на панелях криоконденсационных насосов изучены мало. Ряд важных вопросов, таких как: конденсация газовых потоков больших интенсивностей (удельный массовый поток выше 10^{-3} кг/м²·с) и скоростей (число Маха больше 1); откачка газов с низкой температурой конденсации практически не изучался.

Для создания простой, но в то же время надежной инженерной методики расчета криоконденсационных насосов, работающих в области низкого, среднего и высокого вакуума необходимо:

1. Выявить параметры, позволяющие разделить режимы сплошного и свободно-молекулярного истечения газа в вакуумную полость крионасоса.

2. Экспериментально определить параметры, влияющие на интенсивность процесса конденсации при откачке в области свободно-молекулярного течения.

3. Исследовать процессы конденсации газовых потоков и струй в вязкостном режиме течения. Определить величины, влияющие на интенсивность конденсации направленных газовых потоков. Установить взаимосвязь параметров газового потока с температурой поверхности конденсации, при которой нарушается процесс полной конденсации.

4. Для определения температуры поверхности конденсации экспериментально получить значение коэффициента теплопроводности твердых конденсатов.

5. На основе анализа полученных результатов предложить алгоритм расчета криоконденсационных вакуумных средств, позволяющих определять основные характеристики насосов.

Во второй главе приводится описание экспериментальной установки. Для проведения комплексных исследований процессов, реализующихся в криовакуумных системах применялись три смежных модуля: для изучения режимов истечения газов в вакуум (рис. 1), для исследования процессов конденсации (рис. 2) и определения теплофизических свойств конденсатов (рис. 3).

В первом случае исследуемый газ подается на криопанель 6 через источник 4 и конденсируется на ней. Криопанель охлаждается жидким гелием, которым заполнен сосуд 5. Вся система присоединена к фланцу 2 и помещена в стеклянный криостат 3 таким образом, чтобы имелась возможность наблюдать за процессом роста криослоя через щелевое окно. В процессе напуска газа фиксируются следующие параметры: давление P_0 в форкамере; давление в вакуумной камере P_{∞} ; температура криопанели; распределение и структура криосадка на охлаждаемой поверхности, на основании чего делается вывод о реализующемся режиме истечения газа.

При исследовании процессов конденсации газов использовался модуль представленный на рис. 2. Вакуумная камера 4 погружена полностью в жидкий гелий. Напуск исследуемого газа производится по патрубку 2 через газовый источник 3. Конденсация газа реализуется на криопанели, температура которой может изменяться при помощи нагревателя 6. Для измерения подаваемого на криопанель и отраженного от нее потока использовались кварцевые резонаторы (микровесы) А, Б и В, принцип действия которых основан на изменении частоты колебания чувствительного элемента при попадании

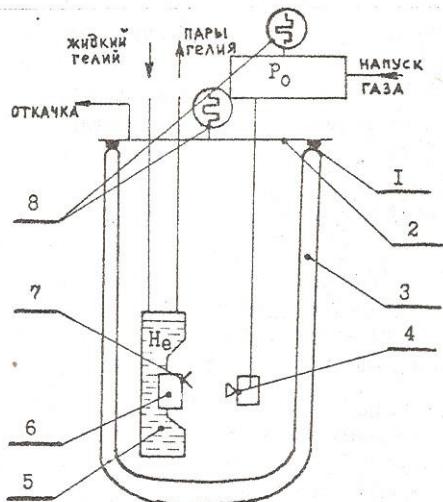


Рис. 1. Экспериментальный модуль для исследования режимов истечения газов в вакуум

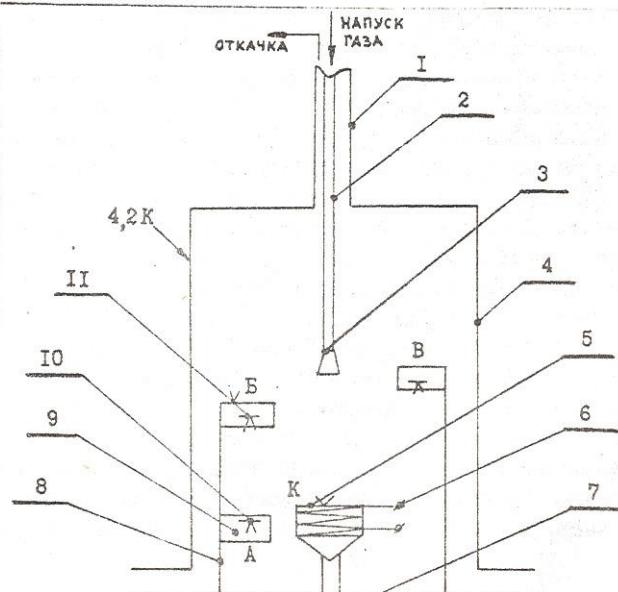


Рис. 2. Экспериментальный модуль для изучения процессов конденсации

на него (конденсации) потока газа. Чувствительный элемент микровесов А входным отверстием обращен к газовому источнику, а весов Б и В к криопанели. Подставки микровесов 8 и криопанель закреплены на фланце 7. Температура кварцевых резонаторов измеряется термопарами золото-железо-медь 10 и в процессе напуска не поднимается выше 10 К. Температура криопанели измеряется термопарой золото-железо-медь и германиевым термометром сопротивления. На всем протяжении напуска фиксируются следующие параметры: давление в форкамере, температура криопанели и частота колебаний кварцевых резонаторов микровесов. Зная изменение частоты колебания резонатора $A f$, можно определить величину газового потока, проходящего через данное сечение.

В случае исследования конденсации свободно-молекулярных газовых потоков определяется зависимость коэффициента конденсации от температуры криопанели T_k . Коэффициент конденсации определяется по соотношению:

$$\alpha_k = 1 - \frac{I_o + I_i}{I_{ii}} = 1 - \frac{\Delta f_B}{\Delta f_A}, \quad (I)$$

где I_{ii} - падающий на поверхность конденсации поток газа; I_o - отраженный от криопанели поток; I_i - поток испарившихся молекул; $\Delta f_B, \Delta f_A$ - изменение частоты колебаний микровесов Б и А (см. рис. 2).

При проведении исследований процессов конденсации сплошных направленных газовых потоков (больших интенсивностей и скоростей) определялась температура криопанели, при которой нарушается полная конденсация исследуемого газа.

Модуль, представленный на рис. 2, использовался также при измерении испаряющегося с поверхности твердого конденсата потока газа. Для этого на поверхность криопанели предварительно наносился слой криосадка. Затем при помощи нагревателя изменялась температура криопанели T_k . При этом фиксировалась величина T_k и испаряющийся поток (использовались микровесы Б и В).

На рис. 3 представлен экспериментальный модуль для определения коэффициентов теплопроводности слоев конденсатов. Вакуумная камера 4 полностью погружена в жидкий азот. Исследуемый газ подается через распределительную сетку 3. Конденсация газа происходит на охлаждаемой жидким гелием криопанели 5, температура ко-

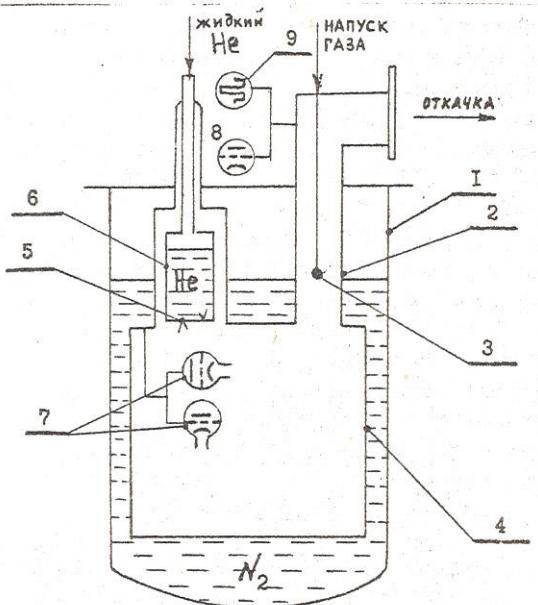


Рис. 3. Экспериментальный модуль для определения теплопроводности твердых конденсатов

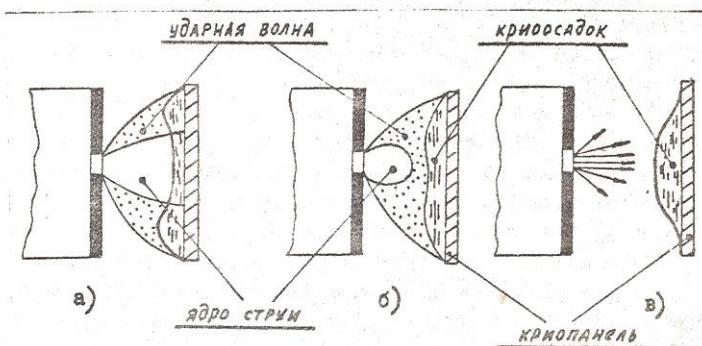


Рис. 4. Анализируемые схемы распределения криосадка на криопанели

торой измеряется термопарой золото-железо-медь. Давление в системе измеряется двумя ионизационными датчиками 7 с разным расположением входного отверстия. Методика проведения исследований заключалась в следующем. После нанесения на криопанель слоя известной толщины напуск газа прекращается и фиксируются следующие параметры: температура криопанели и показания вакууметрических преобразователей 7. Процесс понижения плотности газа в вакуумной камере (при отсутствии потока газа) обусловлен условиями охлаждения, сформированного при напуске слоя криосадка. Темп охлаждения криослоя определялся по полученной экспериментальной зависимости плотности газа в вакуумной камере от времени. Искомая величина - коэффициент теплопроводности твердого криосадка определялся в результате решения задачи нестационарной теплопроводности для плоского слоя.

В третьей главе приводятся результаты исследования режимов истечения газов в вакуум.

На рис. 4 представлены характерные схемы распределения криосадка на криопанели. На основании анализа распределения криосадка делался вывод о реализующемся режиме истечения. Схема представленная на рис. 4 а соответствует такому режиму истечения, при котором струя газа характеризуется утолщенными ударными волнами и ядром струи по оси течения. Таким образом, если поместить криопанель на оси струи, то очевидно, что при полной конденсации газа структура криосадка будет такой же как на рис. 4а. Снижение общего расхода газа приводит к уменьшению ядра струи (рис. 4б), а затем к его исчезновению. При этом реализуется диффузионное свободно-молекулярное истечение газа (рис. 4в).

Выбор критерия, позволяющего определять режим истечения газа в вакуум (применительно к условиям эксплуатации криоконденсационных насосов), проводился из числа ранее известных. В результате получено - для исследованных режимов ($P_0/P_\infty = 10^1 \div 10^4$) наиболее применен критерий, предложенный Ребровым А.К., $Re_L = Re_* \sqrt{P_0/P_\infty}$, где Re_* - число Рейнольдса рассчитанное по параметрам в критическом сечении газового источника.

Анализ полученных результатов также позволил определить критерий перехода сплошного течения в свободно-молекулярное при расширении газового потока в вакууме. В результате получено, что этот переход реализуется при значении числа Кнудсена $Kn_p \geq 0,03$, рассчитанному по характерному размеру струи.

В четвертой главе представлены результаты экспериментальных исследований процессов конденсации. При анализе результатов необходимо разделить всю исследуемую область на два режима: конденсация при свободно-молекулярном течении газа на всем протяжении от источника до криопанели и такое развитие процесса, когда на этом участке реализуется область сплошного течения.

При проведении исследований процессов конденсации направленных свободно-молекулярных газовых потоков величина падающего на криопанель потока изменялась в диапазоне $j = (10^{-6} \div 5 \cdot 10^{-3}) \text{ кг}/\text{м}^2 \cdot \text{с}$. В качестве газовых источников использовались:

1. Рассеиватель диаметром 8 мм, позволяющий получить равномерно распределенный по всем направлениям поток газа.

2. Диафрагма диаметром 4 мм.

3. Сопло Лаваля с диаметром критического сечения $d_* = 0,98 \text{ мм}$ и углом полураствора $\theta_a = 12^\circ$. Исследования проводились для азота, аргона и диоксида углерода.

На рис. 5 представлена зависимость температуры поверхности конденсации T_k^0 (при которой значение α_k перестает быть равным единице) от величины j .

Из анализа полученных результатов следует, что:

1. При значениях $j \leq 1 \cdot 10^{-3} \text{ кг}/\text{м}^2 \cdot \text{с}$ зависимости $j = f(T_k^0)$ совпадают для различных условий формирования потока. Таким образом, эффективность конденсации свободно-молекулярных потоков зависит только от величины удельного массового потока газа на криопанель и температуры поверхности конденсации.

2. При значениях $j \geq 10^{-3} \text{ кг}/\text{м}^2 \cdot \text{с}$ наблюдается тенденция расходления зависимостей $j = f(T_k^0)$ для различных газовых источников. Это, по-видимому, объясняется тем, что при увеличении расхода газа на выходе из источника образуется зона сплошного течения, что приводит к изменению параметров газового потока поступающего на криопанель.

Также в результате исследований получены зависимости коэффициента конденсации α_k от температуры криопанели T_k для фиксированных значений j и зависимости испаряющегося с межфазной поверхности потока газа от температуры криослоя, которые позволяют объяснить полученные ранее и в данной работе результаты.

При изучении процессов конденсации сплошных потоков (больших интенсивностей $j \geq 10^{-3} \text{ кг}/\text{м}^2 \cdot \text{с}$ и скоростей было получе-

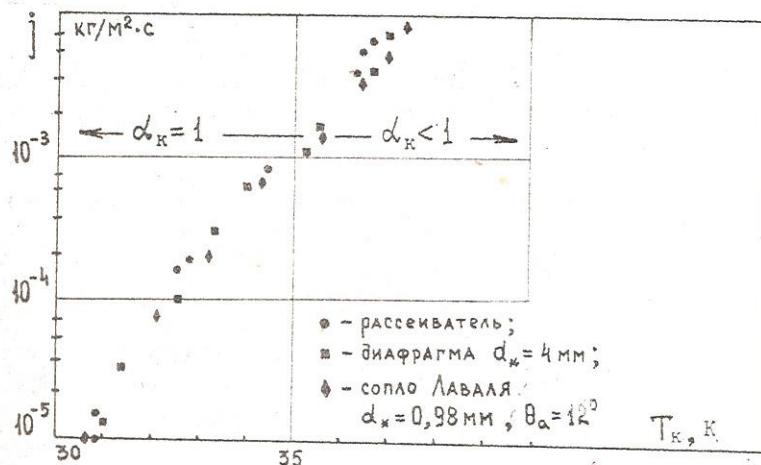


Рис. 5. Зависимость максимально возможной температуры крио-панели, при которой $d_k = 1$, от величины j для аргона.

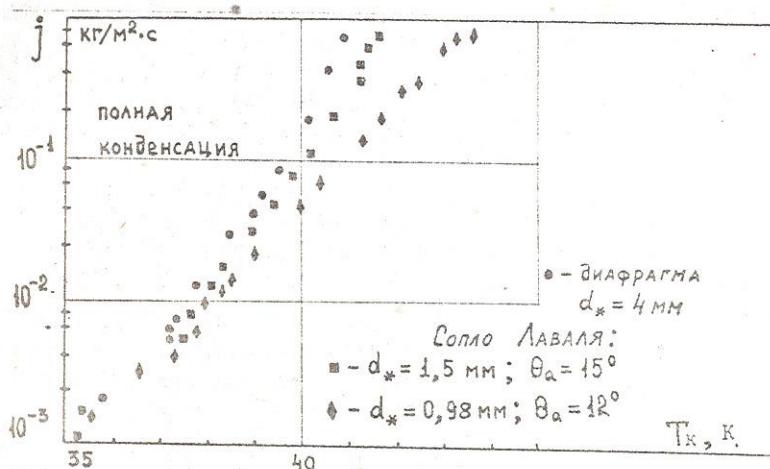


Рис. 6. Зависимость удельного массового потока аргона на крио-панель j от температуры нарушения полной конденсации T_k^0 .

но, что интенсивность конденсации в данном случае не может быть определена с помощью только величины Δ_k , так как при нарушении полной конденсации газа направленный от криопанели поток сравним с падающим на нее. Поэтому в данном случае следует рассматривать два возможных режима: полная конденсация исследуемого газа (при $T_k < T_0^0$) и наличие потока газа, направленного от криопанели (при $T_k > T_0^0$).

На рис. 6 (исследуемый газ - аргон) представлена зависимость $j = f(T_k^0)$ для различного рода газовых источников:

1. Диафрагма диаметром 4 мм.

2. Сопло Лаваля ($d_* = 0,98$ мм; $\theta_a = 12^\circ$).

3. Сопло Лаваля ($d_* = 1,5$ мм; $\theta_a = 15^\circ$).

На рис. 7 (исследуемый газ - азот) представлены зависимости $j = f(T_0^0)$ для разных расстояний от газового источника до криопанели l при различных температурах газа в форкамере T_0 .

Из анализа полученных результатов следует, что температура поверхности конденсации, при которой нарушается полная конденсация (для области сплошного течения газа) зависит от целого ряда параметров: удельного массового потока газа на криопанель, геометрии и рода газового источника, расстояния от источника до криопанели и температуры газа в форкамере (температуры торможения). Полученные зависимости не являются универсальными и будут видоизменяться при изменении геометрии криоткачивающей ячейки. Для определения общей методики расчета криоконденсационных систем для области низкого и среднего вакуума необходима расчетная модель реализующихся процессов, позволяющая определять параметры газового потока в любой точке криоткачивающей ячейки.

Сравнение полученных результатов и известных данных других авторов показало хорошее совпадение полученных тенденций и численных значений. Максимальное расхождение по рассматриваемым параметрам не превышает 30%.

В пятой главе представлены результаты измерения коэффициента теплопроводности твердого азота. Актуальность данных исследований объясняется тем, что в настоящее время существуют результаты измерения теплофизических свойств в основном для молекулярных кристаллов. Для реализующихся в низковакуумных криоконденсационных насосах толстых слоев (толщина примерно $(5 + 10)$ мм) теплофизические свойства будут изменяться вследствие изменения структуры конденсата.

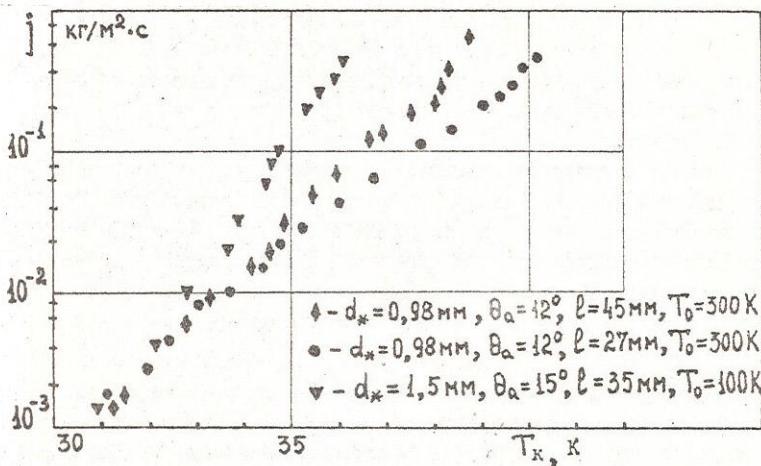


Рис. 7. Зависимость удельного массового потока азота на криопанель j от температуры нарушения полной конденсации T_k^0



Рис. 8. Сравнение результатов по коэффициенту теплопроводности твердого азота. \circ - данные Колоскова Л.Н.

Измерения проводились описанным выше бесконтактным методом для диапазона толщин ($1 \div 10$) мм и при температурах криослоя ($30 \div 40$) К. В результате получена зависимость коэффициента теплопроводности от температуры для твердого азота (см. рис. 8). Было также получено, что удельная теплоемкость твердого азота для исследуемого диапазона температур равна $c \approx (1000 \div 1300)$ Дж/кг·К.

Анализ полученных результатов показал, что теплопроводность твердых конденсаторов зависит от толщины слоя криосадка. Такую зависимость, как и другие различия в поведении теплофизических свойств криоконденсаторов по сравнению с молекулярными кристаллами, можно объяснить спецификой формирования слоев криосадков и особенностями осуществляющихся при этом процессов тепло- массо- переноса.

В шестой главе представлена методика расчета параметров газового потока при расширении его в вакууме, которые для области сплошного течения могут быть рассчитаны с помощью известных уравнений сохранения. Система уравнений является замкнутой, если известны параметры газа в форкамере (давление и температура) и геометрия газового источника (для газодинамического источника — диаметр критического сечения d_* и угол полураствора θ_a). Расчет параметров газового потока с использованием данной системы уравнений проводится до сечения перехода сплошного течения в свободно-молекулярное. Для определения данного сечения использовался критерий (см. главу 3) $Kn_{\text{п}} \approx 0,03$. Следует отметить, что после перехода температура и скорость потока переставали изменяться вплоть до криопанели.

Результатом расчетов являются параметры газового потока у криопанели (скорость, температура и плотность) для различных значений давления и температуры газа в откачиваемом объеме и газовых источников (в том числе для экспериментально исследованных режимов). Зная параметры газового потока у криопанели и используя зависимости полученные Крюковым А.П. при решении кинетического уравнения Больцмана, можно определить значения температуры междазной поверхности, при которой нарушается процесс полной конденсации газа для рассматриваемого случая.

Сравнение экспериментальных и расчетных результатов показало, что их расхождение не превышает 10% для всего диапазона рассматриваемых параметров. Таким образом, использовал предложен-

ную методику расчетов, можно определить температуру поверхности конденсации, при которой нарушится полная конденсация газа.

Во второй части шестой главы представлены рекомендации для расчета и проектирования криоконденсационных вакуумных систем для области среднего и низкого вакуума. Определены пути и способы совершенствования данных систем и повышения эффективности их использования. Также представлена блок-схема программы, которая позволяет рассчитывать основные эксплуатационные характеристики крионасосов.

ВЫВОДЫ

Создание трех экспериментальных установок позволило осуществить комплексное исследование процессов, реализующихся в криоконденсационных вакуумных системах. Проведенные исследования позволяют сделать следующие выводы:

1. Критерий равный отношению числа Рейнольдса, рассчитанного по параметрам в критическом сечении газового источника, к квадратному корню из нерасчетности наиболее применят при определении режима истечения газа в вакуум. Переход от сплошного к свободно-молекулярному режиму течения газа при его расширении в вакуум происходит при числе Кнудсона равном примерно 0,03. Определенные критерии целесообразно использовать при разработке криоконденсационных средств вакуумной откачки газов рассмотренного типа.

2. Впервые получены количественные результаты по конденсации различных газов – составляющих воздуха. Определены зависимости эффективного коэффициента конденсации от температуры криопанели. Обнаружено, что интенсивность конденсации при направленном свободно-молекулярном потоке газа на криопанель зависит от температуры криопанели и величины удельного массового потока.

3. Исследования процесса конденсации газовых потоков для различных условий истечения в вакуум (различных газовых источников) показали, что при реализации сплошного режима течения газа к криопанели интенсивность конденсации существенно зависит от рода газового источника, его размеров и расположения относительно криопанели. Впервые полученные количественные результаты для газов – составляющих воздуха могут быть использованы при проектировании насосов среднего и низкого вакуума.

4. Бесконтактным методом, позволяющим устраниТЬ ряд погрешностей, проведено измерение теплофизических свойств твердого азота для толстых слоев (толщина более 1 мм). Обнаружено, что коэффициент теплопроводности в данном случае ниже, чем для слоев молекулярных кристаллов. На основе анализа структуры криосадка предложено объяснение данному расхождению.

5. Предложена методика комплексного расчета параметров газового потока в любой точке вакуумной камеры крионасоса. Проведено сравнение результатов расчета и экспериментальных данных, которое показало, что предложенная методика может применяться при конструировании и проектировании криоконденсационных средств откачки.

6. Предложена методика комплексного расчета процессов, реализующихся в криоконденсационных вакуумных системах, позволяющая при известных параметрах газа в откачиваемом объеме и условиях охлаждения криопанели определить остаточное давление в вакуумирующем объеме и время откачки. Предложенная методика позволяет определить пути совершенствования криоконденсационных вакуумных систем и повышения эффективности их использования. Представлены рекомендации по проектированию данных систем.

Основное содержание диссертации отражено в следующих работах:

1. Чепель С.Л., Млынский А.В., Крюков А.П. Экспериментальное исследование процессов конденсации газов в вакууме с использованием кварцевой микробалансной техники// Тр. IX Всесоюз. конф. по динамике разреженных газов.-Свердловск, 1988.-Т. 2.-С. 154 - I59.
2. Крюков А.П., Млынский А.В. Исследование процесса конденсации азота в молекулярно-вязкостном режиме// Журнал прикладной механики и технической физики.-1988.-№ 4.-С. II0-II5.
3. Крюков А.П., Млынский А.В. Конденсация газовых потоков, движущихся с большими скоростями, на холодных поверхностях// II Всесоюз. конф. "Теплофизика и гидрогазодинамика процессов кипения и конденсации": Тез. докл.-Рига, 1988.-С. 68.
4. Крюков А.П., Млынский А.В., Воронин А.В. Расчет криовакуумных систем на основе описания разреженных потоков// Тр. 4 Международ. конф. "Расчетные методы и экспериментальные измерения"- Капри. Италия, 1989.-С. I05-II6.

5. Млынский А.В., Крюков А.П. Конденсация сверхзвуковых струй на поверхностях, охлаждаемых криоагентами//Х Всесоюз. конф. по динамике разреженных газов:Тез. докл.-М., 1989.-С. 138.
6. Млынский А.В. Некоторые особенности процесса истечения газа в вакуум при криоконденсации//Х Всесоюз. конф. по динамике разреженных газов:Тез. докл.-М., 1989.-С. 237.
7. Крюков А.П., Млынский А.В. Интенсивность конденсации и испарения десублиматоров азота при низких температурах//IX Всесоюз. конф. "Взаимодействие атомных частиц с твердым телом": Тез. докл.-М., 1989.-С. 107-108.
8. Млынский А.В., Крюков А.П. Определение теплопроводности слоев твердого азота//Тр. ин-та/Моск. энерг. ин-т.-1989.- № 221.-С. 27-30.



Подписано к печати 19.01.90 л. 35045 .
Уч.-изд. л. 095 . Печ. л. 125 .
Заказ 172 . Изд. № А 706 . Тираж 100 . Бесплатно.