

М 334258

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ

СССР

МОСКОВСКОЕ ОРДЕНА ЛЕНИНА И ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ
ВЫСШЕЕ ТЕХНИЧЕСКОЕ УЧИЛИЩЕ им. Н.Э. БАУМАНА

На правах рукописи

ЛУНЕВА ЛЮБОВЬ АЛЕКСАНДРОВНА

ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАЩИТНЫХ СВОЙСТВ КРИОГЕННЫХ ЭКРАНОВ
И ЛОВУШЕК НА ОСНОВЕ ДИФфуЗИОННОЙ МОДЕЛИ ТЕЧЕНИЯ
РАЗРЕЖЕННОГО ГАЗА

Специальность 05.04.06. - Вакуумная
и компрессорная техника

А в т о р е ф е р а т
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

М о с к в а - 1978

Работа выполнена на кафедре физики Московского ордена
Ленина и ордена Трудового Красного Знамени высшего технического
училища им. Н.Э. Баумана

Научные руководители

- профессор, доктор физико-математических наук Павлов К.Б.,
- старший научный сотрудник, кандидат физико-математических наук Макаров А.М.

Официальные оппоненты

- профессор, доктор технических наук Фролов Е.С.,
- кандидат технических наук Хомутов В.А.

Ведущее предприятие

- указано в решении специализированного совета

Защита диссертации состоится "16" октября 1978 г.
в 14 час. 30 мин. на заседании специализированного совета К 33/7
"Криогенная, вакуумная, гидравлические, вакуумные и компрессорные

по адресу:
корпус факультета

библиотеке МВТУ имени

1978 г.

ные печатью, просьба

М 334258

В.Н. КОЗЛОВ

Цель реферируемой диссертации состоит в разработке научно обоснованного подхода к моделированию процессов переноса в элементах криогенно-вакуумных систем имитаторов космоса, применяемых для получения "стерильного" вакуума.

В диссертационной работе решаются следующие задачи:

1. Разработка теоретической модели диффузионного течения разреженного газа в вакуумных полостях с проницаемыми, поглощающими и выделяющими газ стенками.

2. Исследование эффективности защиты выносного высоковакуумного оборудования от попадания нежелательной компоненты газа и защиты откачиваемого объема от миграции паров рабочего вещества насоса в зависимости от геометрии и поглощающих свойств сорбирующей структуры.

3. Решение комплекса теоретических вопросов, связанных с удалением большого количества легкоконденсируемых газов из рабочего объема камеры.

4. Проведение экспериментальных исследований на модельной и промышленной установках с целью выявления области применения разработанной теоретической модели течения разреженного газа.

НАУЧНАЯ НОВИЗНА

Новизна полученных в диссертации научных результатов:

- предложена модификация известной в вакуумной технике диффузионной модели течения разреженного газа Кнудсена в случае течения в полости с поглощающей, проницаемой или выделяющей газ боковой поверхностью;

- впервые рассмотрен ряд конструктивно-расчетных схем элементов криогенно-вакуумной техники, имеющих практическое применение при проектировании имитаторов космического пространства;

- сформулирована новая математическая постановка задачи Стефана, отличающаяся тем, что в условии на неподвижной границе входит явно положение границы фазового перехода (полуобратная задача), и предложен метод её решения;

- разработана оригинальная методика проведения и обработки экспериментальных исследований по поглощению легкоконденсируемого газа криогенными панелями.

НТБ МГТУ им. П.О. Гуманова



1334258

Пунева П.А. Исследование о

АВТОР ЗАНИМАЕТ:

1. Теоретическую модель диффузионного течения разреженного газа в вакуумных полостях с проникаемыми, поглощающими и выделяющими газ стенками.

2. Методику проведения и обработки экспериментов по поглощению локализованного выброса легкоконденсируемого газа в пространство между стенкой камеры и криогенными экранами.

3. Практическую ценность результатов математического моделирования процессов переноса в элементах криогенно-вакуумных систем защиты:

а) высоковакуумного оборудования от нежелательной компоненты откачиваемого газа;

б) откачиваемого объема от паров рабочих веществ высоковакуумных насосов;

в) вакуумируемого объема от локальных выбросов легкоконденсируемого газа в пространство между стенкой камеры и криогенными экранами.

4. Метод решения полуобратных однофазных одномерных задач стефановского типа без начальных условий с линейным или нелинейным оператором теплопроводности.

ВНЕДРЕНИЕ

По результатам диссертации разработан руководящий расчетный материал "Расчеты поглощения выбросов легкоконденсируемых газов криогенными экранами" и внедрен в практику.

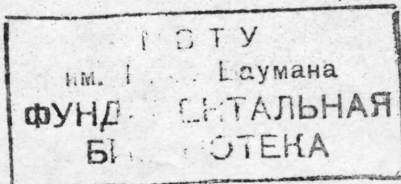
АПРОБАЦИЯ РАБОТЫ

Материалы диссертационной работы доложены на:

1. I Всесоюзной научно-технической конференции по криогенной технике, г.Москва, 1973 г.

2. IV Всесоюзной научно-технической конференции "Физика и техника высокого вакуума", г.Ленинград, 1974 г.

3. Всесоюзной научно-технической конференции "Основные направления и проблемы создания вакуумного откачного оборудования", г.Казань, 1976 г.



Публикация работы. Материалы диссертации опубликованы в 8 печатных работах.

Структура и объем диссертации. Диссертация содержит 152 страницы машинописного текста, 43 иллюстрации, 13 таблиц и состоит из введения, пяти глав, заключения (основных выводов), библиографии, включающей 189 литературных источников (в том числе 79 иностранных).

В связи с расширением области использования вакуумных установок для физических экспериментов, для проведения ряда технологических процессов в электронной, радиотехнической, металлургической и других отраслях промышленности, для наземной отработки систем космических летательных аппаратов в имитаторах космоса особую важность приобретают научные исследования, лежащие в основе инженерных методов расчета современных высоковакуумных установок.

Во многих случаях в качестве эффективных методов исследования течения разреженного газа в вакуумной полости могут быть использованы метод статистического моделирования (Монте-Карло) и метод лучистой аналогии. Кроме того, характеристики отдельных элементов вакуумных систем могут быть получены на основе решений кинетического уравнения Больцмана, являющегося основой кинетической теории газов. Из-за сложности математического аппарата и трудоемкости реализации на ЭВМ методов Монте-Карло и лучистой аналогии и принципиальных трудностей кинетической теории газов, связанных, в частности, с постановкой граничных условий (наличие нерешенных проблем взаимодействия газ - твердая стенка), получение результатов, представляющих интерес для технических приложений, оказывается затруднительным даже для относительно простых расчетных схем вакуумных полостей.

Развитие современной криогенно-вакуумной техники ставит практическую задачу: разработать методы моделирования течения разреженного газа, основанные на простых моделях, позволяющих получить приближенные, но по существу правильные результаты.

ГЛАВА I. Математическая модель диффузионного течения разреженного газа в вакуумных полостях с проницаемыми, поглощающими и выделяющими газ стенками

В развитие теоретических представлений Кнудсена о течении разреженного газа как специфической сплошной среды в работе

предложена модифицированная модель течения газа в молекулярном режиме по каналу с перфорированными стенками с учетом поглощения или выделения газа с последних.

Предлагаемая модель отражает основные закономерности течения. В качестве инженерной расчетной модели у нее очевидны следующие преимущества: она использует несложный математический аппарат, во многих случаях не требует применения сложной вычислительной техники, описывает большинство встречающихся на практике элементов криогенно-вакуумных систем и дает с точки зрения точности инженерных расчетов приемлемые результаты (относительная погрешность - 5-10% по сравнению с более точными моделями).

Основные допущения диффузионной модели течения разреженного газа в вакуумной полости с проницаемыми, поглощающими и выделяющими газ стенками:

1. Разреженный газ в каждом достаточно малом элементе объема вакуумной полости находится в термодинамическом равновесии (локальное квазиравновесное состояние).

2. Течение разреженного газа описывается в рамках модели сплошной среды.

3. Характерный поперечный размер вакуумной полости относительно направления осредненного потока газа значительно меньше продольного размера.

4. Взаимодействие молекул газа с сорбирующей поверхностью обусловлено физическими свойствами откачиваемого газа и поглощающей поверхности, а также тепловым режимом последней. Указанные факторы определяют величину коэффициента залипания λ , который вводится как локальное отношение плотности потока частиц, поглощаемых на сорбирующей поверхности, к максвелловской, термодинамически равновесной плотности потока частиц, рассчитанной по некоторому определенному равновесному состоянию газа.

5. В качестве указанного выше равновесного состояния газа принимается локальное квазиравновесное состояние, которому можно приписать некоторое значение давления P и температуру T , равную температуре газа в откачиваемом объеме, или температуре источника газа, или температуре газа, рассчитанной с учетом многократного последовательного отражения молекул от стенок с различной температурой.

6. Температура газа при течении его вдоль вакуумной полости остается неизменной.

7. Имеет место диффузный закон отражения молекул от твердой поверхности.

Диффузионная модель течения разреженного газа в вакуумной полости, основанная на перечисленных допущениях, математически представляет собой систему уравнений сохранения массы и количества движения и уравнение состояния:

$$\frac{d}{dx}(mnVA) = -\frac{\epsilon}{4}mn\Pi + m q_n \Pi, \quad (1)$$

$$-A \frac{dP}{dx} = (1-\epsilon)mnV \frac{c}{4} \Pi + m q_n V \Pi, \quad (2)$$

$$P = nkT, \quad c = \sqrt{\frac{8kT}{\pi m}}. \quad (3)$$

Физический смысл членов в уравнениях (1) и (2) состоит в следующем: изменение потока массы газа на единичной длине определяется потоком массы газа, поглощенной криогенной поверхностью и поступившей вследствие газовыделения; результирующая сила давления, приложенная к граничным поверхностям выделенного объема, разгоняет до осредненной скорости направленного движения частицы, отраженные от боковой поверхности полости и поступившие в нее вследствие газовыделения. В уравнении (2) опущены члены, квадратичные по V , учет которых привел бы к необходимости исследовать сложные нелинейные уравнения. В практически интересных случаях выполняется условие $V \ll c$, что может служить обоснованием достаточной строгости уравнения (2).

Если ввести принятое в вакуумной технике определение величины потока газа $Q = PVA$, то система уравнений (1)–(3) принимает вид:

$$\frac{dQ}{dx} = -\frac{\epsilon}{4}P\Pi + q\Pi, \quad (4)$$

$$-A \frac{dP}{dx} = (1-\epsilon) \frac{\epsilon}{4} \frac{m}{kT} P V \Pi + \frac{m}{kT} q V \Pi. \quad (5)$$

Здесь и ниже $\frac{\epsilon}{4} = 3.64 \sqrt{\frac{T}{\mu}}$ (л/с.см²), где μ – молекулярный вес газа, Q – поток газа (л.тор/с), q – средняя по периметру плотность потока газовыделения (л.тор/с.см²). Исключая из (4) и (5) величину Π , нетрудно получить дифференциальное уравнение, описывающее распределение давления (концентрации частиц) вдоль вакуумной полости:

$$\frac{d^2 P}{dx^2} - \omega_p^2 P = -\kappa_p, \quad (6)$$

где $\omega_p^2 = \frac{\epsilon(1-\epsilon)}{2T} \left(\frac{P}{A}\right)^2$, $\kappa_p = \frac{q\Pi}{P}$, $D = \frac{2T}{1-\epsilon} \cdot \frac{c}{4} \cdot \frac{A^2}{P}$, (D – обобщенный коэффициент диффузии (л.см/с)).

Рассмотрены также нестационарные течения разреженного газа.

При описании переменного во времени процесса основные уравнения диффузионной модели течения должны быть дополнены соответствующими нестационарными членами. Как правило, в рамках диффузионной модели для описания нестационарного процесса переноса в разреженном газе используется уравнение параболического типа:

$$\frac{\partial P}{\partial t} = \frac{2\pi}{1-\lambda} \frac{c}{4} \frac{A}{P} \Delta P - \frac{1}{4} \frac{c}{A} \frac{\partial P}{\partial x} + q \frac{P}{A}, \quad (7)$$

$\Delta = \frac{\partial^2}{\partial x^2}$ - одномерное течение, $\Delta = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} r \frac{\partial}{\partial r}$ - радиальное течение,
 $\Delta = (\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2})$ - двумерное течение.

Обсуждены граничные условия для уравнений диффузионной модели течения разреженного газа для различных типовых конструкций элементов вакуумных систем. Показано, что многие расчетные проблемы криогенно-вакуумной техники в рамках диффузионной модели сводятся к решению соответствующих краевых задач для систем линейных обыкновенных дифференциальных уравнений или уравнений в частных производных, аналитическое решение которых может быть получено достаточно просто известными математическими методами.

ГЛАВА II. Эффективность защиты выносного высоковакуумного оборудования от попадания нежелательной компоненты газа и откачиваемого объема от паров рабочего вещества насоса

Теплозащитные криогенные экраны и ловушки на температурном уровне кипящего азота являются составной частью высоковакуумных систем крупных термобарокамер в технике имитации космоса.

При конструировании вакуумной системы для определения основных эксплуатационных характеристик оборудования представляют интерес следующие вопросы:

- как конструктивные особенности криогенного экрана влияют на производительность высоковакуумного оборудования, которое за ним расположено;
- какое количество легкоконденсируемого газа (например, паров воды) может попасть в стоящий за экраном (ловушкой) высоковакуумный насос;
- какое количество паров рабочих веществ высоковакуумного насоса может попасть через ловушку (экран) в откачиваемую полость.

До недавнего времени ответы на подобные вопросы могли быть получены только в результате прямого эксперимента, причем отсут-

ствие достаточно простых и удовлетворительно описывающих физику процесса расчетных моделей часто не позволяло переносить результаты испытаний модельных установок на реальные конструкции.

Указанные расчетные модели построены на основе модифицированной Кнудсеновской теории течения разреженного газа в вакуумной полости с поверхностным выделением или поглощением молекул, рассмотренной в первой главе диссертации.

В качестве количественных характеристик защитных свойств ловушки (экрана) введены следующие отношения:

$$\begin{aligned}\zeta &= \frac{\text{поток газа, поступающий в насос через ловушку}}{\text{поток газа, поступающий в насос без ловушки}}; \\ \zeta_* &= \frac{\text{поток газа, поступающий в насос через ловушку}}{\text{поток газа, поступающий в насос через теплую ловушку}}; \\ \zeta_{**} &= \frac{\text{поток газа, оседающий в ловушке}}{\text{поток газа, поступающий в ловушку}}.\end{aligned}$$

Величина коэффициента ζ характеризует суммарную эффективность защиты, ζ_* — выявляет эффективность охлаждения ловушки, а величина ζ_{**} может представлять интерес при расчетах ловушки на забиваемость.

Рассмотрен процесс течения разреженного газа через криогенные экраны и вымораживающие ловушки и получены аналитические зависимости для коэффициентов "захвата" и "проницаемости" сорбирующей структуры:

$$\begin{aligned}d_* &= \frac{f\omega(\omega^2 h\omega + \beta ch\omega)}{[(\omega^2 + \beta^2)h\omega + 2\omega\beta ch\omega]} + d_0(1-f); \\ I &= \frac{f\omega\beta}{[(\omega^2 + \beta^2)h\omega + 2\omega\beta ch\omega]}.\end{aligned}$$

При откачке легкоконденсируемого газа для различных конструктивных схем расположения высоковакуумных автономных насосов за теплозащитными экранами построены аналитические зависимости введенных выше коэффициентов ζ и изучено влияние конструктивных параметров и сорбирующих свойств криогенной структуры на параметры процесса вакуумирования.

В случае защиты входного отверстия высоковакуумного насоса криогенной вымораживающей ловушкой предложена конструктивная схема ловушки, повышающая её пропускную способность без потери защитных свойств. Получены аналитические зависимости для определения количества газа, поступающего в ловушку, количества газа, поступающего в насос, и количества газа, поглощаемого внутренней структурой ловушки как для плоского, так и для осесиммет-

ричного течений разреженного газа. Проведены численные расчеты по указанным зависимостям; изучено влияние различных конструктивных параметров и эффективности охлаждения ловушки на её защитные свойства; выявлены области оптимальных пределов конструктивных параметров и поглощающих свойств сорбирующей структуры ловушки.

Во второй части главы рассмотрены процессы миграции паров рабочих веществ высоковакуумных насосов (пары ртути, титана, высоковакуумного масла, ...) в откачиваемый объем. Проведено исследование диффузии паров рабочих веществ из высоковакуумных насосов в откачиваемый объем через криогенные ловушки или теплозащитные криогенные экраны; получены оценки для количества паров масла, попадающего в камеру, и аналитические зависимости защитных свойств ловушки.

Рассмотрен процесс пленочной диффузии масла из рабочего объема высоковакуумного диффузионного насоса по боковой поверхности входного патрубка. Предложена расчетная модель нестационарного распространения тонкой пленки по твердой поверхности за счет эффектов смачивания, позволяющая рассчитать количество масла, оказавшееся на стенке камеры к моменту времени t .

ГЛАВА III. Удаление большого количества легкоконденсируемых газов из рабочего объема камеры

Удаление большого количества легкоконденсируемых газов из рабочего объема камеры приобретает особую важность при наземных испытаниях космических летательных аппаратов в имитаторах космоса.

На основе разработанной диффузионной модели течения разреженного газа проведено исследование стационарного и нестационарного выброса легкоконденсируемого газа в пространство между криогенной решеткой теплозащитного экрана и стенкой камеры. Поставлена математическая задача о течении разреженного газа в закрайном пространстве с учетом различного конструктивного оформления периферии экрана:

$$k \frac{\partial P}{\partial t} = \operatorname{div} (D \operatorname{grad} P) - \lambda \frac{P}{T} + Q \delta(x, y),$$

$$P(x, y, 0) = 0, \quad k_2 \frac{\partial P}{\partial y} + k_1 P = 0 \text{ на } \Gamma(x, y),$$

где $\Gamma(x, y)$ — контур криогенного экрана в плане, ∇ — направление внешней нормали к контуру $\Gamma(x, y)$, $k_2 = 0$ и $k_1 = 1$ — для экрана с открытым торцем, $k_2 = 1$ и $k_1 = 0$ — для экрана с непро-

нимаемой для молекул пара периферией. Построено решение указанной задачи с использованием функции Грина G :

$$P(x, y, t) = \int_0^t G(x, y, t; x_0, y_0, \tau) Q(\tau) d\tau \quad - \text{ для случая}$$

точечного источника интенсивности $Q(t)$, расположенного в точке $x = x_0, y = y_0$;

$$P(x, y, t) = \int_0^t \int G(x, y, t; \xi, \eta, \tau) q(\xi, \eta, \tau) d\xi d\eta d\tau \quad -$$

для случая источников газа с погонной плотностью $q = q(x, y, t)$, расположенных на контуре $\Gamma = \Gamma(x, y)$.

Определена суммарная газовая нагрузка на вакуумную систему камеры:

$$Q_z(t) = I \int_{\Gamma} P(x, y, t) dF - \int_{\Gamma} D \frac{\partial P}{\partial \nu} d\Gamma$$

Конечной целью исследования является определение зависимости степени ослабления газового потока источника при прохождении его через криогенную решетку от геометрии и поглощающих свойств последней, а также от конфигурации и местоположения источников газа постоянной или переменной во времени производительности. Эффективность защиты вакуумируемого пространства от влияния выбросов легкоконденсируемого газа за криогенные теплозащитные экраны оценивалась по отношению потока газа в камеру $Q_z(t)$ к величине потока из источника:

$$\gamma_t = \frac{Q_z(t)}{Q(t)}$$

либо отношением полного количества легкоконденсируемого газа, попавшего в вакуумную камеру за отрезок времени t_0 , к количеству газа, выброшенному из источника за то же время:

$$\gamma_1 = \int_0^{t_0} Q_z(t) dt \cdot \left(\int_0^{t_0} Q(t) dt \right)^{-1}$$

В рамках разработанной расчетной модели постоянного или переменного во времени процесса поглощения выброса легкоконденсируемого газа за криогенным проницаемым экраном изучены некоторые конструкции, представляющие интерес для практических приложений. Получены количественные оценки эффективности поглощения легкоконденсируемого газа криогенным экраном для различного конструктивного оформления как экрана в целом, так и его внутренней структуры с учетом конфигурации и расположения источников газа постоянной или переменной во времени производительности.

ГЛАВА IV. Некоторые проблемы расчета автономных систем улавливания выбросов

В первой части главы кратко обсуждены вопросы, связанные с определением оптимальной формы криогенной поверхности как в случае малой толщины слоя, так и для слоя конечной толщины.

Вторая часть главы посвящена исследованию процесса намерзания конденсата на криогенную поверхность теплозащитного экрана или конденсационного вакуумного насоса с учетом влияния теплофизических свойств конденсата, а также теплового режима криогенной поверхности на динамику роста слоя конденсата.

С математической точки зрения исследование нестационарного процесса намерзания конденсата на криогенную поверхность сводится к построению решения одномерных однофазных задач теории теплопроводности с искомой границей (Проблема Стефана), представляющих интерес как в теоретическом плане, так и с точки зрения приложений. Формулировка указанной задачи имеет вид:

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} [k(\tau) \frac{\partial T}{\partial x}] \quad \text{в } \mathcal{D} = \{x, t: 0 \leq x \leq y(t), 0 \leq t \leq \infty\}, \quad (8)$$

$$\tau k(\tau) \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=0} + \mu(y) \cdot T \Big|_{x=0} = F[y(t)] \quad , \quad t > 0 \quad (9)$$

$$T[y(t), t] = T_s = \text{const} = 0 \quad , \quad t > 0 \quad (10)$$

$$\rho L \frac{dy}{dt} = k(\tau) \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=y(t)} \quad , \quad t > 0 \quad (11)$$

$$y(0) = 0. \quad (12)$$

Здесь t - время, x - пространственная координата, $T(x, t)$ - распределение температуры, $x = y(t)$ - уравнение свободной границы, которая не задана и должна быть определена вместе с $T(x, t)$ в процессе решения задачи, T_s - температура, L - теплота фазового перехода, τ - функция, принимающая в зависимости от конкретного вида граничных условий значение либо 0, либо 1, $F[y(t)]$ и $\mu(y)$ - некоторые известные функции своих аргументов, ρ , c - плотность и удельная теплоемкость среды.

В формулировке задачи (8) - (12) условие на известной границе $x = 0$ содержит искомую зависимость положения границы раздела фаз от времени, что отличает указанную постановку от так называемой "прямой" и "обратной" задач Стефана. Вместе с тем, рассматриваемая "полуобратная" постановка содержит в себе элементы "прямой" и "обратной" задач.

Развит метод решения однофазных одномерных задач стефановского типа без начальных условий с линейным или нелинейным опе-

ратором теплопроводности. Построены решения полуобратных задач с условиями первого, второго и третьего рода на неподвижной границе для достаточно широкого класса функций $F = F[u(t)]$, что позволяет в известной степени изучить процесс продвижения границы фазового перехода с переменными во времени граничными условиями, избегая трудности непосредственного решения прямой задачи. Кроме того, полуобратные задачи Стефана могут найти применение при необходимости регулирования процесса намораживания конденсата путем изменения условий охлаждения криопанели в зависимости от толщины слоя криосадка.

Полезным результатом решения рассмотренных задач является нахождение изменения скорости роста слоя конденсата в зависимости от режима охлаждения криоповерхности, что может быть использовано для оценки максимальной удельной быстроты действия криопанели, а также для расчета времени эффективного использования криогенной поверхности, в течение которого удельная скорость откачки остается выше величины, заданной техническими условиями.

ГЛАВА V. Экспериментальные исследования процесса поглощения выброса легкоконденсируемого газа криогенными панелями и сравнение их с выводами теории

С целью выявления возможности применения разработанной модификации Кнудсеновской модели течения разреженного газа в полостях с проницаемыми и сорбирующими стенками, а также практического использования результатов, полученных в предыдущих главах, в лаборатории кафедры глубокого охлаждения и разделения газов ЛТИХП и в лаборатории исследования вакуумных систем НПО "Криогенмаш" проведены экспериментальные исследования процесса поглощения легкоконденсируемого газа криогенными панелями при выбросе его в заэкранное пространство.

Основное функциональное назначение модельной установки ЛТИХП состояло в следующем. В процессе эксперимента измерялась величина потока CO_2 , поступающего через рассеиватель в заэкранное пространство, и давление в рабочем объеме камеры. Располагая этими величинами, а также величиной скорости откачки вспомогательного оборудования, оценивалась скорость откачки криогенной панели как "лицевой", так и "обратной" стороны (по отношению к рабочему объему камеры) и рассчитывался поток газа, поглощаемый всеми средствами откачки из рабочего объема. Отношение

потока газа, удаляемого из рабочего объема, к потоку газа, поступающему из источника, составит величину коэффициента ослабления потока источника:

$$\lambda_s = \frac{q_k + q_{кр}}{q_0}.$$

Цель проведенных экспериментов – сравнить полученные указанным образом результаты с результатами прямого теоретического расчета при той же самой конфигурации заэкранного пространства и тех же параметрах элементарных ячеек криогенной структуры. Диапазоны исследуемых параметров:

$$P = 3,2 \cdot 10^{-5} + 6,3 \cdot 10^{-4} \text{ тор},$$

$$h = 50, 100, 150 \text{ мм}, \quad d_{кр} = 250, 350, 302 \text{ мм}, \quad \lambda = 0,63.$$

Различие экспериментальных данных лабораторных исследований поглощения выброса легкоконденсируемого газа криогенной панелью и результатов теоретических расчетов составило

$$\delta_{кр} = \frac{\lambda_1 - \lambda_s}{\lambda_s} \cdot 100\% = \pm 15\%$$

Второй этап экспериментальных исследований состоял в проведении экспериментов на установке для физических исследований КС 5409 по поглощению паров воды при выбросе последних в пространство между криогенным экраном из алюминиевого проката ИО-38 и стенкой камеры. Схема вакуумирования камеры с указанием состава вакуумного оборудования, запорной, измерительной и прочей аппаратуры приведена на рисунке.

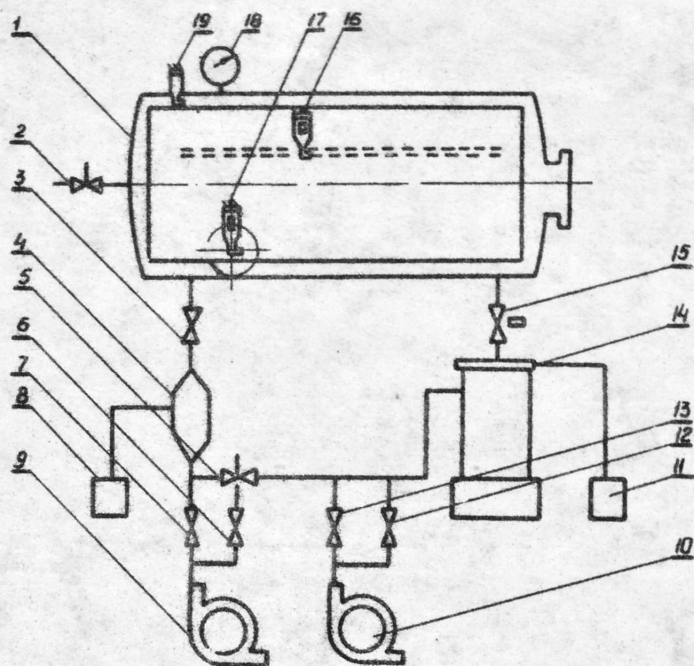
Первая серия экспериментов была проведена с щелевым источником выбросов, расположенным вдоль образующей цилиндрического корпуса камеры параллельно перу криогенного профиля; вторая серия – с точечным источником пара, произвольно расположенным в заэкранном пространстве.

Экспериментальное значение коэффициента ослабления потока щелевого источника получено как отношение величины потока воды на криогенную поверхность

$$q_{кр} = \alpha \frac{\pi}{4} P_k^{H_2O} \left(\frac{\pi D^2}{4} + \pi D L \right)$$

к величине потока источника $q_{ист}$, среднее значение $\lambda_{всп}$ составило 0,0726. Результаты аналогичных экспериментов для точечного источника приводят к значению $\lambda_{всп} = 0,184$.

Для теоретического значения коэффициента ослабления потока источника получена величина $\lambda_{теор} = 0,0735$.



1 Вакуумная камера
 2,5 Вентиль ЭП-32
 3,7,13 Клапан МКУ-50
 4 Азотная ловушка
 6,12 Клапан МКУ-10
 8,11 Азотный питатель
 9,10 Насос ВН-1МГ

14 Вакуумный агрегат ВА-2-3ПР
 15 Затвор ДУ-260
 16 Передвижной датчик давления ПМИ-2
 17 Поворотный датчик давления ПМИ-2
 18 Образцовый вакуумметр
 19 Датчик давления ЛМЗ-2

Схема экспериментально-промышленного
 стенда по изучению поглощения
 выбросов паров воды на базе вакуумной
 камеры КС 5409

Различие теоретических и экспериментальных данных в серии экспериментов со щелевым источником составило величину порядка 10–15%. Здесь расчетная модель течения газа была, по-видимому, близка к реальному течению паров легкоконденсируемого газа. Интересно отметить, что для произвольного характера течения газа в отсутствие изотропии структуры экрана (несоответствие посылкам расчетной модели), что имело место в случае точечного источника, разработанная расчетная модель приводит к правильным по порядку величины результатам, что качественно подтверждает выводы теоретической модели. Перечисленное позволяет сделать вывод о применимости расчетной модели и для оценки характеристик сложных течений при поглощении выбросов легкоконденсируемого газа в пространстве между стенкой камеры и криогенными экранами.

Анализ известных экспериментальных результатов по совокупности работ, выполненных по проверке работоспособности модифицированной модели течения разреженного газа в полостях с проникающими, поглощающими и выделяющими газ стенками, позволяет сделать вывод о её применимости к исследованию работоспособности широкого класса конструкций криогенно-вакуумной техники.

ВЫВОДЫ

1. Решена важная для техники имитации космоса задача расчета оптимальных геометрических, теплофизических и конструктивных параметров высоковакуумной системы удаления легкоконденсируемой компоненты газовой смеси из откачиваемого объема, защиты вакуумного оборудования от воздействия указанной компоненты и защиты вакуумируемого объема от миграции паров рабочего вещества насоса.

2. Разработана диффузионная модель течения разреженного газа в вакуумной полости с проникаемыми, поглощающими или выделяющими газ стенками. Сформулированы основные допущения модели, получены уравнения для стационарных и нестационарных течений разреженного газа как для плоского одномерного течения, так и для радиального и двумерного течений в пространстве между двумя параллельными плоскостями. Обсуждены граничные условия для различных типовых конструкций элементов криогенно-вакуумных систем. Показано, что многие расчетные проблемы криогенно-вакуумной техники в рамках диффузионной модели сводятся к решению соответствующих краевых задач для систем линейных обыкновенных дифференциальных уравнений или уравнений в частных производных.

3. Сформулированы математические постановки задач, построены их решения, по результатам математического моделирования получены рекомендации по конструированию элементов систем защиты высоковакуумного оборудования от нежелательной компоненты откачиваемого газа, защиты откачиваемого объема от паров рабочего вещества насоса и выбросов в вакуумируемый объем легкоконденсируемого газа из испытываемого объекта.

4. Рассмотрены теплофизические аспекты обмерзания криогенной поверхности в режиме максимально возможного подвода конденсата к поверхности фазового перехода, сформулирована математическая задача (полуобратная задача Стефана) и предложен метод её решения.

5. Проведены экспериментальные исследования процесса поглощения легкоконденсируемого газа (H_2O и CO_2) криогенными панелями на температурном уровне жидкого азота на лабораторной и промышленной установках.

6. Показана применимость диффузионной модели течения разреженного газа к расчету широкого класса элементов криогенно-вакуумных систем.

Основные положения диссертации изложены в работах:

1. Лунева Л.А., Макаров А.М. Поглощение выбросов легкоконденсируемого газа криогенными вымораживающими экранами. - В сб.: "Вопросы атомной науки и техники", сер. "Физика и техника высокого вакуума", вып. I(2), Харьков, ХФТИ, 1974.
2. Макаров А.М., Лунева Л.А. Диффузионные течения разреженного газа через криогенные вымораживающие экраны и ловушки. - "Процессы и технология в криогенном машиностроении", Труды НПО "Криогенмаш", 1975.
3. Макаров А.М., Филин Н.В., Лунева Л.А., Панкратова Т.А., Тарасов Н.Н. Особенности диффузионных течений разреженного газа в высоковакуумном трубопроводе с поверхностным выделением или поглощением газа. - "Криогенная техника. Процессы в установках и системах", Труды НПО "Криогенмаш", 1975.
4. Лунева Л.А., Макаров А.М. Метод решения полуобратных задач Стефана с нелинейным оператором теплопроводности. - "Изв. АН СССР, Энергетика и транспорт", 1976, № 3.

5. Макаров А.М., Лунева Л.А., Шведова Г.Н. Об одном методе решения задач теории теплопроводности стефановского типа. - Тезисы докладов I Всесоюзной конференции по криогенной технике, Москва, 1973.
6. Лунева Л.А., Макаров А.М. Исследование поглощения переменного во времени выброса легкоконденсируемого газа за криогенными экранами. - Тезисы докладов IV Всесоюзной научно-технической конференции "Физика и техника высокого вакуума", Ленинград, 1974.
7. Лунева Л.А. К теории пленочной диффузии масла из высоковакуумного диффузионного насоса. - "Основные направления и проблемы создания вакуумного откачного оборудования", Тезисы докладов и сообщений всесоюзной научно-технической конференции, Казань, 1976.
8. Лунева Л.А., Леонов В.В., Панкратова Т.А. Построение оптимальной геометрической формы поверхности осаждения слоя конденсата. - "Основные направления и проблемы создания вакуумного откачного оборудования", Тезисы докладов и сообщений всесоюзной научно-технической конференции, Казань, 1976.

Л 40730. Подп. к печ. 12.07.78г.
Объем I п.л. тип. МВТУ зак. 997..
тир. 100 экз.