

На правах рукописи

НЕСТЕРОВ СЕРГЕЙ БОРИСОВИЧ

КРИОСОРЕЦЦИЯ ИЗОТОПОВ ГЕЛИЯ. ФИЗИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ И
ПРАКТИЧЕСКИЕ ПРИЛОЖЕНИЯ.

Специальность - 01.04.09 - Физика низких температур

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук



Москва - 2000

Работа выполнена на кафедре низких температур Московского энергетического института (технического университета).

Консультанты - доктор технических наук, профессор Крюков А.П.,
 доктор технических наук, профессор Саксаганский Г.Л.
 Официальные оппоненты - доктор физико-математических наук,
 профессор Семашко Н.Н.,
 доктор физико-математических наук,
 профессор Межов-Деглин Л.П.
 доктор технических наук, профессор Быков Д.В.

Ведущая организация - Научно-исследовательский институт электрофизической аппаратуры им. Д.В.Ефремова

Защита состоится « 27 » апреля 2000 г. в 14⁰⁰ часов в Малом актовом зале на заседании диссертационного совета Д053.16.02 Московского энергетического института (технического университета) по адресу: 111250, Москва, Красноказарменная ул., 14.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МЭИ (ТУ). Ответы на автореферат в 2-х экземплярах, заверенные печатью, просим направлять по адресу: 111250, Москва, Красноказарменная ул., 14, Ученый совет МЭИ (ТУ).

Автореферат разослан « _____ » _____ 2000 г.

ученый секретарь
 диссертационного совета
 кандидат технических наук
 доцент



Сасин В.Я.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы. Процесс криосорбции широко используется в самых различных технологиях: в термоядерной энергетике, в микроэлектронике, в ускорительных комплексах, в имитаторах космоса и т. д.

Наиболее трудноконденсируемыми газами являются изотопы гелия (^4He и ^3He). Для обеспечения высоковакуумных условий необходимо, чтобы криопанель находилась при очень низких температурах — порядка десятых долей Кельвина, что представляет собой сложную техническую задачу, решение которой сопровождается большими энергозатратами. В то же время парциальное давление этих газов можно существенно понизить с помощью криосорбции на традиционных сорбентах (угли, силикагели, молекулярные сита, мелкодисперсные порошки), а также на нетрадиционных сорбентах — криослоях сконденсированных газов. Криослоя являются перспективным классом сорбентов, обладающим рядом привлекающих свойств, таких как простота формирования и регенерации, отсутствие пыли, устойчивости к радиационным воздействиям, высокая сорбционная емкость и т. д.

Накопленный богатый экспериментальный материал и технологический опыт по изготовлению и эксплуатации криосососов привел к созданию новой области науки и техники — криовакуумной техники. Сегодня развитие криовакуумной техники осуществляется по двум генеральным направлениям — создание больших криосососов для электрофизической аппаратуры (установки термоядерного синтеза, ускорительно-накопительные комплексы, имитаторы космоса и т. д.) и создание так называемых малых криосососов для обеспечения нужд микроэлектроники, физики твердого тела, для получения новых сверхчистых материалов. Наиболее перспективной с точки зрения практического использования в установках управляемого термоядерного синтеза сегодня считается реакция слияния дейтерия и трития. Откачиваемые продукты реакции представляют собой смесь D_2 , H_2 , ^4He и различных примесей.

Для обеспечения нормальной работы реактора необходимо, чтобы была организована откачка продукта реакции — ^4He со скоростью не менее $1600 \text{ м}^3/\text{с}$.

В последнее время возрос интерес к термоядерным реакторам, работающим на смеси дейтерия и ^3He . Информация по откчке ^3He на сорбентах практически отсутствует. При рассмотрении процесса криосорбции речь идет о количествах сорбата, соответствующих толщинам масштаба одного-двух монослоев. Имея в виду, что толщина одного монослоя соответствует нескольким ангстремам, система сорбент — сорбат является удобным инструментом для изучения свойств материи, не искажаемых влиянием гравитационного поля.

Для адекватности описания любой вакуумной системы необходимо знать поле концентраций и потоков частиц в каждой точке этой системы. Это становится особенно актуальным для систем криовакуумной техники, которым присущи сильное различие температур в различных точках и наличие источников и стоков частиц. Для инженеров-проектировщиков и изготовителей криовакуумных систем является необходимым знание того, как интегральные характеристики, такие как быстрота действия, зависят от массообменных процессов, происходящих на поверхности, от температурного распределения по поверхности системы, от микрогеометрии поверхности и макрогеометрии всей систем в целом.

Поэтому комплексное экспериментальное и теоретическое исследование процесса криосорбции изотопов гелия, осуществленное в настоящей диссертации, представляется безусловно актуальным.

Цель работы. Разработать подход к определению интегральных характеристик сложных вакуумных систем, учитывающий взаимодействие частиц с поглощающей поверхностью на микроуровне и особенности поведения разреженного газа в существенно неравновесных условиях.

Для этого необходимо:

1. Выполнить комплексное исследование процесса криосорбции изотопов гелия ^4He и ^3He на криослоях аргона и азота.
2. Исследовать закономерности процесса криосорбции изотопов гелия на криослоях в районе лямбда-точки.
3. Исследовать поведение разреженных газов в существенно неравновесных условиях.

4. Определить влияние микрогеометрии сорбентов (активированные угли, геттеры) на интегральные откачные характеристики.
 5. Определить профили криослоев в зависимости от типа источника газа, формы поверхности криопанели, количества замороженного конденсата и геометрических размеров систем в целом с учетом и без учета предварительно сформированного криослоя.
 6. Построить компьютерные модели систем селективной откачки смесей газов. Достоверность экспериментальных результатов, изложенных в диссертации, обеспечивается использованием апробированных методов исследования процесса криосорбции, а в случае применения новых методов — тщательным анализом погрешностей, тарировкой измерительной аппаратуры.
- Надежность полученных результатов подтверждается согласованием контрольных экспериментов с данными других авторов. Применяемый для численного анализа метод пробной частицы Монте-Карло многократно тестировался и обеспечил хорошее согласование с данными, полученными известными специалистами в области использования этого метода.

Научная новизна результатов диссертации:

1. Предложен новый подход к анализу сложных вакуумных систем, учитывающий в совокупности характеристики взаимодействия частиц с поверхностью на микроуровне, движение частиц от входной до поглощающей поверхности, обобщенные современные представления о физических особенностях и специфике процесса криосорбции и соответствующие модели, описывающие поведение разреженных газов в существенно неравновесных условиях.
2. Выполнено комплексное исследование криосорбции изотопов гелия. Впервые получены обобщенные изотермы сорбции и зависимости значений теплот сорбции ^4He на криослоях аргона и азота различной толщины ($6 \cdot 10^{21}$ – $3.75 \cdot 10^{23}$ м² для Ar и $3.75 \cdot 10^{22}$ – $6 \cdot 10^{24}$ м² для N₂) от относительной концентрации.

Показано, что изотермы сорбции пересекаются в точке, названной полюсом сорбции. Значения полюсов сорбции для ^4He на криослоях аргона, азота,

кислорода, а также на нержавеющей стали хорошо описываются прямой линией в координатах $\lg P, T^{-1}$.

3. Впервые получены изотермы сорбции ^3He на криослоях аргона толщиной $1.58 \cdot 10^{23} \text{ м}^{-2}$ и $6 \cdot 10^{21} \text{ м}^{-2}$. Сравнение изотерм сорбции ^3He и ^4He на криослое аргона показало, что сорбционная емкость по ^4He выше чем по ^3He . Определены изотермы сорбции ^3He на криослое аргона толщиной $6 \cdot 10^{21} \text{ м}^{-2}$. Предложено объяснение различной сорбционной емкости криослоя аргона по изотопам гелия (^3He и ^4He).
4. Впервые исследовано поведение изотерм сорбции ^4He и ^3He вблизи температуры лямбда перехода ^4He в большом объеме.
5. Из сравнения экспериментальных и расчетных зависимостей теплот сорбции гелия на аргоне от концентрации сделаны заключения о структуре криослоев.
6. Экспериментально определены граничные значения чисел Кнудсена, при которых начинают выполняться соотношения, описывающие свободномолекулярный и вязкостный режимы течения газов.

Практическая ценность: результаты экспериментального исследования процесса криосорбции изотопов гелия, условий регенерации, условий оптимального формирования криослоев имеют непосредственную прикладную направленность на работу систем откачки продуктов реакции управляемого термоядерного синтеза (проекты ИНТОР, ОТР, ITER, малорадиоактивный управляемый синтез).

Исследование криосорбции изотопов гелия на криослоях в районе лямбда-точки имеет фундаментальное значение для понимания закономерностей поведения ненасыщенных пленок вблизи характерных точек гелия при том условии, что вследствие малой толщины этих пленок, сравнимой с несколькими ангстремами, исключается влияние гравитации. Расчетные и экспериментальные исследования по поведению разреженного газа в сильно неізотермичных системах при наличии стоков и источников частиц имеют первостепенное значение для оценки адекватности показаний приборов для измерения вакуума и действительных параметров среды — распределения концентраций и потоков газовых частиц.

Экспериментальные результаты по криосорбции гелия на криослоях являются полезными при проектировании и изготовлении как больших криосососов (УНК,

имитаторы космоса и т.д.), так и малых криосососов (микроэлектроника, физика твердого тела, получение новых материалов).

Полученные в диссертационной работе результаты использовались при проектировании и изготовлении различных криовакуумных устройств в НИИЭФА им. Д. В. Ефремова, в Российском научном центре «Курчатовский институт», на Сердобском электроламповом заводе. Проект «Экспериментальное исследование процессов переноса на межфазной поверхности гелия в условиях микрогравитации» включен в программу исследований на Российском сегменте Международной космической станции, утвержденную Российским авиационно-космическим агентством и РАН.

Автор защищает:

- обобщенные характеристики процесса криосорбции гелия на криослоях аргона и азота в широком диапазоне толщин криослоев и концентраций;
- особенности поведения изотерм сорбции изотопов гелия вблизи лямбда-перехода ^4He в большом объеме;
- полученную на основе решеточной теории зависимость безразмерной скорости захвата от характеристик системы (падающая частица и поверхность), позволяющую делать оценку значения коэффициента прилипания;
- предположение о возможной структуре криослоев, полученное в результате сравнения экспериментальных и расчетных зависимостей величины теплоты сорбции гелия на криослое аргона от относительной концентрации;
- таблицы и номограммы для определения формы криослоя в зависимости от типа источника газа, геометрии криопанели и взаимного расположения источника газа и криопанели с учетом и без учета предвременно замороженного криослоя;
- рассмотренные с единых методических позиций с использованием метода статистических испытаний особенности и эффекты, присущие устройствам криовакуумной техники, и границы их применения (распределение концентрации частиц внутри объемов, ограниченных криволинейными поверхностями; термомолекулярный эффект; влияние типа углового распределения на входе в трубопровод и на поверхности трубопровода на величину проводимости; влияние

геометрии измерительной камеры на величину быстроты действия присоединенного к ней крионасоса; влияние микрогеометрии сорбентов и величины локального коэффициента прилипания на величину интегрального коэффициента прилипания);

- компьютерные модели различных средств селективной откачки смесей газов.

Апробация работы. Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались на 3-ей и 4-ой всесоюзных конференциях по криогенной технике (Балашиха, 1982г., Москва, 1987г.), 3-ей, 4-ой, 5-ой и 6-ой национальных конференциях по инженерным проблемам термоядерных реакторов (Ленинград, 1984, 1988, 1990, 1997 г.г.), 8-ой всесоюзной конференции «Взаимодействие атомных частиц с твердым телом» (Москва, 1987г.), 9-ой и 10-ой всесоюзных конференциях по динамике разреженных газов (Свердловск, 1987 г., Москва, 1989 г.), 17-ом симпозиуме по низкотемпературной физике и технике (Германия, Гауссиг 1988 г.), научно-технической конференции Братиславского технического университета (Братислава, 1989 г.), 5-ой Европейской вакуумной конференции (Испания, Саламанка, 1996г.), 20-ом международном симпозиуме по динамике разреженного газа (Китай, Пекин, 1996 г.), всесоюзной конференции «Состояние и перспективы развития вакуумной техники» (Казань, 1991 г.), всесоюзном семинаре по вакуумной технике (Адлер, 1990 г.), научно-техническом семинаре в фирме APD Stugonics (США, Аллентаун, 1995 г.), 1-ой, 2-ой, 3-ей, 4-ой, 5-ой и 6-ой конференциях "Вакуумная наука и техника" (Гурзуф, 1994, 1995, 1996, 1997, 1998, 1999 г.г.), 2-ой всесоюзной конференции "Теплофизика и гидродинамика процессов кипения и конденсации (Рига, 1988 г.), 5-ой всесоюзной конференции по физике и технике высокого и сверхвысокого вакуума (Ленинград, 1985 г.), конференции по технической криогенике (США, Портланд, 1997 г.), 2-ом международном совещании «Проблемы вакуумных измерений» (Германия, Магдебург, 1997 г.), международном совещании по физическим процессам в условиях микрогравитации (США, Пасадена, 1995 г.), совместном 10-ом Европейском и 6-ом Российском симпозиуме по физическим наукам в условиях микрогравитации (С. Петербург, 1997 г.), 1-ом и 2-ом международных семинарах по физике низких температур в условиях

микрогравитации (Черноголовка, 1997, 1999 г.г.), 44-ом, 45-ом и 46-ом международных симпозиумах Американского вакуумного общества (США, Сан-Хосе, 1997 г., Балтимор, 1998 г., Сизтл, 1999 г.), 2-ом международном симпозиуме ученых и исследователей России и США, выполняющих исследования по программе «Наука-НАСА» (Королев, 1996г.), научно-практической конференции «Вакуумная техника и вакуумные технологии» (Харьков, 1995 г.), 4-ом международном симпозиуме по технологии термоядерного синтеза (Япония, Токио, 1997 г.), научно-исследовательском семинаре «Механика невесомости и гравитационно-чувствительные системы» (Москва, ИПМ РАН, 1997, 1999 г.г.), семинарах секции «Космическое материаловедение» РАН (Москва, ИК РАН, 1996, 1997 г.г.), 3-ей Харьковской вакуумной конференции (Харьков, 1993г.), 14-ом международном вакуумном конгрессе (Англия, Бирмингем, 1998 г.), всесоюзном семинаре по метрологии вакуума (Севастополь, 1991г.), 3-ем международном симпозиуме «Вакуумные технологии и оборудование» (Харьков, 1999г.), 1-й Российской конференции по космическому материаловедению (Калуга, 1999 г.), международной школе-семинаре «Нелинейные задачи теории гидродинамической устойчивости и турбулентности» (Москва, 2000)

Публикации. Основное содержание диссертации изложено в 38 публикациях.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, 7 глав и заключения (общие выводы по работе). Общий объем диссертации 420 страниц, в том числе 218 рисунков и 43 таблицы, список литературы из 253 наименований на 26 страницах.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Введение

В этом разделе диссертации обосновывается актуальность проблемы создания безмасляного вакуума с использованием явления криосорбции. Сформулированы цели работы. Показана научная и практическая значимость работы. Кратко изложены основные положения диссертации, выносимые на защиту.

1. КРИОСОРБИЦИОННАЯ ОТКАЧКА ИЗОТОПОВ ГЕЛИЯ И ВОДОРОДА СЛОЯМИ СКОНДЕНСИРОВАННЫХ ГАЗОВ

Криосорбция — это универсальный криогенный способ откачки всех без исключения газов, осуществляемый при разумных по технико-экономическим критериям температурах (обычно 4–8 К) и энергозатратах.

Эффективными сорбентами могут служить не только традиционные поверхностно-активные вещества, имеющие сложную микропористую структуру — активированные угли, цеолиты, силикагели, алюмогели, геттеры. При некоторых условиях значительной сорбционной емкостью и высокими динамическими характеристиками обладают также слои газовых конденсатов. Легкоконденсируемые газы образуют сорбирующий слой для газов, не конденсирующихся при данной температуре.

Крупный вклад в решение научных и технологических задач, связанных с промышленным освоением криовакуумного оборудования, внесен отечественными учеными и инженерами, прежде всего специалистами Харьковского физико-технического института, физико-технического института низких температур, научно-производственного объединения криогенного машиностроения, научно-исследовательского института электрофизической аппаратуры, института атомной энергии.

В настоящее время теория процесса криооткачки на криослоях не разработана, что обуславливает использование в практической работе экспериментально определяемых характеристик.

Структура слоев сконденсированных в вакууме газов определяется следующими физическими явлениями: процессами тепло- и массообмена, характеризующимися коэффициентами конденсации и испарения; тепловой конденсации, адсорбции; процессами поверхностной диффузии и т. д. Контролируемыми технологическими параметрами, т. е. условиями формирования, определяющими структуру слоев и адсорбционные свойства, являются природа вещества, энергетическое и угловое распределение частиц, падающих на поверхность, природа и структура вещества подложки, наличие примесей и их

свойства, температура поверхности, условия теплопередачи, скорость формирования слоя и т. д.

Необходимо провести систематическое исследование криосорбции гелия на криослоях с целью ответа на вопрос об оптимальных условиях организации процесса, обобщения известных данных и представления их в удобном виде для инженеров-проектировщиков различных вакуумных установок и систем.

2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА И МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССА КРИОСОРБЦИИ НА КРИОСЛОЯХ

Эксперименты по криосорбции гелия осуществлялись на высоковакуумной установке, позволяющей проводить измерения в области низких температур. Схема экспериментальной установки представлена на рис. 1.

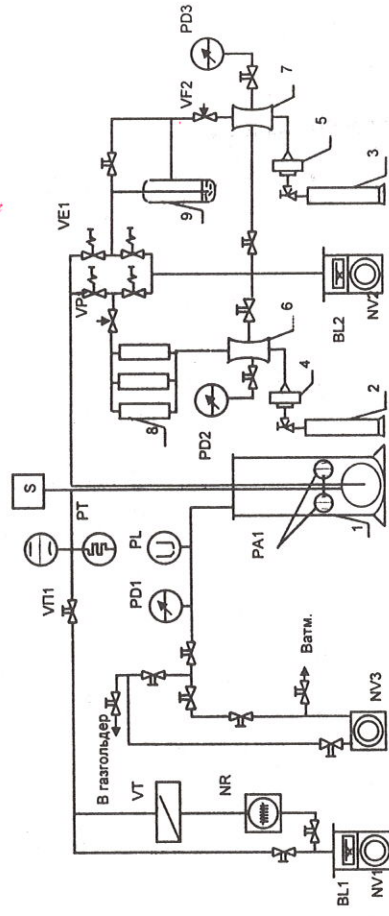


Рис. 1. Схема экспериментальной установки.

Она состоит из четырех автономных подсистем: криоблок, система предварительной откачки, система откачки паров гелия, система нагревания (подачи газов в вакуумную камеру). Установка оборудована также системой контрольно-измерительной аппаратуры для регистрации параметров процессов.

Основным элементом экспериментальной установки является криоблок, состоящий из серийного гелиевого криостата КГ-60/300-1 и помещенной в него

вакуумной камеры. Последняя представляет собой сферу из меди диаметром 270 мм и толщиной стенки 1 мм.

Вакуумная камера соединяется с системой предварительной откачки и измерительным модулем тонкостенной (толщина стенки — 0.5 мм) трубой из нержавеющей стали диаметром 100 мм и длиной 1400 мм.

С помощью системы полуавтоматического регулирования, включающей четыре угольных термометра сопротивления и систему подавления гелия, уровень жидкого гелия, омывающего стенки вакуумной камеры, поддерживается постоянным во всех экспериментах.

Система предварительной откачки состоит из высоковакуумного турбомолекулярного насоса NR (рис. 1) типа ВМН-150, форвакуумного пластинчато-роторного насоса NV1 2НВР-5ДМ с охлаждаемой жидким азотом защитной ловушкой ВЛ1, системы трубопроводов и вентиляй. Вся вакуумная система собрана на медных уплотнениях и допускает прогрев до 600 К.

Газы из системы нагекания поступают в камеру через трубку напуска диаметром 11 мм, расположенную по оси присоединительного трубопровода, и распределительное устройство, находящееся в центре камеры. Распределительное устройство представляет собой сферу диаметром 15 мм, изготовленную из трех слоев стальной сетки с размером ячейки 64 мкм и диаметром проволоки 50 мкм.

Основным измеряемым параметром является давление в медной сфере. Измерительный модуль 9, находящийся при температуре окружающей среды, соединен с системой предварительной откачки и с экспериментальной камерой 4. Измерительный модуль представляет собой конструкцию, позволяющую при помощи стандартных фланцевых соединений с медными уплотнительными кольцами толщиной 0.4 мм подсоединить к установке четыре ионизационных преобразователя на металлических фланцах. Обычно это два преобразователя ЛМ-3-2 и два преобразователя ПМИ-27. Преобразователи ЛМ-3-2 подсоединялись к вакуумметрам ВИТ-2, ПМИ-27 — к вакуумметрам ВМ-14. К измерительному модулю также присоединен газоанализатор монополярного масс-спектрометра МХ-7304.

Температура сферы определяется по давлению насыщенных паров жидкого гелия и контролируется при помощи золото-железо-медных термопар и арсенид-галлиевых термометров сопротивления.

Предлагаемая методика состоит из следующих этапов: предварительная откачка системы; захлаживание системы до рабочей температуры; формирование слоя адсорбента; получение изотерм и изостер сорбции.

Слой сорбента (в данном случае азота или аргона) формируется в результате конденсации газа на внутреннюю поверхность медной сферы. Газ подается через систему нагекания, позволяющую определить его расход.

После формирования слоя необходимой толщины и временной выдержки производится напуск гелия. Содержание гелия в слое определяется в относительных единицах.

Изотермы сорбции снимаются в интервале давлений $10^{-6} \dots 10^{-1}$ Па.

Изостера сорбции представляет собой зависимость равновесного давления над слоем сорбента от величины, обратной температуре при постоянной концентрации сорбата.

3. ИССЛЕДОВАНИЕ КРИСОРБЦИИ ИЗОТОПОВ ГЕЛИЯ НА КРИОСЛОЯХ

Целью экспериментов являлось обобщение данных и их представление в виде, удобном для инженеров-проектировщиков различных вакуумных установок и систем.

На рис. 2 приведены полученные изостеры сорбции ^4He на криослоях аргона и азота, сформированных при $T=4.2$ К для различных толщин θ и скоростей формирования слоя W. Полученные результаты хорошо описываются в полулогарифмических координатах прямыми линиями. Прямые линии, экстраполированные в область высоких температур, пересекаются в точке, которую в дальнейшем будем называть полюсом сорбции.

Изостеры сорбции, полученные в различных экспериментах, но при одинаковых условиях, имеют хорошую повторяемость.

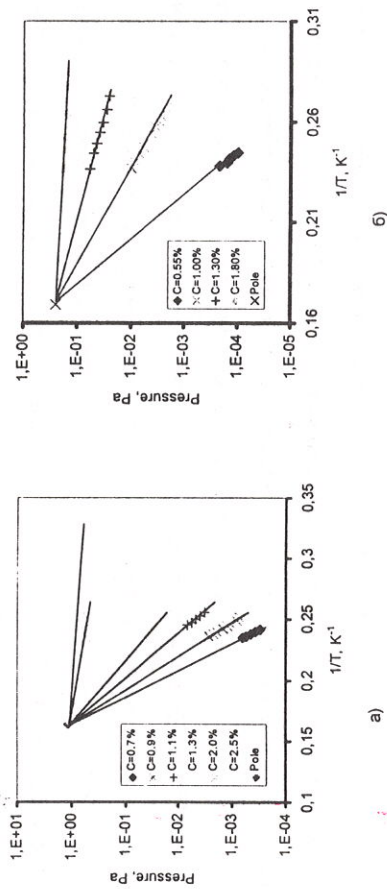


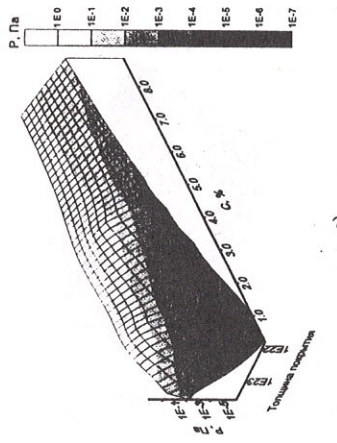
Рис. 2. Изотермы сорбции ^4Ne на криослоях аргона (а) и азота (б), сформированных при 4,2 К для различных толщин θ и скоростей формирования слоя W: а) $\theta=1.02 \cdot 10^{23} \text{ м}^2$, $W=2.8 \text{ Па} \cdot \text{м}^3/\text{с}$; б) $\theta=3.75 \cdot 10^{22} \text{ м}^2$, $W=2.8 \text{ Па} \cdot \text{м}^3/\text{с}$.

Толщины криослоев аргона лежат в диапазоне $6 \cdot 10^{21}$ – $3.75 \cdot 10^{23} \text{ м}^2$, а криослоев азота — в диапазоне $3.75 \cdot 10^{22}$ – $6 \cdot 10^{24} \text{ м}^2$. Для удобства сравнения толщина криослоя приводится в частицах на м^2 геометрической поверхности криопанели. Положение изотермы сорбции в сильной степени зависит от количества сорбента. Чем меньше толщина сорбента, тем большее относительное количество сорбата поглощается при одинаковом уровне давления сорбата в газовой фазе. Скорость формирования криослоя оказывает существенно меньшее влияние на положение изотермы сорбции, чем толщина криослоя.

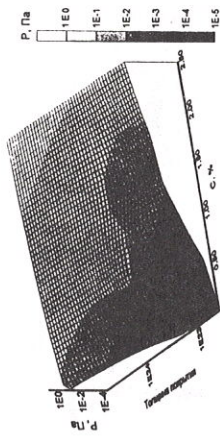
Время установления равновесного давления составляло величину от нескольких минут для больших относительных концентраций до нескольких часов для малых относительных концентраций.

Полученные результаты удобно представить в виде зависимости равновесного давления P от относительной концентрации C и толщины криослоя θ (рис. 3).

Изостера сорбции позволяет получить значение теплот сорбции гелия на криослоях аргона и азота. Теплота сорбции является основной энергетической характеристикой процесса сорбции. Она определяет количество теплоты, которое необходимо отвести от системы для связывания в данном случае одного моля сорбата. При малом заполнении экспериментально определенные величины теплот сорбции гелия как на аргоне, так и на азоте в десять и более раз превышают



а)



б)

Рис. 3. Изотермы сорбции гелия на аргоне — а) и азоте — б) для различных толщин слоёв.

значение теплоты конденсации гелия (80.8 Дж/моль). Сравнение зависимостей $Q_{\text{сорбции}} = f(C)$ для криослоев аргона и азота, сформированных в одинаковых условиях, показывает значительное преимущество криослоев аргона.

Полученные экспериментально результаты хорошо описываются экспоненциальной зависимостью. Точки пересечения этой зависимости с прямой линией, соответствующей значению теплоты конденсации гелия $Q=80.8 \text{ Дж/моль}$ позволяют определить значение относительной концентрации C, при которой заканчивается процесс сорбции и начинается процесс конденсации.

Экспоненциальные зависимости, построенные в полулогарифмических координатах ($\lg Q, C$), представляют собой прямые линии. Эти прямые при пересечении с ординатой позволяют определить значение теплоты сорбции при нулевом заполнении, т. е. при концентрации C, стремящейся к нулю.

Величина Q_0 почти для всех кривых за исключением двух, соответствующих самой малой толщине криослоя аргона ($6 \cdot 10^{21} \text{ м}^2$) близка к 1000 Дж/моль для азота и для аргона. Поэтому для инженерных оценок можно в качестве Q_0 рекомендовать эту величину. Для удобства инженера-проектировщика криовакуумных устройств на рис. 4 приведены зависимости теплот сорбции ^4Ne от толщины криослоя θ и относительной концентрации C.

Наиболее приемлемым способом обработки результатов на криосорбции гелия на газовых сорбентах является метод, предложенный Дубининым и Радушкевичем. Уравнение Дубинина-Радушкевича получено на основе потенциальной теории Поляни

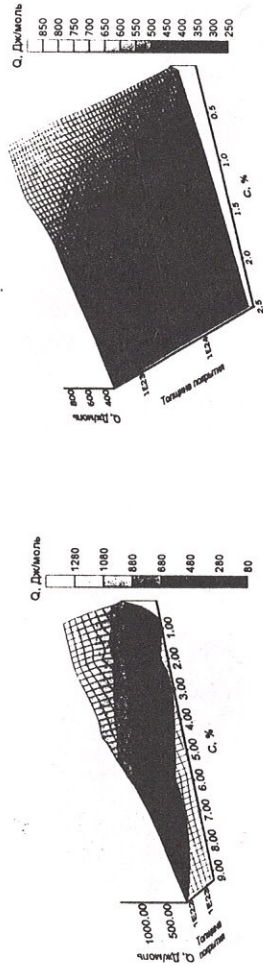


Рис. 4. Зависимость теплот сорбции гелия на аргоне — а) и азоте — б) для различных толщин слоя от концентрации С.

$$\lg C = \lg C_m - 2.303 D^{-2} [RT \cdot \lg(P_s/P)^2] \quad (3.1)$$

Где P_s — давление насыщения адсорбата, D — энергия, C_m — емкость монослоя.

Согласно этому уравнению изотермы сорбции в координатах $\lg C - (\lg(P_s/P)^2)$ должны быть прямыми линиями во всей области заполнения, пересекая ось ординат в одной и той же точке. Эта точка пересечения трактуется как адсорбционная емкость монослоя. При этом заполнении поверхность адсорбента должна быть покрыта плотно одним слоем адсорбата.

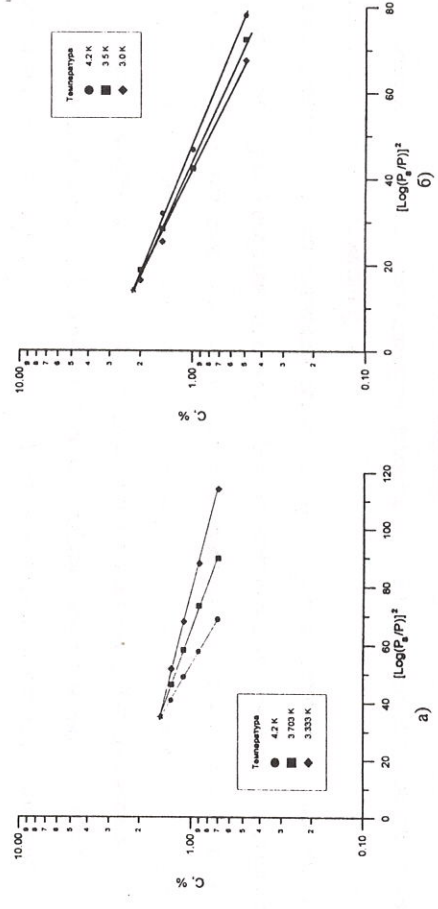


Рис. 5. Изотермы сорбции гелия на аргоне (а) и азоте (б) в координатах уравнения Дубинина-Радушкевича: а) $\theta = 1.02 \cdot 10^{22} \text{ м}^{-2}$, $W = 2.8 \text{ Па} \cdot \text{м}^3/\text{с}$; б) $\theta = 3.75 \cdot 10^{22} \text{ м}^{-2}$, $W = 2.8 \text{ Па} \cdot \text{м}^3/\text{с}$

Результаты наших экспериментов, построенные в координатах уравнения Дубинина-Радушкевича, приведены на рис. 5. Из этого рисунка следует, что точка пересечения изотерм сорбции расположена не на ординате. Это говорит о том, что давление над криослоем в точке пересечения изотерм сорбции в принципе не равняется давлению насыщенных паров гелия при данной температуре. В табл. 1 для криослоев аргона и азота, сформированных в различных условиях, приведены значения концентраций, соответствующих точкам пересечения изотерм сорбции $C_{конд}$ и концентраций $C_{конд}$, при которых величины теплот сорбции становятся равными величине теплоты конденсации.

Табл. 1. Координаты полосов сорбции.

№	Сорбент	Толщина слоя, частиц/м ²	Скорость формирования слоя, Па·м ³ /с	Координаты полоса		Емкость монослоя C_m , %	Емкость $C_{конд}$, %	$C_{конд}/C_m$	Удельная поверхность A_0 , м ² /г
				P, Па	T, K				
1	Аргон	$6 \cdot 10^{21}$	0.93	0.122	0.186	8.0	11.66	1.46	186
2	Аргон	$6 \cdot 10^{21}$	0.93	0.117	0.192	7.7	10.96	1.42	179
3	Аргон	$1.2 \cdot 10^{22}$	0.93	0.261	0.169	6.0	8.00	1.33	139
4 ¹⁾	Аргон	$6 \cdot 10^{21}$	0.93	3.5	0.152	—	—	—	—
5	Аргон	$3.75 \cdot 10^{22}$	2.8	0.6	0.192	5.8	9.20	1.58	99
6	Аргон	$1.02 \cdot 10^{23}$	2.8	1.15	0.164	1.5	2.36	1.57	35
7	Аргон	$3.75 \cdot 10^{22}$	~14.6	13.3	0.13	0.7	1.28	1.83	16
8	Аргон	$3.75 \cdot 10^{23}$	~14.6	900	0.097	6.0	10.04	1.67	118
9	Аргон	$1.125 \cdot 10^{23}$	0.133	1.65	0.146	2.8	4.02	1.44	65
10	Аргон	$1.02 \cdot 10^{23}$	0.133	1.2	0.174	1.2	1.85	1.54	28
11	Аргон	$3.75 \cdot 10^{23}$	2.8	2.0	0.17	0.29	0.66	2.31	7
12	Азот	$1.125 \cdot 10^{23}$	~14.6	133	0.1	1.3	2.69	2.07	40
13	Азот	$1.875 \cdot 10^{23}$	~14.6	800	0.098	0.95	1.79	1.88	32
14	Азот	$3.75 \cdot 10^{22}$	2.8	0.5	0.193	2.0	3.70	1.85	42
15	Азот	$3.75 \cdot 10^{22}$	~14.6	1000	0.07	3.0	5.26	1.76	100
16	Азот	$1.125 \cdot 10^{23}$	~14.6	700	0.05	2.8	5.58	1.99	93
17	Азот [ДубининЮ.А.]	$6 \cdot 10^{24}$	2.6	1000	0.1	0.31	0.55	1.87	4
18	Азот [Юферов В.Б.]	—	—	$1.5 \cdot 10^4$	0.02	—	—	—	—
19	Сталь нержавеющая [Wallen E.]	—	—	$1.47 \cdot 10^5$	0.01	—	—	—	—
20	Кислород [Юферов В.Б.]	—	—	400	0.12	—	—	—	—

На рис. 6 приведены величины полосов сорбции гелия на криослоях аргона, азота, кислорода и на поверхности нержавеющей стали, полученные в результате обработки данных различных авторов в координатах $\lg P - T$. Координаты полюсов сорбции приведены в табл. 1.

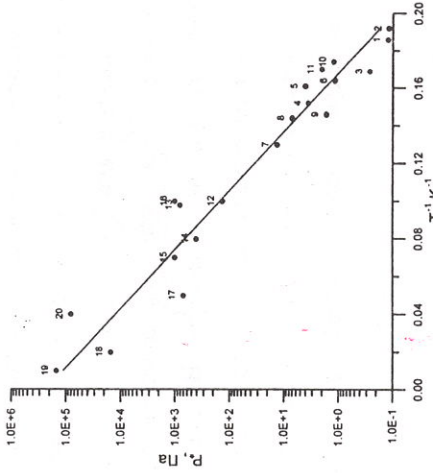


Рис. 6. Величины полюсов сорбции гелия на криослоях аргона, азота, кислорода, и на поверхности нержавеющей стали.

откачивается лучше, чем ^3He .

При криосорбции мы имеем дело с так называемыми ненасыщенными пленками сорбата. Ненасыщенными называются пленки, над которыми давление пара меньше равновесного давления насыщенного пара P_s при той же температуре. Имея в виду, что при сорбции гелия на сорбентах речь идет о количествах гелия, сопоставимых с монослоем, интересным представляется изучение поведения тонких

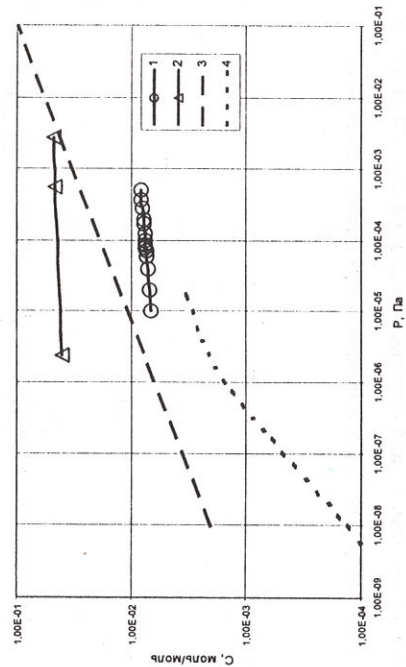


Рис. 7. Изотермы сорбции ^3He на криослоях аргона и азота различной толщины: 1 — криослой Ar толщиной $\theta = 1.58 \cdot 10^{23} \text{ м}^2$, скорость формирования $6.53 \text{ м}^3 \text{ Па/с}$; 2 — криослой Ar толщиной $\theta = 6 \cdot 10^{21} \text{ м}^2$, скорость формирования $0.93 \text{ м}^3 \text{ Па/с}$; 3 — криослой Ar толщиной θ от $2.1 \cdot 10^{22}$ до $9.7 \cdot 10^{22} \text{ м}^2$; 4 — криослой N_2 толщиной $\theta = 2.1 \cdot 10^{22} \text{ м}^2$. 3, 4 — данные Папко В.М. и сор.

пленок гелия при переходе через лямбда-точку. Известно, что температура лямбда-перехода для ^4He в большом объеме $\approx 2.172 \text{ K}$, а для ^3He в большом объеме $\sim 10^{-3} \text{ K}$.

При изучении критических явлений, в частности, при исследовании фазового перехода второго рода в гелии, большое значение имеет как можно более точное определение характерных параметров такого перехода. Известно, что лямбда-линия не является вертикальной, а имеет отрицательный наклон.

Таким образом, в земных условиях из-за наличия поля сил тяжести не удается точно определить значение температуры лямбда-перехода в большом объеме.

Принципиально существует два пути преодоления этой трудности. Первый путь связан с проведением экспериментов в околоземном пространстве в условиях микрогравитации. Подобные эксперименты были проведены на борту космического аппарата "Шаттл" в рамках программы научных исследований NASA (LPE - lambda point experiment)

Второй путь предполагает организацию на Земле таких условий, при которых влиянием гравитации можно пренебречь. В данной работе рассматривается один из возможных вариантов реализации этого пути. Этот вариант связан с изучением явления криосорбции гелия на тонких (масштаба одного микрона) криослоях при переходе через лямбда-точку.

В данном случае имеется в виду, что малая величина толщины криослоя, и тем более пленки сорбата, позволяет пренебречь при анализе процесса влиянием сил гравитации.

Основной интерес в контексте данного раздела представляет собой поведение зависимости $P=f(T^{-1})$ вблизи лямбда-точки.

На рис. 8 приведены изостеры сорбции изотопов гелия (^4He и ^3He) на аргоновых криослоях вблизи лямбда-точки. Из этого рисунка видно, что при криосорбции ^4He на аргоновых криослоях различной толщины $3.75 \cdot 10^{22} \text{ м}^2$ и $6 \cdot 10^{21} \text{ м}^2$ изостера сорбции претерпевает скачкообразное изменение вблизи температуры лямбда-перехода. При криосорбции ^3He подобного изменения характера изостеры не происходит — изостера имеет прямолинейный вид в соответствии с уравнением Клапейрона-Клаузиуса. Сравнение поведения изостер ^4He и ^3He на криослоях

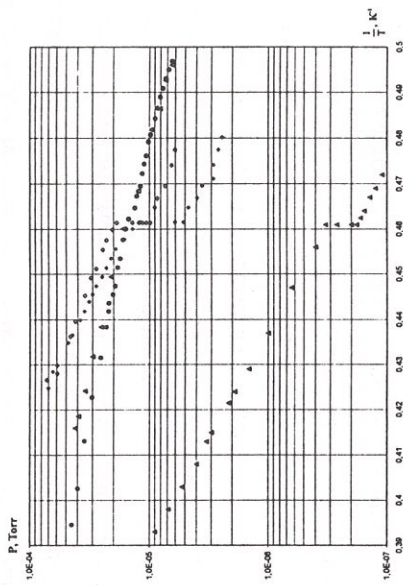


Рис. 8. Зависимости давления ^4He (\blacktriangle , \blacklozenge) и ^3He (\bullet , \blacklozenge) от $1/T$ на криослое аргона.
 \blacktriangle — $C=4,5\%$, $\theta=3,75 \cdot 10^{21} \text{ м}^{-2}$
 \blacklozenge — $C=10,2\%$, $\theta=6 \cdot 10^{21} \text{ м}^{-2}$
 \bullet — $C=4,8\%$, $\theta=6 \cdot 10^{21} \text{ м}^{-2}$
 \blacklozenge — Первое захлаживание
 \blacklozenge — Второе захлаживание
 \triangle — $C=4,8\%$, $\theta=6 \cdot 10^{21} \text{ м}^{-2}$
 \triangle — Второе захлаживание

аргона, сформированных в идентичных условиях, приводит к выводу о том, что аномальный характер поведения давления присущ именно системе аргон — ^4He .

4. РАСЧЕТНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ГЕЛИЯ И ДЕСУБЛИМИРОВАННОГО ГАЗА.

4.1. Определение коэффициентов прилипания гелия на поверхности десублимированных газов.

Для расчета и проектирования криососов важным является знание коэффициентов прилипания откачиваемого газа на поверхности сорбента. Под коэффициентом прилипания β в данном случае понимается отношение числа молекул, прилипающих в единицу времени на единице поверхности $N_{\text{пр}}$, к числу падающих на эту поверхность за то же время молекул $N_{\text{пад}}$.

В работе для определения коэффициентов прилипания используется решеточная теория. Налетающий атом массой M взаимодействует с центральным атомом кристаллической решетки массой m . Для описания процесса взаимодействия атома M с атомом m используется потенциал Морзе. Рассматривается нормальное к поверхности падение атома на твердое тело, представленное в виде многомерной

полубесконечной кубической решетки и находится смещение атомов этой решетки от элементарного возмущения, получаемого в процессе взаимодействия с одним из поверхностных атомов. Смещение полубесконечной решетки выражается через смещение бесконечной решетки. Затем в предположении, что между атомами решетки действуют упругие силы, записывается уравнение движения центрального атома решетки, представляющее собой второй закон Ньютона. Функция отклика атоматически учитывает влияние всей решетки на движение каждого атома и позволяет избежать интегрирования уравнений движения большого количества атомов и, следовательно, значительно упрощает вычисления.

В начальный момент задается скорость газовой молекулы и ее расстояние от атома решетки.

В результате решения системы интегрально-дифференциальных уравнений получались зависимости изменения координаты молекулы газа и центрального атома решетки, скорости молекулы, силы взаимодействия от времени.

Основное упрощение данной модели основано на предположении, что движение кристалла описывается гармоническим потенциалом взаимодействия.

Второе упрощение состоит из двух предположений: кристалл моделируется простой кубической решеткой; силы взаимодействия между всеми атомами кристалла моделируются силами только между ближайшими соседями.

При анализе не учитывается тепловое движение атомов, шероховатость поверхности и влияние адсорбированных атомов.

При определении коэффициентов прилипания предполагалось, что молекулы газа распределены по скоростям в соответствии с функцией Максвелла. В результате расчетов были определены скорости захвата молекул газа. Зная скорость захвата, можно определить коэффициент прилипания $\beta=1-\exp(-V_{\text{захв}}^2/2RT)$

На рис. 9 приведена зависимость безразмерной захватной скорости от параметров $B=(a^2/K)D$ и $\mu=M/m$, где a и D — параметры потенциала Морзе, K — параметр, характеризующий упругую связь между атомами решетки.

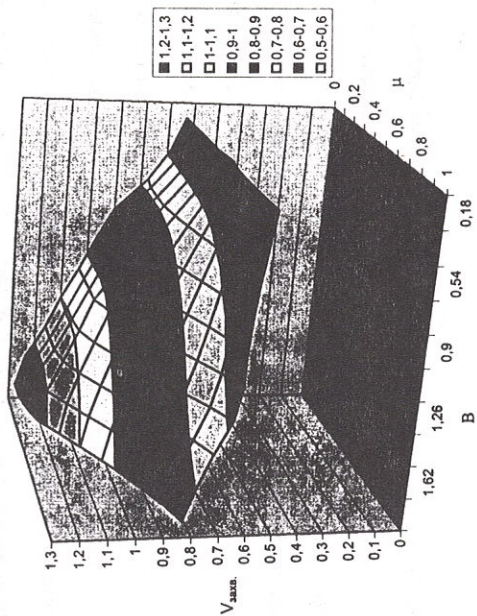


Рис. 9. Зависимость безразмерной захватной скорости от параметров В и μ .

Для криослоев аргона, сформированных в одинаковых условиях, при одинаковом давлении сорбата, сорбционная емкость по ^4Ne оказывается выше сорбционной емкости по ^3Ne . В то же время глубина потенциальной ямы и диаметр атомов ^4Ne и ^3Ne одинаковы. Известно, что при сорбции в случае наступления динамического равновесия, т.е. равенства потоков частиц, прилипающих на единице поверхности и вылетающих с единицы поверхности

$$\beta \cdot \frac{P}{\sqrt{2\pi m k T}} = N_A \cdot V_* \cdot \exp\left(\frac{-E}{RT}\right) \quad (4.1)$$

где β — коэффициент прилипания; P — давление газа; m — масса молекулы газа; k — постоянная Больцмана; T — температура газа; N_A — количество частиц, сорбированных на единице поверхности; V_* — постоянная; E — энергия связи частицы на поверхности; R — универсальная газовая постоянная; T — температура поверхности.

Для изотопов гелия ^4He и ^3He :

$$N_A = \text{const} \frac{\beta}{\sqrt{m}} \quad (4.2)$$

Из полученной в результате расчетов зависимости безразмерной скорости от параметров μ и B можно определить значения безразмерной захватной скорости изотопов ^4He и ^3He на кристаллическом аргоне $V_{\text{зехв.}}(^4\text{He}) = 0.75$, $V_{\text{зехв.}}(^3\text{He}) = 0.65$.

В табл. 2 приведены значения захватных скоростей в безразмерном и размерном виде и значения коэффициентов прилипания изотопов гелия для различных значений температур

Табл. 2. Значения захватных скоростей и коэффициентов прилипания.

$V_{\text{зехв.}}$ безразм.	$V_{\text{зехв.}}$, м/с	$\beta(T=300 \text{ K})$	$\beta(T=77 \text{ K})$
$^4\text{He-Ar}$	0.75	280.5	0.061
$^3\text{He-Ar}$	0.65	243.1	0.035

Отношение числа частиц ^4He и ^3He , сорбированных на единице поверхности

$$\frac{N_{A,^4\text{He}}}{N_{A,^3\text{He}}} = \frac{\beta_{^4\text{He}} \cdot \sqrt{m_{^3\text{He}}}}{\beta_{^3\text{He}} \cdot \sqrt{m_{^4\text{He}}}} \quad (4.3)$$

При $T_r=300 \text{ K}$

$$\frac{N_{A,^4\text{He}}}{N_{A,^3\text{He}}} \cong 1.51 \quad (4.4)$$

При $T_r=77 \text{ K}$

$$\frac{N_{A,^4\text{He}}}{N_{A,^3\text{He}}} \cong 1.46 \quad (4.5)$$

Если при одинаковых условиях число частиц ^4Ne в сорбированном состоянии больше числа частиц ^3Ne , следовательно сорбционные характеристики криослоя по ^4Ne будут лучшими, чем по ^3Ne .

4.2. Расчетное определение зависимости температуры теплот сорбции гелия на криослоях аргона от относительной концентрации.

Данная часть работы посвящена нахождению расчетных зависимостей $Q_c=f(C)$, построенных на основе простых моделей, описывающих взаимодействие

кристаллического аргона с атомами гелия. Из сравнения расчетных и экспериментальных зависимостей можно сделать предположение о структуре криослоя. Это представляет большой интерес, так как, с одной стороны, структура определяет сорбционные характеристики криослоя, а с другой стороны, произвести прямые исследования этой структуры весьма затруднительно.

Для расчетов принимались следующие модели поверхности аргона: плоская поверхность, поверхность в виде уголка, две параллельные пластины и пора в виде прямоугольного колодца. Для упрощения расчетов поверхности рассматривались идеальными, то есть без дефектов кристаллической решетки.

Для расчетов было сделано допущение о том, что взаимодействие между атомами гелия и аргона описывается потенциалом Леннарда-Джонса.

При взаимодействии атома с целой поверхностью производится суммирование потенциалов взаимодействия атомов гелия с отдельными атомами кристаллической решетки.

Тогда теплота сорбции $Q_s = \Phi \sum N_A$, где N_A — число Авогадро.

Потенциал взаимодействия с увеличением расстояния r_i быстро падает, поэтому в расчетах достаточно учесть 74 атома аргона. При этом погрешность определения потенциала взаимодействия ϕ составит менее 5%.

При наложении различных расчетных и экспериментальных кривых на один график (рис. 10) можно увидеть, что при соответствующих параметрах расчетная и экспериментальная кривые эквидистантны, причем их несовпадение можно объяснить, в том числе, и неточностью и разбросом в исходных данных, взятых по разным источникам, который довольно велик. При больших толщинах покрытия лучшее совпадение дает плоская поверхность, а значит адсорбция будет идти в основном на плоскостях и криослой можно представить в виде отдельных относительно больших параллелепипедов.

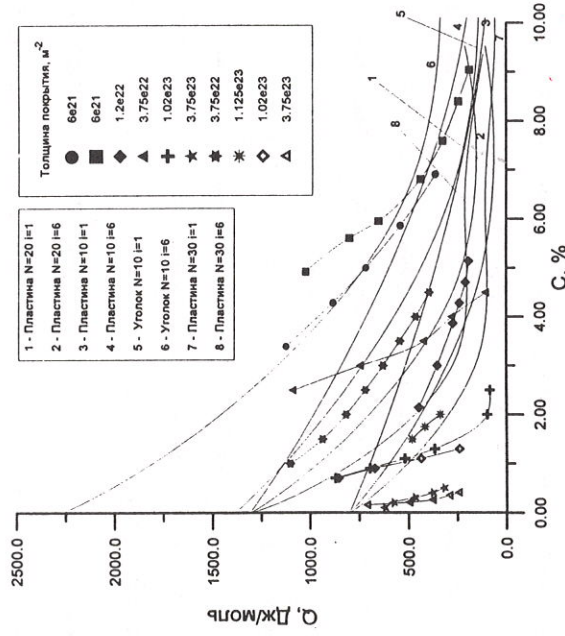


Рис. 10. Расчетные и экспериментальные зависимости теплоты сорбции от относительной i — номер исходных данных);

При сопоставлении расчетных и экспериментальных кривых также можно увидеть, что для двух экспериментальных зависимостей с самой маленькой толщиной покрытия ($\theta = 6 \cdot 10^{-21} \text{ 1/м}^2$) лучше подходит расчетные зависимости для уголка и двух параллельных пластин. Таким образом, можно предположить, что при меньшей толщине покрытия в кристаллах аргона станет больше дефектов, в частности в виде уголков и щелей, которые и будут давать такое значение теплоты сорбции. При больших толщинах криосорбция гелия будет идти в основном на плоских поверхностях (то есть слой должен состоять из отдельных кубиков или игл). При уменьшении толщины слоя аргона увеличивается число дефектов в его кристаллах, структура поверхности становится более разветвленной, кристаллики принимают форму дендритов, так как лучшее совпадение с экспериментом дают расчетные зависимости для уголка и двух параллельных пластин. С помощью этих поверхностей можно моделировать различные дефекты, например, ступени спайности и трещины, ветви, уступы и так далее.

5. АНАЛИЗ СЛОЖНЫХ ВАКУУМНЫХ СИСТЕМ.

5.1. Описание и тестирование метода пробной частицы.

Специфика криовакуумной техники состоит в том, что, как правило, имеют место наличие сильных температурных перекосов, газопоглощающих и газовыделяющих поверхностей, нестационарных процессов.

Построение двумерных и пространственных полей молекулярной концентрации, плотности газовых потоков, других параметров переноса в многокомпонентных структурах представляет собой важную задачу современной вакуумной техники. Анализ таких полей позволяет осуществить комплексную структурно-геометрическую оптимизацию проектируемых средств откачки и вакуумных систем в целом. Он способствует также адекватной интерпретации физических эффектов в разреженных газах, обоснованной оценке погрешности производимых вакуумных измерений и лучшему пониманию особенностей вакуумно-технологических процессов.

В данной главе для анализа различных вакуумных систем используется метод пробной частицы. При расчетах с использованием метода пробной частицы используются следующие допущения: частицы в вакуумной камере движутся независимо друг от друга, т. е. отсутствуют межмолекулярные столкновения; адсорбция частиц на поверхности вакуумной камеры отсутствует; отражение частиц от стенки вакуумной камеры осуществляется в соответствии с диффузным законом; температура газа равна температуре стенки вакуумной камеры; газ подчиняется законам идеального газа.

Для проверки достоверности получаемых результатов было проведено тестирование используемого алгоритма на различных типах задач и сравнение полученных результатов с данными из различных источников.

5.2. Распределение концентрации частиц в объемах различной формы.

В данной работе рассматривается влияние формы вакуумной системы на неравномерность газовых распределений. Расчётным способом получено распределение концентрации молекул внутри вакуумных объёмов различной формы

(куб, цилиндр, сфера) в предположении об изотермичности всех поверхностей. Распределение концентраций внутри куба носит равномерный характер.

Вдоль продольной оси цилиндра распределение носит равномерный характер, однако в поперечном направлении (вдоль радиуса) распределение становится явно анизотропным, причём в центре и у торца это проявляется по-разному.

Внутри сферы неравномерность распределения носит самый яркий характер. Расчет показал, что независимо от условий старта (из малой сферы в центре, или из объёма), через малый промежуток времени распределение приобретает одинаковый характер. Для стабилизации достаточно $5 \div 10$ соударений частицы с поверхностью.

Для проверки полученных расчётным путём результатов был проведён эксперимент по определению пространственного распределения концентрации внутри сферического объёма.

Для проведения эксперимента был смонтирован специальный ввод, позволяющий перемещать в горизонтальном направлении от центра к внутренней поверхности сферы и обратно ионизационный преобразователь давления. С помощью этого преобразователя на вакуумметр подается сигнал, позволяющий судить об изменении концентрации частиц.

Анализ данных экспериментов позволяет сделать вывод о том, что величина концентрации частиц внутри сферического объёма является неизменной по радиусу в диапазоне чисел Кнудсена $1 < Kn < 30$.

По результатам данного раздела можно сделать следующие выводы:

1. расчётным путём установлено, что пространственное распределение концентрации зависит от конфигурации вакуумной системы — при наличии криволинейных поверхностей возможны значительные искажения поля концентрации;
2. эксперимент не подтвердил, что реальное распределение концентрации в сферическом объёме неравномерное, однако при анализе поверхности сферы, выполненном при помощи туннельного электронного микроскопа, оказалось, что она фактически состоит из плоских фрагментов, поэтому результаты экспериментов не опровергают результаты расчётов;

5.3. Исследование термомолекулярного эффекта.

Целью данного раздела является расчетное определение границ применения термомолекулярного соотношения и проведение физического эксперимента по исследованию термомолекулярного эффекта для различных геометрий вакуумных систем и различных газов.

Для двух сфер, соединённых диафрагмой, проводились расчёты коэффициентов температурной транспирации при разных соотношениях диаметров диафрагмы и сфер.

Расчёты показали, что при увеличении соотношения $d_{\text{диафр.}}/D_{\text{сферы}}$, то есть при увеличении размера диафрагмы коэффициент температурной транспирации растёт от 0.5 до ~0.8.

Для двух сфер, соединённых трубой, были проведены расчёты значений коэффициента температурной транспирации в зависимости от характера распределения температур, а также от геометрических характеристик системы.

При уменьшении диаметра трубы, также как при уменьшении размера диафрагмы значение коэффициента стремится к 0.5. Однако для случая максимального значения диаметра трубы наблюдается увеличение величины коэффициента n до 0.65

С целью определения коэффициента температурной транспирации был проведен эксперимент на установке, состоящей из двух сфер диаметром 280 мм, соединённых трубопроводом диаметром 50 мм. При этом, нижняя сфера погружена в жидкий азот, а верхняя находится при $T_{\text{ос}}=303\text{K}$. После предварительной откачки на внутреннюю поверхность нижней сферы конденсируется криослой ксенона ($0.93\text{ м}^3\text{ Па/с}$ в течение 120 с). Температура криослоя определяется температурой жидкого азота, окружающего сферу. Внутри сферы устанавливается давление ксенона P_s , определяемое этой температурой. Давление в верхней сфере определяется с помощью ионизационных преобразователей ЛМ-3-2 и ПМИ-10-2. Температура нижней сферы изменяется за счет откачки паров жидкого азота.

Рис. 11а представляет зависимость величины n от давления в верхней сфере P_r . Из этого рисунка следует, что для $P_r < 1.2 \cdot 10^{-2}$ Па и, соответственно, числа $K_{\text{ЛП}} > 6.5$ значение коэффициента $n \approx 0.5$. Для $P_r > 1.2 \cdot 10^{-1}$ Па ($K_{\text{ЛП}} < 0.6$) коэффициент $n \rightarrow 0$. Это свидетельствует о том, что для $K_{\text{ЛП}} > 6.5$ соотношение давлений в двух сферах, соединённых цилиндрическим трубопроводом подчиняется закону Кнудсена, а для $K_{\text{ЛП}} < 0.6$ величины давлений в горячей и холодной сферах равны между собой.

В диапазоне $0.6 < K_{\text{ЛП}} < 6.5$ величина n находится в диапазоне $0 < n < 0.5$.

Аналогичный эксперимент проведен для случая двух сфер диаметром 280 мм, соединённых трубопроводом внутренним диаметром 100 мм. Нижняя сфера погружается в жидкий гелий, а верхняя находится при температуре окружающей среды. После предварительной откачки через трубку напуска в нижнюю сферу подается водород, конденсирующийся на ее внутренней поверхности. Давление в нижней сфере соответствует температуре насыщения. Давление в верхней сфере определяется с помощью ионизационных преобразователей. За счет откачки паров жидкого гелия, окружающего нижнюю сферу, можно изменить ее температуру.

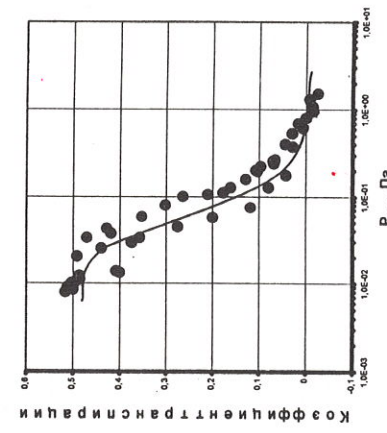
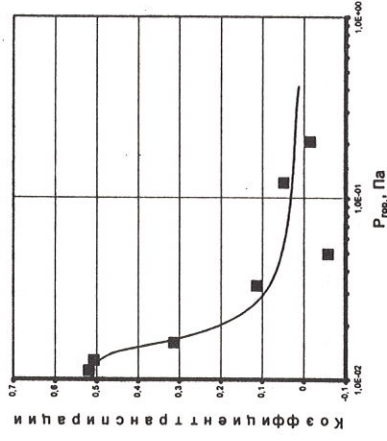


Рис. 11. Зависимость коэффициента температурной транспирации от значения давления в горячей сфере для ксенона (а) и водорода (б).

Как и для случая с ксеноном зависимость имеет две асимптоты: $n \approx 0$ при $P_{\text{гор}} > 3 \cdot 10^{-1}$ Па и $n \approx 0.5$ при $P_{\text{гор}} < 2 \cdot 10^{-2}$ Па (рис. 11б).

Этим значениям давления соответствуют числа $K_{пр}$, соответствующие различным режимам течения: $K_{пр} > 6.1$ — молекулярный режим, $0.4 < K_{пр} < 6.1$ — переходный режим, $K_{пр} < 0.4$ — вязкостный режим.

5.4. Зависимость проводимости и углового распределения частиц от закона взаимодействия частиц и шероховатости поверхности

Проанализировано влияние характера углового распределения скоростей частицы как на входе в трубопровод, так и внутри него, на проводимость. Критерием оценки проводимости был выбран коэффициент Клаузинга, определяющийся как отношение количества частиц, вылетевших через выходное сечение, к количеству частиц, влетевших во входное сечение трубопровода.

Направление вылета частицы с поверхности определяется двумя углами. Первый — угол θ между траекторией полета и нормалью к касательной плоскости зависит от типа распределения (табл. 3). Второй — угол ψ поворота направления вылета относительно поперечной вектору нормали оси обычно распределен равномерно в пределах $0 \leq \psi \leq 2\pi$.

Табл. 3. Формулы углов, определяющих направление вылета частицы с поверхности $0 \leq \theta \leq \pi$ и $0 \leq \psi \leq 2\pi$ (ξ и χ — случайные числа).

Тип распределения	Формула
Диффузное	$\theta = \arcsin \sqrt{\xi}$
Лестковое	$\theta = \arccos \sqrt{1 - \frac{(n+1)}{2} \xi}$
Равномерное	$\theta = \arccos \xi$
Выражение для угла $\psi = 2\pi\chi$ общее для всех типов распределений.	

Основное влияние на значение коэффициента Клаузинга для цилиндрического трубопровода и на характер индикатрисы траекторий частиц, вылетающих через выходное сечение, оказывает тип углового распределения на входе в трубопровод. Это влияние уменьшается с увеличением коэффициента прилипания на внутренней поверхности трубы.

Характер углового распределения при отражении от внутренней стенки трубопровода незначительно влияет на значение коэффициента Клаузинга. Отличия увеличиваются с ростом соотношения «длина/радиус».

Индикатрисы траекторий частиц, вылетающих через выходное сечение, в случае отличного от диффузного углового распределения на внутренней стенке трубы, имеют качественно схожий вид. Это подтверждает предположение об основополагающем влиянии характера углового распределения на входе и о незначительном, в сравнении с ним, влиянии типа углового распределения внутри трубы.

5.5. Анализ влияния, оказываемого структурой измерительной камеры на измерения быстроты действия с помощью метода Монте-Карло.

В данном разделе методом пробной частицы моделировались условия на входе в крионасос с учетом изменений, которые могут вносить компоненты измерительной системы. Также расчетным способом анализировалось распределение давления внутри испытательной камеры и влияние позиции датчика на результаты измерения. Кроме этого рассчитывались значения быстроты действия крионасоса с учетом компонентов измерительной системы и сравнивались с рассчитанными по идеальной схеме присоединения к бесконечно большому объему.

Результаты расчета диаграмм направлений частиц на входе в крионасос, формируемых одноколпаковой испытательной камерой показаны на рис. 12. Имеет место существенное качественное отличие характера данных диаграмм от структуры диффузного углового распределения частиц на входе в крионасос, которое принимается для условия присоединения насоса к бесконечно большому объему. Провал в центре диаграмм объясняется влиянием, оказываемым наличием трубки напуска. Это

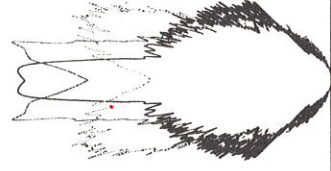


Рис. 12. Диаграммы направлений частиц, формируемые структурой измерительной системы одно-колпакового метода на входе в крионасос.

влияние усиливается с увеличением соотношения диаметра трубки напуска и цилиндрического колпака (d/D).

5.6. Влияние микрогеометрии сорбентов на сорбционные характеристики крионасосов. При помощи туннельного электронного микроскопа производства ЗАО «КПД» (г. Зеленоград), была определена микроструктура поверхности активированных углей Chemivon SCII и Chemivon GFF/30 и нераспыляемых геттеров типа 4t63 и 5t55.

С использованием метода пробной частицы построена зависимость интегрального коэффициента прилипания от локального коэффициента прилипания для конкретной геометрии сорбента.

6. АНАЛИЗ ПРОФИЛЕЙ КРИОСЛОЕВ.

Из рассмотренных результатов глав 1 и 3 следует, что статические (сорбционная емкость, значение теплоты сорбции) и динамические (коэффициент прилипания, быстрота действия) характеристики процесса криосорбции в значительной мере определяются толщиной криослоя. Для эффективной работы криовакуумного устройства необходимо обеспечить формирование криослоя одинаковой толщины по всей поверхности криопанели.

Форма поверхности криослоя зависит от следующих условий: геометрические параметры источника; геометрия криопанели; расположение криопанели относительно источника; режим истечения газа; продолжительность процесса истечения.

6.1. Определение профиля криослоя без учета предвременно сконденсированного слоя. В этой главе рассматриваются зависимости для определения профиля криослоя, образующегося на различных поверхностях. За основу взяты зависимости предложенные Макаровым А.М. и сотрудниками для случая распределения Гаусса.

Используя полученные формулы, описывающие профили криослоев для различных моделей источников массы, которые характеризуются следующими функциями распределения: Гаусса, косинусной, лепестковой, равномерной, можно изобразить профиль криослоя одиночного источника массы на криоповерхностях

сферической формы, цилиндрической формы и на бесконечной плоскости. Данные результаты можно распространить на группу источников с такими же функциями распределения, если применить принцип суперпозиции. Используя построенные номограммы, можно проводить анализ намораживаемого криослоя при изучении истечения газа из реального источника массы. В случае, если известны параметры функции распределения, экспериментальную кривую можно аппроксимировать одним из рассматриваемых законов распределения.

6.2. Анализ работы крионасосов термоядерных установок. В этой части работы рассматривалось применение к криосорбционным насосам термоядерных установок JET и ITER выведенных выше уравнений поверхности криослоев, замороженных источниками, распределение молекул которых описывается косинусной функцией распределения. Применение этого расчетного метода позволило выявить некоторые недостатки в данных конструкциях и проанализировать с точки зрения равномерности покрытия криослоем плоскости предложенные изменения в геометрии.

6.3. Определение профиля криослоя с учетом предвременно замороженного слоя.

Приведенные ранее аналитические зависимости для определения профиля криослоя не учитывают изменения формы поверхности из-за ранее сформированного слоя. В данном разделе сравниваются профили криослоя, построенные с использованием метода пробной частицы (с учетом ранее сформированного слоя), с профилями криослоя, полученными ранее по аналитическим зависимостям для косинусного, лепесткового, равномерного распределений и распределения Гаусса. Профили криослоя сравниваются для случая, когда источник массы находится над плоскостью конечных размеров. Для аналитических зависимостей используется точечный источник, а для метода пробной частицы используется источник (трубопровод) с конечными размерами.

Распределение Гаусса, в зависимости от значения среднего квадратичного отклонения σ , описывает профили криослоя, построенные для всех типов источника. Лепестковое распределение в зависимости от степени и описывает

профили криослоя, полученные для всех типов источника кроме диафрагмы. Равномерное распределение рассмотренные типы источников описывает плохо.

По мере увеличения толщины криослоя, уменьшается степень лепесткового распределения, описывающего данный профиль, и увеличивается величина среднего квадратичного отклонения распределения Гаусса.

При этом нельзя описать все этапы формирования профиля криослоя, для конкретного типа источника, каким-либо аналитическим распределением с постоянным параметром (n - для лепесткового распределения или σ - для распределения Гаусса).

7. УСТРОЙСТВА СЕЛЕКТИВНОЙ ОТКАЧКИ.

Под селективной откачкой, в данном случае, понимается раздельная откачка компонент газовой смеси на криопанелях, имеющих различную температуру.

В этой главе рассматриваются четыре устройства, работающие на различных температурных уровнях: водная ловушка при 115-130 К, азотный адсорбционный насос при 77 К, адсорбционный насос при 10-20 К, крионасос для откачки продуктов реакции установок термоядерного синтеза при T=4.2 К.

7.1. Ловушки для откачки паров воды. Создана водная ловушка, работающая на уровне температур T=115 - 130К. Поверхность, на которой конденсируются пары воды, представляет собой оптически проницаемую конфигурацию и обеспечивает оптимальное соотношение между коэффициентом захвата воды, который превышает 80%, и быстрой откачки азота, которая падает менее чем на 20%.

Компьютерная модель криоловушки позволяет предсказать ее рабочие параметры с приемлемой точностью.

7.2. Азотный криосорбционный насос. Создан и испытан криосорбционный азотный наливной насос с улучшенной системой регенерации для обеспечения безмасляной форвакуумной откачки. Результаты испытания насоса на лабораторном стенде и линии электролампового производства "Унитра" Сердобского электролампового завода позволяют считать возможным его использование в технологических процессах, требующих обеспечения безмасляной среды.

7.3. Крионасос для откачки водорода. Метод пробной частицы для компьютерных расчетов позволяет пользователю рассчитывать быстроту действия и распределение конденсата на криопанелях крионасоса с высокой точностью. Разработанная программа позволяет оценить влияние накопленного осадка на коэффициент прилипания для данной конфигурации насоса. Результаты расчетов показывают, что эта модель может применяться для оценки работы новых конструкций крионасоса и его характеристик.

Представлены количественные и качественные результаты, которые можно использовать для сравнения с другими конструкциями.

7.4. Макет блока откачки разрядной камеры. Анализ конструкций крионасосов для откачки продуктов реакции термоядерного синтеза и экспериментальных результатов по совместной откачке гелиево-водородных смесей приводит к выводу о том, что необходимым условием эффективного удаления продуктов реакции является разделение смеси на компоненты. На основе расчетов выбрана схема модуля для откачки.

Сконструирован и изготовлен крионасос для откачки гелиево-водородных смесей с использованием криозахвата гелия потоком газообразного аргона.

С помощью метода пробной частицы определена величина быстроты действия насоса по гелию в случае присоединения к испытательной камере S=4664 л/с.

ВЫВОДЫ

1. На основе проведенных экспериментальных исследований процесса криосорбции изотопов гелия на криослоях аргона и азота установлено:
 - высокая сорбционная емкость криослоев аргона и азота по гелию объясняется тем, что при малых заполнениях значение теплоты сорбции в 10-15 раз превышает величину теплоты конденсации ^4He ;
 - сорбционная емкость и величина теплоты сорбции ^4He на криослоях Ar и N₂ находится в сильной зависимости от толщины криослоя;

- изотермы сорбции ^4He на криослоях Ag и N_2 подчиняются уравнению Дубинина-Радушкевича. Полученные значения удельной поверхности в зависимости от толщины криослоя составляют $7 \rightarrow 186 \text{ м}^2/\text{г}$ для криослоя аргона и $4 \rightarrow 100 \text{ м}^2/\text{г}$ для азота;
- изостеры сорбции пересекаются в точке, названной полюсом сорбции. Значения полюсов сорбции для ^4He на криослоях аргона, азота, кислорода, а также на нержавеющей стали хорошо описываются прямой линией в координатах $\lg R, T^{-1}$;
- сорбционная емкость криослоя аргона по ^4He выше чем по ^3He ;
- 2. При криосорбции ^4He на криослоях аргона толщиной $3.75 \cdot 10^{22}$ и $6 \cdot 10^{21} \text{ м}^{-2}$ изостера сорбции претерпевает скачкообразное изменение вблизи температуры лямбда перехода ^4He в большом объеме. При криосорбции ^3He подобного изменения характера изостеры не происходит — изостера имеет прямолинейный вид в соответствии с уравнением Клапейрона-Клаузуса. Предложено объяснение разного поведения изостер сорбции ^4He и ^3He вблизи лямбда перехода ^4He ;
- 3. Экспериментально показано, что для случая длинного трубопровода коэффициент температурной транспирации $n=0.5$ при числе Кнудсена $\text{Kn} > 6.5$ для ксенона и $\text{Kn} > 6.1$ для водорода и $n = 0$ при $\text{Kn} < 0.6$ для ксенона и $\text{Kn} < 0.4$ для водорода. Полученные значения чисел Кнудсена можно интерпретировать как граничные для молекулярного ($n = 0.5$) и вязкостного ($n = 0$) режимов течения газа.
- 4. Из сравнения расчетных зависимостей величин теплот сорбции гелия на кристаллическом аргоне с результатами экспериментов сделан вывод об изменении структуры криослоя по мере увеличения его толщины.
- 5. С использованием метода статистических испытаний пробной частицы:
 - определены границы применения соотношения Кнудсена;
 - показано, что основное влияние на значение коэффициента Клаузинга для цилиндрического трубопровода и на характер индикатрисы траекторий частиц, вылетающих через выходное сечение, оказывает тип углового распределения на входе в трубопровод. Степень этого влияния уменьшается по мере увеличения значения коэффициента прилипания на внутренней поверхности трубопровода;

- при сравнении значений быстроты действия криососа, рассчитанных по схеме присоединения к большому объему и с учетом изменений, вносимых конструкцией измерительных камер, разница достигает 10%;
- определена зависимость интегрального коэффициента прилипания различных геттеров и активированных углей от локального коэффициента прилипания в месте взаимодействия частицы с реальной поверхностью, форма которой определена с использованием туннельного электронного микроскопа.
- 6. Выражения, полученные Макаровым А.М. и сотрудниками для профиля криослоя в случае Гауссовского закона распределения частиц из газового источника, распространены на случаи косинусного, лепесткового и равномерного законов распределения. Получены номограммы и сводные таблицы для определения криослоев, образуемых на криопанелях различной формы в результате конденсации частиц, вылетающих из источников в соответствии с Гауссовым, косинусным, лепестковым и равномерным законами распределения. Рассмотрен случай истечения газа из нескольких источников.
- 7. Проанализированы с точки зрения нанесения равномерного криослоя схемы, реализуемые в криозахватных насосах установок JET и ITER и сделаны рекомендации по повышению эффективности процесса криооткачки.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ ИЗЛОЖЕНО В СЛЕДУЮЩИХ

РАБОТАХ:

1. Крюков А.П., Нестеров С.Б. Экспериментальная установка для исследования процесса сорбции гелия на слоях десублимированных газов // Тр. МЭИ. Инженерно-физические проблемы термоядерной энергетики.- 1983.- Вып. 609.- С. 99-102.
2. Крюков А.П., Нестеров С.Б. Исследование сорбции гелия слоями десублимированного аргона // Межузовский тематический сборник. Научные труды: процессы сорбции гелия на слоях десублимированных газов // Тр. МЭИ. Инженерно-физические проблемы термоядерной энергетики.- 1984.- № 34.- С. 71-76.
3. Крюков А.П., Нестеров С.Б. Исследование процессов криосорбции гелия на слоях десублиматов // III Всесоюз. конф. по инженерным проблемам термоядерных реакторов: Докл.- М.: ЦНИИатоминформ, 1984.- Т.4.- С. 65-71.
4. Крюков А.П., Нестеров С.Б., Дубовицкий Ю.А. Оценка величины коэффициента прилипания молекул гелия на поверхности кристаллического сорбента // III

- Всесоюз. конф. по инженерным проблемам термоядерных реакторов: Докл.-М.: ЦНИИатоминформ, 1984.- Т.4.- С. 182-189.
5. Крюков А.П., Нестеров С.Б., Сидоров Е.В. Криосорбция гелия слоями десублиматов // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Термоядерный синтез.- 1986.- № 1.- С. 65-68.
 6. Крюков А.П., Сидоров Е.В., Нестеров С.Б. Экспериментально-расчетное изучение взаимодействия атомов гелия с поверхностью твердого азота при криосорбции и криозахвате // Взаимодействие атомных частиц с твердым телом: Докл. Восьмой Всесоюз. конф.- М., 1987.- С. 317-318.
 7. Коршева Е.Р., Крюков А.П., Нестеров С.Б., Никитенко А.И. Зависимость сорбционных свойств криослоев аргона и азота от условий формирования // Краткие сообщения по физике. Экспериментальная и теоретическая физика. ФИАН СССР.- 1987.- № 1.- С. 33-35. В переводе на английский яз. // Soviet Physics-Lebedev Institute Reports. Allerton Press, INC.- 1987.- № 1.- Р. 55-59.
 8. Гуревич Л.С., Саксаганский Г.Л., Серебренников Д.В., Бычкова А.Д., Ершова З.В., Кравченко И.М., Родионова Н.А., Нестеров С.Б. Особенности проектирования и основные характеристики криогенных насосов для откачки термоядерных реакторов // IV Всесоюзная конференция по инженерным проблемам термоядерных реакторов: Тез. Докл.- Л., 1988.- С. 260-261.
 9. Крюков А.П., Нестеров С.Б., Васюк Д.Г., Колесников Н.В. Определение термомолекулярного эффекта для протяженного трубопровода // Тр. МЭИ. Низкотемпературные процессы и анализ эффективности криогенных систем.- М.- 1988.- Вып. 161.- С. 24-32.
 10. Крюков А.П., Нестеров С.Б. Определение коэффициентов прилипания гелия на слоях десублиматов // Межвузовский сборник научных трудов. - М. МЭИ.- 1989.- № 176.- С. 37 - 48.
 11. Гуревич Л.С., Крюков А.П., Нестеров С.Б., Саксаганский Г.Л. Криосорбционные средства вакуумной откачки. Газовые криосорбенты // М.: ЦИТИХИМНЕФТЕМАШ.- 1991.- 46 С.
 12. Гуревич Л.С., Нестеров С.Б., Крюков А.П., Бычков А.И. Криосорбция гелия при температуре ниже 4.2 К // Plasma Devices and Operations.- 1991.- Vol.3.- Р. 97 - 102. На англ. яз.
 13. Нестеров С.Б., Крюков А.П. Откачка гелия и водорода на слоях сконденсированных газов // Vacuum science and physics.- 1992.- Vol. 1.- Р. 38 - 72. На англ. яз.
 14. Нестеров С.Б., Крюков А.П. Криосорбция гелия при переходе через λ -точку // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Термоядерный синтез.- 1994.- Вып. 1.- С. 134-137.
 15. Нестеров С.Б., Крюков А.П. Откачка гелия и водорода слоями сконденсированных газов // Вакуумная техника и технология.- 1994.- Т.4.- №4.- С. 3-23.
 16. Нестеров С.Б., Карлухин В.В. Откачка ^3He на слое сконденсированного при температуре 4.2 К аргона // Тр. Украинского вакуумного общества.- 1995.- Т. 1.- С. 37 - 40.

17. Нестеров С.Б., Бычков А.И., Степанов А.В. Азотный заливной криoadсорбционный насос // Тр. Украинского вакуумного общества.- 1995.- Т.1.- С. 149 - 152.
18. Нестеров С.Б., Саксаганский Г.Л. Основные физические и технические характеристики систем криооткачки продуктов реакции в ТОКАМАКАХ // 10-th Int. Conf. on Thin Films and 5-th European Vacuum Conf. Salamanca: Тез. докл.- 1996.- Р. 258. На англ. яз.
19. Качалин Г.В., Крюков А.П., Нестеров С.Б., Ворсобиин М.Е. Расчет разреженных газовых потоков в вакуумных системах при переходном и свободномолекулярном режимах течения // Proc. of 20-th Int. Symp. on Rarefied Gas Dynamics. China, Beijing.- 1997.- Р. 875-880. На англ. яз.
20. Нестеров С.Б., Крюков А.П. Особенности криосорбции гелия, обусловленные его сверхтекучестью // Vacuum.- 1997.- Vol. 48.- N. 7-9.- Р. 747-749. На англ. яз.
21. Бычков А.И., Качалин Г.В., Крюков А.П., Нестеров С.Б. Криосорбция изотопов гелия (^3He и ^4He) вблизи лямбда точки. Наземные результаты и перспективы. // Proc. of Joint X-th European and VI-th Russian Symposium on Physical sciences in microgravity. Moscow. 1997. p. 319 - 324. На англ. яз.
22. Кагря А, Боярский М., Нестеров С. Водная ловушка, охлаждаемая при помощи дроссельного цикла на смесевом хладагенте // Advances in Cryogenic Engineering / Edited by P.Kittel.- Plenum Press. New York.- 1998.- Vol 43B.- P. 1693-1700. На англ. яз.
23. Казаковский Н.Т., Койра Е.Л., Крюков А.П., Нестеров С.Б., Саксаганский Г.Л., Серебренников Д.В., Ширнин П.В., Веденев А.И. Характеристики экспериментального оборудования для исследования параметров криосорбционных насосов термоядерных реакторов // Plasma Devices and Operations.- 1998.- Vol. 6.- Р. 277-284. На англ. яз.
24. Нестеров С.Б., Васильев Ю.К. Исследование термомолекулярного эффекта // Вакуумная наука и техника: Докл. V науч.-техн. конф. с участием зарубежных специалистов. 1998 г.- Гурзуф, 1998.- С. 56-61.
25. Андросов А.В., Нестеров С.Б. Расчет проводимости ловушки с учетом замороженного конденсата // Вакуумная наука и техника: Докл. V науч.-техн. конф. с участием зарубежных специалистов. 1998 г.- Гурзуф.- С. 89-94.
26. Качалин Г.В., Крюков А.П., Нестеров С.Б. Адсорбция газообразного гелия вблизи T_λ при низких давлениях // Физика низких температур.- 1998.- Т. 24.- № 2.- С. 136 - 139.
27. Нестеров С., Васильев Ю., Крюков А. Влияние формы вакуумных камер на неравномерность распределения газа // Vacuum.- 1999.- Vol. 53.- Р. 193-196. На англ. яз.
28. Нестеров С.Б., Васильев Ю.К., Саксаганский Г.Л., Логинов Б.А., Протасенко В.В. Влияние микрогеометрии сорбентов на сорбционные характеристики крионасосов // Vacuum.- 1999.- Vol. 53.- Р. 263-267. На англ. яз.
29. Нестеров С.Б., Васильев Ю.К., Крюков А.П. Влияние формы вакуумного объема на неравномерность газового распределения // Вакуумная техника и технология.- 1999.- Т. 9.- №. 1.- С. 9-16.

30. Нестеров С.Б., Васильев Ю.К., Вагнер Л.С., Боярский М.Ю. Моделирование откочки водорода в крионасосах // J. Vac. Sci. and Technol. A.- 1999.- Vol. 17.- N4.- Jul-Aug.- P. 2099-2103. На англ. яз.
31. Нестеров С.Б., Андросов А.В. Формирование криослоя на центрах конденсации // Вакуумная наука и техника: Докл. VI науч.-техн. конф. с участием зарубежных специалистов.- Гурзуф, 1999.- С. 138-143.
32. Нестеров С.Б., Зилова О.С. Исследование взаимодействия гелия с поверхностью криокристаллов аргона // Вакуумная наука и техника: Докл. VI науч.-техн. конф. с участием зарубежных специалистов.- Гурзуф, 1999.- С.130-138.
33. Нестеров С.Б., Васильев Ю.К. Влияние углового распределения частиц на проводимость // Вакуумная наука и техника: Докл. VI науч.-техн. конф. с участием зарубежных специалистов.- Гурзуф, 1999.- С. 101-109.
34. Нестеров С.Б. Методы расчета сложных вакуумных систем // Вакуумная наука и техника: Докл. VI науч.-техн. конф. с участием зарубежных специалистов.- Гурзуф, 1999.- С.62-65.
35. Нестеров С.Б., Васильев Ю.К. Влияние испытательной камеры на измерения быстрых действия // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Вакуум, чистые материалы, сверхпроводники. Харьков.- 1999.- Вып. 1(9).- С. 33-37.
36. Амелистов Е.В., Алексеев Т.А., Калиновский А.В., Нестеров С.Б. Прецизионный эксперимент по исследованию криосорбции изотопов гелия в земных условиях и при пониженной гравитации // Тез. докл. Chernogolovka Workshop on Low Temperature Physics at Microgravity Environment GWS-99. Russia, 28July-3August 1999.- P.14. На англ. яз.
37. Нестеров С.Б., Васильев Ю.К., Лонгворс Р. Определение зависимости величины быстрых действия от конструкции испытательной камеры при помощи метода Монте-Карло // Book of abstracts of 46 American Vac. Symp. 1999. p. 158. На англ. яз.
38. Амелистов Е.В., Крюков А.П., Нестеров С.Б. Низкотемпературный эксперимент по изучению криосорбции изотопов гелия: ограничения, обусловленные гравитацией и перспективы исследований при невесомости // Тез. Докл. I Российской конференции по космическому материаловедению. Калуга, 1999.- с. 41.

Печ. л. 2,5

Тираж 100

Заказ 105

Типография МЭИ, Красноказарменная, 13.