

На правах рукописи

КАЧАЛИН Геннадий Викторович

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИЗУЧЕНИЕ КРИОСОРБЦИИ
ИЗОТОПОВ ГЕЛИЯ
ВБЛИЗИ ТЕМПЕРАТУРЫ λ -ТОЧКИ.

Специальность 01.04.09 - Физика низких температур

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук



Москва - 1998

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

Научный руководитель - доктор технических наук, профессор
КРЮКОВ А.П.

Научный консультант - кандидат технических наук, доцент
НЕСТЕРОВ С.Б.

Официальные оппоненты - доктор физико-математических наук,
профессор ГЛАЗКОВ А.А.

доктор технических наук,
профессор САКСАГАНСКИЙ Г.Л.

Ведущая организация - Российский научный центр
"Курчатовский институт".

Защита диссертации состоится «__» _____ 1998 года в 14 часов на заседании диссертационного совета К 053.16.02 в Московском энергетическом институте (техническом университете) по адресу: Москва, Красноказарменная ул., д. 17, корп. Т, комн. 206.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МЭИ.

Отзывы на автореферат просим направлять по адресу: 111250, Москва, Красноказарменная ул., д. 14, Ученый совет МЭИ.

Автореферат разослан «__» _____ 1998 года

Ученый секретарь
диссертационного совета
К 053.16.02 к. ф-м. н., доцент

МИКА В.И

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Исследования последних десятилетий в области вакуумной техники показали принципиальную возможность использования процесса криосорбции для откачки гелия и его изотопов и получения высокого и сверхвысокого безмасляного вакуума.

Слои десублимированных газов являются перспективным классом сорбентов и обладают, в сравнении с традиционными адсорбентами, рядом преимуществ с точки зрения их формирования и удаления, вопросов регенерации и разделения откаченных газовых смесей^{1,2}.

Известно, что в λ -точке происходит переход He-I в He-II, т.е. возникает явление сверхтекучести. Наличие пленки поглощаемого вещества на поверхности сорбента предполагает, что явление сверхтекучести может влиять на процесс криосорбции гелия при переходе через температуру λ -точки.

При понижении температуры до T_λ был обнаружен эффект резкого падения равновесного давления гелия над слоем сорбента (аргон, азот)^{3,4}. Диапазон изменения температуры составлял около 0.02К, а равновесное давление сорбата уменьшалось при этом более чем в 2.5 раза.

Дальнейшее изучение этого явления и выяснение условий его возникновения необходимо для возможного применения обнаруженного эффекта в криосорбционных насосах при откачке гелия и получения высокого и сверхвысокого вакуума.

Учитывая различия в свойствах ^4He и ^3He , а именно, в температурах возникновения сверхтекучести, изучение криосорбции ^3He в подобных условиях позволит сделать следующий шаг в понимании природы обнаруженного явления.

¹ Г. Л. Саксаганский, Ю.Н. Котельников, М.Д. Малев, Г.В. Смирницкая, В.Б. Юферов. Сверхвысокий вакуум в радиационно-физическом машиностроении. М.: Атомиздат, 1976, 288с.

² С.Б. Нестеров, А.П. Крюков. Откачка гелия и водорода слоями сконденсированных газов. Вакуумная наука и техника, т.4, N 4, 1994, с.3-23.

³ L.S. Gurevich, S.B. Nesterov, A.P. Kryukov, A.I. Bychkov. Helium Cryocorpton at Temperature Lower than 4.2 K. Plasma Devices Oper., 1991, vol. 1, p. 247-251.

⁴ С.Б. Нестеров, А.П. Крюков. Криосорбция гелия при переходе через λ -точку. ВАНТ, сер. Термоядерный синтез, 1994, с 134-137.

Цель работы. Экспериментальное изучение криосорбции ^4He и ^3He на слоях десублимированного аргона диапазоне температур от 2 до 4.2 К. Определение зависимости теплоты сорбции ^4He и ^3He от концентрации сорбата.

Изучение влияния толщины слоя адсорбента на сорбционные характеристики.

Определение условий возникновения скачка давления ^4He при переходе через температуру λ -точки.

Научная новизна. Обнаружен эффект резкого падения давления ^4He над поверхностью десублимированного аргона толщиной $6 \cdot 10^{21}$ молекул/м² в окрестности температуры λ -точки. Для ^3He , при данных условиях, указанного эффекта обнаружено не было.

Экспериментально установлено, что величина скачка равновесного давления ^4He уменьшается с увеличением концентрации адсорбата.

Установлено, что имеется область концентраций в которой условия сорбции ^3He и ^4He достаточно близки. С увеличением концентрации за пределы этой области, равновесное давление ^3He становится более чем на два порядка выше равновесного давления ^4He при таких же условиях.

Определены зависимости теплот сорбции ^4He и ^3He от концентрации.

Экспериментально подтверждены факты: уменьшения теплоты сорбции с увеличением концентрации сорбата и улучшения относительных сорбционных характеристик криослоя при уменьшении его толщины.

Опробована расчетная методика определения термомолекулярной поправки для случая двух объемов, находящихся при существенно различных температурах, соединенных неизотермическим по длине протяженным трубопроводом. В случае сфер, имеющих разную температуру и соединенных диафрагмой, определены геометрические размеры системы при которых справедливо соотношение Кнудсена.

Практическая ценность. Полученные результаты дополняют данные по криосорбции легких газов и могут быть использованы при разработке и проектировании высокоэффективных средств безмасляной откачки.

Апробация работы. Основные результаты работы доложены на третьей научно-технической конференции с участием зарубежных специалистов "Вакуумная наука и техника" в 1996 году, на десятом

европейском и шестом российском симпозиуме “Физические науки при микрогравитации” в 1997 году, на международном семинаре “Физика низких температур при микрогравитации” (CWS-97) в 1997 году, на четвертой научно-технической конференции с участием зарубежных специалистов “Вакуумная наука и техника” в 1997 году.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав и выводов и имеет объем 116 стр., включая 68 рисунков и 32 таблицы. Список литературы состоит из 101 наименования.

Автор выносит на защиту :

1. Экспериментально полученные изостеры сорбции для ^4He и ^3He при различных концентрациях на слоях аргона указанной толщины.
2. Экспериментально полученные данные о возникновении скачка давления ^4He при переходе через λ -точку. Эффект уменьшения величины скачка давления с увеличением концентрации сорбата.
3. Экспериментально установленный факт отсутствия скачка давления при переходе через λ -точку для сорбции ^3He .
4. Зависимости теплот сорбции ^4He и ^3He от концентрации для изученных толщин слоев сорбента.
5. Аномальное поведение теплоты сорбции ^4He при переходе через λ -точку.
6. Величины монослойных концентраций ^4He и ^3He , полученные в результате расчетов с применением различных уравнений изотерм сорбции.
7. Результаты расчетов термомолекулярной поправки.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В первой главе проведен обзор литературных данных по криосорбции легких газов на газовых конденсатах и свойствам поверхностных пленок гелия, который позволил сделать следующие выводы: для всех газовых адсорбентов имеется диапазон концентраций сорбата, в котором давление лежит в высоковакуумной области ; структура слоя адсорбента определяет его сорбционные характеристики и зависит от рода вещества, температуры и скорости

формирования, толщины слоя и других факторов; свойства адсорбированных пленок гелия определяются их температурой, толщиной (поверхностной плотностью), родом и структурой адсорбента, степенью насыщения; с уменьшением температуры плотность адсорбированной пленки гелия увеличивается и возникает возможность межслоевого перехода с сильным изменением ее свойств, сверхтекучий переход в пленках гелия может быть полностью подавлен, но прогрессивные модификации свойств, как коллективного состояния могут сохраняться и мало изучены.

Вместе с тем анализ показал, что криосорбция гелия (^4He) при переходе через λ -точку и эффект возникновения скачка давления являются мало изученными. Имеется только две работы, посвященные этой теме. Для ^3He такие данные вообще отсутствуют. Недостаточно также экспериментальных данных по зависимостям теплоты сорбции гелия от концентрации; требует дальнейшего изучения и вопрос о влиянии толщины слоя адсорбента на сорбционные характеристики.

На основе рассмотрения состояния проблемы ставятся следующие задачи для исследования:

1. Получение изостер сорбции ^4He и ^3He на слоях десублимированного аргона в диапазоне температур $2 \div 4.2$ К.
2. Проведение сравнительного анализа результатов экспериментов по криосорбции ^4He и ^3He .
3. Определение зависимости теплот сорбции ^4He и ^3He от концентрации сорбата.
4. Изучение влияния толщины слоя адсорбента на сорбционные характеристики.
5. Проведение обработки результатов экспериментов с использованием различных уравнений изотерм сорбции и сопоставление полученных результатов.

Во второй главе дано описание экспериментальной установки и методики проведения экспериментов.

Экспериментальная установка (рис.1) позволяет проводить исследования криосорбции в широком диапазоне изменения условий протекания процесса и особенностей формирования слоев адсорбентов и состоит из четырех отдельных подсистем: криостата с экспериментальным модулем, системы предварительного вакуумирования, поста для откачки паров гелия и системы

натекания. Установка также включает в себя систему контрольно-измерительной аппаратуры для регистрации параметров процессов.

Основным элементом установки является экспериментальный модуль (10) представляющий собой медную сферу диаметром 270 мм с толщиной стенки 1 мм. Внутренняя поверхность сферы ($F=0.229\text{м}^2$), на которой происходит десублимация газа-сорбента и последующая адсорбция, отполирована по восьмому классу чистоты. При проведении экспериментов сфера полностью находится погруженной в жидкий гелий. Сфера соединяется с системой предварительной откачки и измерительным модулем тонкостенной трубой из

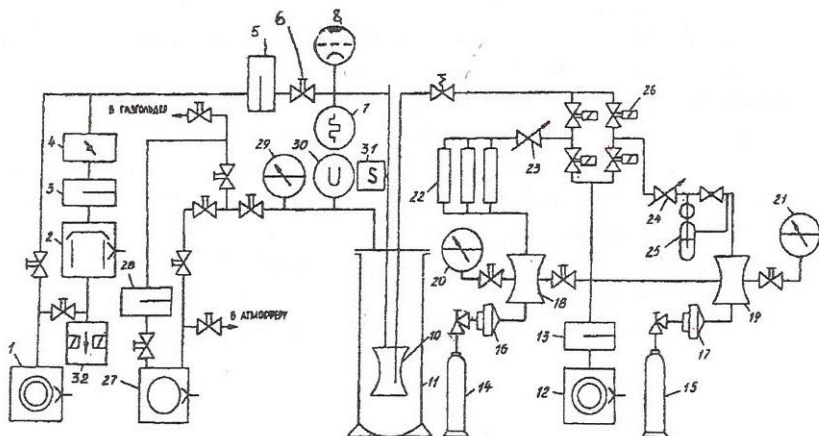


Рис.1. Схема экспериментальной установки.

1,12, 27 - вакуумные механические насосы; 2 - диффузионный насос; 3,5,13 - азотные ловушки; 4 - электромагнитный затвор; 6 - прогреваемый вентиль; 7 - термопарный вакуумметр; 8 - вакуумметр ионизационный; 10 - экспериментальный модуль; 11- гелиевый криостат; 14,15 - баллоны с газами; 16,17 - регуляторы давления; 18,19- уравнильные объемы; 20,21,29 - мембранные манометры; 22- ротаметры; 23,24 - напечатели; 25- масляная бюретка; 26 -система электромагнитных клапанов; 30 -ртутный манометр; 31- масс-спектрометр; 32 -гелиевый течеискатель.

нержавеющей стали. Давление в системе измеряется ионизационными датчиками ЛМ-3-2 (8). Изменение температуры сферы происходит за счет откачки паров гелия из ванны криостата. Сорбент и сорбат поступают в сферу по трубке напуска диаметром 10 мм, расположенной по оси присоединительного трубопровода. На конце трубки имеется распределительное устройство, обеспечивающее равномерное нанесение сорбента.

Эксперименты проводились следующим образом: экспериментальный модуль откачивался при помощи системы предварительного вакуумирования, затем производилось захлаживание криостата и модуля жидким азотом; после заливки гелия и установления фонового давления на внутренней поверхности медной сферы при помощи системы натекания формировался слой сорбента, в качестве сорбента применялся аргон с содержанием примесей менее 0.01 %; напуск сорбата в систему осуществлялся после некоторой временной выдержки, в качестве сорбата использовались ^4He , с содержанием примесей менее 0.01%, и ^3He , с содержанием примесей менее 0.1%; далее производилось понижение температуры сферы и измерялось давление в модуле. Таким образом результаты экспериментов представляют собой изостеры сорбции, определяющие зависимость равновесного давления сорбата от температуры при постоянной концентрации:

$$P=F(1/T)_C. \quad (1)$$

Концентрация C определялась как отношение числа частиц сорбата к числу частиц сорбента.

В третьей главе рассмотрен вопрос определения термомолекулярной поправки для нахождения давления в области протекания процессов сорбции, условно “холодной”, по измерениям в “горячей” области, удаленной с помощью протяженного трубопровода с переменной по длине температурой. Известное соотношение Кнудсена для двух объемов, находящихся при различных температурах и соединенных открытой диафрагмой, в данном случае неприменимо.

Термомолекулярную поправку можно определять непосредственно из эксперимента, но это связано с определенными трудностями, поэтому в работе проведен расчет поправки для данной

экспериментальной установки методом Монте-Карло пробной частицы⁵.

На этапе тестирования метода был разработан пакет программ и решен ряд задач по расчету величины термомолекулярной поправки для различных конструкций: сфер, соединенных диафрагмой, при различных значениях диаметра диафрагмы; сфер, соединенных трубопроводом и др. Расчетные значения поправок сравнивались с соотношением Кнудсена. Решение тестовых задач показало сильную зависимость значения поправки от геометрических размеров системы. Так например, для сфер диаметра D , соединенных диафрагмой с диаметром d , соотношение Кнудсена справедливо при $D/d > 5$.

На основании проведенных расчетов для настоящего экспериментального модуля было получено соотношение:

$$P_r/P_x = (T_r/T_x)^{0.52}, \quad (2)$$

где P_r , P_x и T_r , T_x - давления и температуры в "горячей" и "холодной" областях соответственно.

Полученные результаты использовались для интерпретации результатов экспериментов.

В четвертой главе представлены результаты экспериментальных исследований криосорбции ^4He и ^3He слоями десублимированного аргона. Толщина слоев аргона приводится в условных единицах - частицах на м^2 геометрической поверхности медной сферы.

Особенностью проводимых экспериментов является то, что в процессе одной серии экспериментов удается получить серию изостер сорбции до λ -точки и одну или две изостеры при переходе через λ -точку. Поэтому при изучении сорбции ^4He на слое аргона толщиной $6 \cdot 10^{21}$ частиц/ м^2 , с целью получить воспроизводимые результаты и получить экспериментальные данные о зависимости величины скачка давления от концентрации, было проведено две независимые серии экспериментов.

⁵ Г.Л. Саксаганский. Молекулярные потоки в сложных вакуумных структурах. М., Атомиздат, 1980, 272с.

В этих экспериментах получены серии изостер сорбции до температуры λ -точки в диапазоне концентраций от 4 до 9 % (рис.2). Анализ этих изостер сорбции позволил заключить, что формируемые слои аргона обладают практически одинаковыми сорбционными характеристиками. При переходе через λ -точку были получены изостеры сорбции с концентрациями: 9.5%, 9.9% и 10.2%. Все изостеры имеют отчетливый скачок давления в окрестности λ -точки (рис.2 а,б). Величина скачка давления уменьшается с увеличением концентрации (таб.1). Возникновение скачка давления при переходе через λ -точку связывается с возможностью проникновения гелия в ранее недоступные поры сорбента.

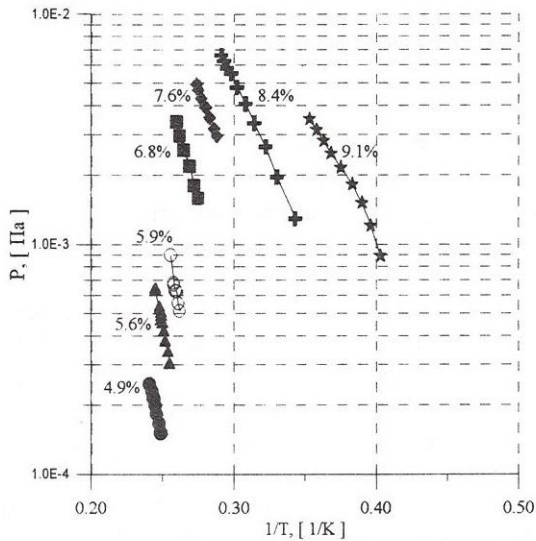


Рис. 2. Изостеры сорбции ^4He на слое Ag толщиной $6 \cdot 10^{21}$ частиц/ m^2 (вторая серия экспериментов) при различных концентрациях до λ -точки.

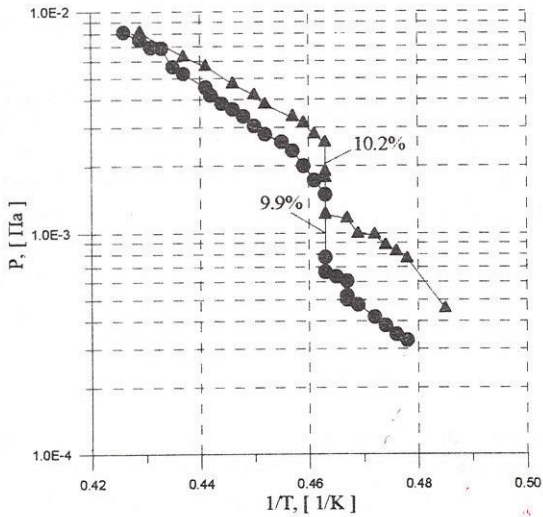


Рис. 3 (а). Изостеры сорбции ^4He на слое Ag толщиной $6 \cdot 10^{21}$ частиц/ m^2 (первая серия экспериментов) при переходе через λ -точку.

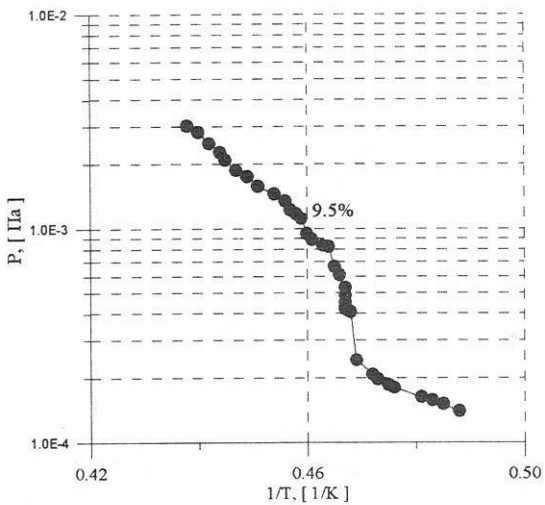


Рис. 3 (б). Изостера сорбции ^4He на слое Ag толщиной $6 \cdot 10^{21}$ частиц/ m^2 (вторая серия экспериментов) при переходе через λ -точку.

Таблица 1

Величины скачка давления при переходе через λ -точку в зависимости от концентрации.

Концентрация С, [%]	9.5	9.9	10.2
Начальное давление P_1 , [Па]	$8.3 \cdot 10^{-4}$	$1.5 \cdot 10^{-3}$	$2.5 \cdot 10^{-3}$
Конечное давление P_2 , [Па]	$2.4 \cdot 10^{-4}$	$6.6 \cdot 10^{-4}$	$1.2 \cdot 10^{-3}$
Температура $T_{\lambda-T}$, [К]	0.02	0.01	0.01
Скачок давления, P_1/P_2	3.4	2.3	2.1

Для выяснения природы возникновения скачка давления были проведены эксперименты по криосорбции ^3He на слое аргона толщиной $6 \cdot 10^{21}$ частиц/ м^2 . В этих экспериментах были получены изостеры сорбции с концентрациями 4%, 4.7% и 4.8% (рис.4). Изостера сорбции с концентрацией 4.8% получена при переходе через λ -точку.

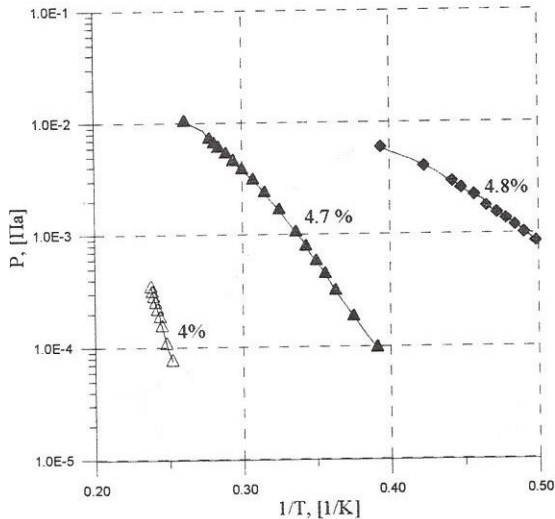


Рис. 4. Изостеры сорбции ^3He на слое Ag толщиной $6 \cdot 10^{21}$ частиц/ м^2 при различных концентрациях.

Из сравнения результатов для ^4He и ^3He (рис.5) видно, что в окрестности λ -точки в поведении изостеры ^3He изменений не наблюдается. Поэтому можно сделать вывод, что обнаруженное явление обусловлено свойствами ^4He , а точнее свойствами пары аргон-гелий-4.

Сравнение других результатов для ^4He и ^3He показало, что имеется область концентраций в которой условия адсорбции для обоих газов можно назвать близкими. В данном случае это имеет место при концентрациях около 4%. Однако увеличение

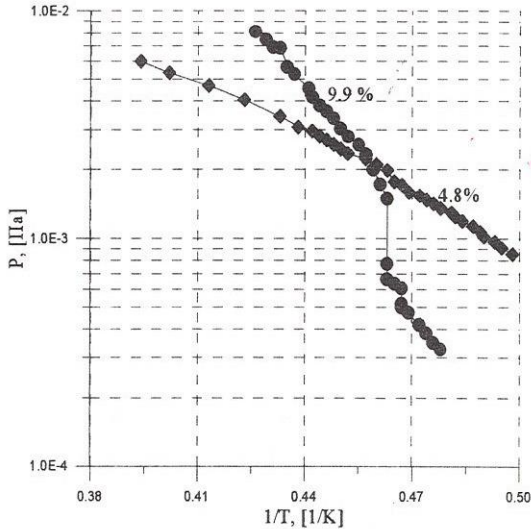


Рис. 5. Изостеры сорбции ^4He и ^3He при переходе через λ -точку
● - ^4He ◆ - ^3He

концентрации ^3He до 4.8% приводит к резкому увеличению давления в системе. Давление ^4He , при таких же условиях, более чем на два порядка меньше.

Чтобы изучить влияние толщины слоя адсорбента на сорбционные характеристики были проведены эксперименты по

сорбции ^4He на слое аргона толщиной $1.2 \cdot 10^{22}$ частиц/ м^2 , т.е. в два раза большей толщины. Полученные результаты позволили сделать вывод, что слой меньшей толщины обладает лучшими сорбционными характеристиками, чем слой большей толщины. Этот факт подтверждает результаты прежних исследований и связан с тем, что при одинаковых условиях формирования слой меньшей толщины, благодаря своей мелкозернистости имеют большее количество активных участков для адсорбции.

Расчет теплоты сорбции проводился с использованием уравнения Клапейрона-Клаузиуса для системы газ - твердое тело. Зависимости теплоты сорбции от концентрации для всех проведенных экспериментов представлены на рис.7.

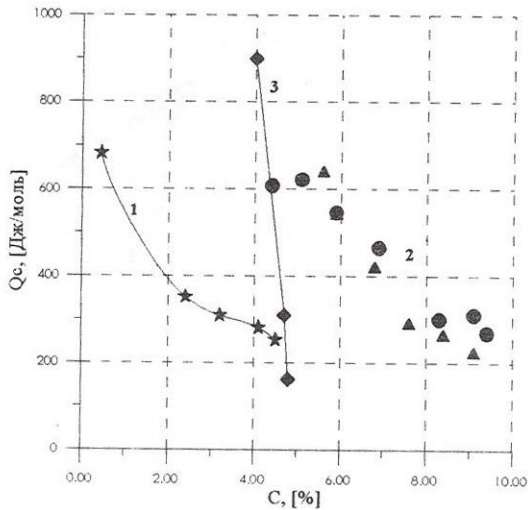


Рис. 7. Теплоты сорбции ^4He и ^3He в зависимости от концентрации

Толщина слоя:

^4He : ★ - $1.2 \cdot 10^{22}$ частиц/ м^2 ; ▲ и ● - $6 \cdot 10^{21}$ частиц/ м^2 ,

^3He : ◆ - $6 \cdot 10^{21}$ частиц/ м^2

Для изостер сорбции ^4He , имеющих скачок давления обнаруживается anomальное поведение теплоты сорбции, сопровождающееся ее резким ростом в окрестности λ -точки

(рис. 8), при дальнейшем понижении температуры теплота сорбции становится практически такой же, как и до скачка давления. Для ^3He , как видно из графика, в этом диапазоне температур теплота сорбции не изменяется.

На основе экспериментальных данных по изостерам сорбции можно построить изотермы адсорбции. На рис.9 представлены, полученные перестроением, изотермы адсорбции для ^4He . Здесь же приведены изотермы адсорбции ^4He аргоновым криоосадком, полученные в других работах.

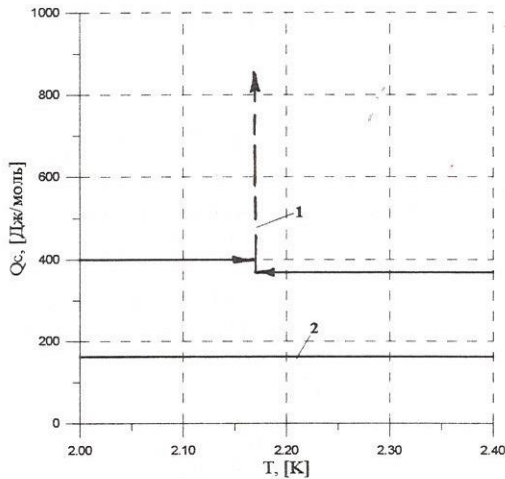


Рис. 8. Теплоты сорбции ^4He и ^3He в зависимости от температуры.
1 - ^4He (9.9%); 2 - ^3He (4.8%)

полученные в других работах. Эти графики еще раз подтверждают вывод о том, что слои меньшей толщины обладают лучшими относительными сорбционными характеристиками.

Чтобы иметь возможность сравнивать полученные результаты в работе произведены расчеты величины емкости монослоя a_0 . Под емкостью монослоя подразумевается некоторая модельная величина, определяющая концентрацию сорбата необходимую для полного покрытия поверхности сорбента. Величину емкости монослоя используют также для расчетов удельной поверхности сорбента. Для расчета этой величины применялись следующие уравнения изотерм

адсорбции: Дубинина-Радужкевича-Каганера (ДРК), Брунауэра-Эмметта-Теллера (БЭТ) и Ленгмюра. Известно что лучше всего

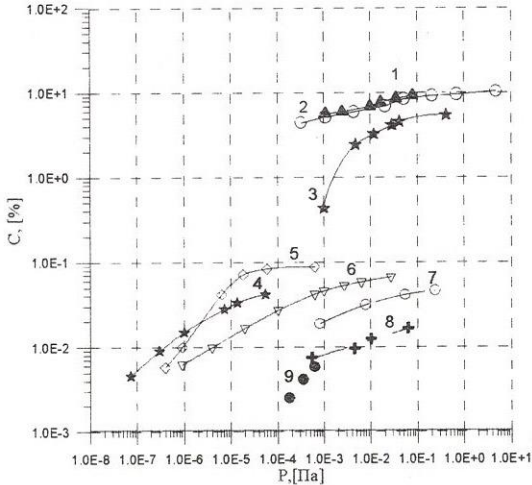


Рис. 9. Изотермы адсорбции ^4He аргоновым криосадком при 4.2 К.

1,2 - $6 \cdot 10^{21} \text{ м}^{-2}$, 3 - $1.2 \cdot 10^{22} \text{ м}^{-2}$,
4,5 - 3.67, 73.4 мкм⁶, 6 - $0.5 \div 1$ мкм⁷,
7,8,9 - 1.45, 4.34, 7.23 мкм⁸,

адсорбцию на газовых конденсатах описывает уравнение ДРК, построенное на основе потенциальной теории Поляни. Уравнение БЭТ широко используется при описании адсорбции ненасыщенных пленок гелия. Уравнение Ленгмюра использовалось для сравнения полученных результатов.

⁶ М.П. Ларин. Сверхвысоковакуумный гелиевый заливной криогенный насос повышенной производительности. ЖТФ, т.58, вып.4, 1986, с. 744-753.

⁷ В.Б. Юферов, П.М. Кобзев. Исследование криосорбционной откачки гелия, водорода и дейтерия слоями сконденсированных газов. ЖТФ, 1969, т.39, вып.9, с. 1683.

⁸ А.П. Крюков, С.Б. Нестеров, Е.В. Сидоров. Криосорбция гелия слоями десублиматов. ВАНТ, сер. Термоядерный синтез, вып.1, 1986, с.65-68.

Результаты расчетов величины емкости монослоя приведены в таблице 2. Из рассмотрения которой следует, что все применяемые уравнения для условий настоящих экспериментов дают достаточно близкие результаты.

Таблица 2.

Величины емкости монослоя, определенные из различных уравнений.

Адсорбат	толщина $A_r, \text{м}^{-2}$	БЭТ $a_0, \%$	Ленгмюра $a_0, \%$	ДРК $a_0, \%$
^4He	$1.2 \cdot 10^{22}$	4.8	4.5	4.8
$^4\text{He}^*$	$6 \cdot 10^{21}$	8.2	8.1	9.6
$^4\text{He}^{**}$	$6 \cdot 10^{21}$	8.2	8.5	8.6
^3He	$6 \cdot 10^{21}$	4.9	4.8	4.8

*- первая серия экспериментов; **- вторая серия экспериментов

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Выполнены экспериментальные исследования криосорбции ^4He и ^3He на слоях десублимированного аргона, характеризующимися условной толщиной $6 \cdot 10^{21}$ частиц/м² и $1.2 \cdot 10^{22}$ частиц/м². Получены изостеры сорбции в диапазоне температур 2÷4.2К.
2. Получены новые данные о возникновении скачка давления ^4He в окрестности температуры λ -точки над криослоем аргона толщиной $6 \cdot 10^{21}$ частиц/м².
3. Замечена тенденция уменьшения величины скачка давления ^4He при переходе через λ -точку при увеличении концентрации сорбата.
4. Отмечено, что в окрестности λ -точки, теплота сорбции ^4He на слое сорбента толщиной $6 \cdot 10^{21}$ частиц/м² резко возрастает при концентрациях сорбата 9.5%, 9.9% и 10.2%.
5. Аномальное поведение ^4He в окрестности T_λ имеет место для концентраций сорбата больших, чем емкость условного монослоя, определенная из анализа экспериментальных данных с применением различных уравнений изотерм сорбции.

6. Впервые получены экспериментальные данные по криосорбции ^3He на слоях аргона при низких давлениях в диапазоне концентраций 4÷5%. При условиях сорбции идентичных с ^4He , скачка давления для ^3He в окрестности T_λ не обнаружено.
7. Показано, что существует область концентраций в которой условия сорбции ^4He и ^3He можно назвать одинаковыми. При увеличении концентрации за пределы этой области ^3He адсорбируется значительно хуже чем ^4He .
8. Экспериментально подтверждено уменьшение теплоты сорбции гелия при увеличении концентрации сорбата и улучшение относительных сорбционных характеристик при уменьшении толщины слоя сорбента.
9. Методом Монте-Карло проведен расчет термомолекулярной поправки и получена формула для пересчета давлений для экспериментальной установки, использовавшейся в работе. В случае сфер, соединенных диафрагмой, определено предельное значение отношения диаметра сферы к диаметру диафрагмы при котором справедливо соотношение Кнудсена.
10. Полученные результаты дополняют данные по криосорбции легких газов и могут быть использованы на этапе проектирования криосорбционных насосов.

**Основное содержание диссертации отражено в
следующих работах:**

1. Г.В. Качалин, А.П. Крюков, С.Б. Нестеров, Храмов О.Н. Расчет криосорбционного насоса со сложной геометрией криопанели// Первая научно-техническая конференция с участием зарубежных специалистов "Вакуумная наука и техника": Тез. докл. - Гурзуф, 1994. - С.58.
2. Г.В. Качалин, А.П. Крюков, С.Б. Нестеров. Расчет и сопоставление характеристик холодных ловушек// Третья научно-техническая конференция с участием зарубежных специалистов "Вакуумная наука и техника": Тез. докл. - Гурзуф, 1996. - С.55.
3. А.И. Бычков, Г.В. Качалин, А.П. Крюков, С.Б. Нестеров, А.В. Степанов. Криосорбция гелия в районе лямбда-точки// Третья научно-техническая конференция с участием зарубежных специалистов "Вакуумная наука и техника": Тез. докл. - Гурзуф, 1996. - С.56.

4. Г.В. Качалин, А.П. Крюков, С.Б. Нестеров, М.Е. Ворсобин. Расчет течений разреженного газа в вакуумных системах для переходного и свободномолекулярного режимов// Динамика разреженного газа, под ред. Чинг Шена: Изд. пекинского университета. - Пекин, Китай, 1997. - С.605-611. (на англ. яз.)
5. Г.В. Качалин, А.П. Крюков, Р. Лонгсворт, С.Б. Нестеров. Оптимизация холодных ловушек для откачки смесей, содержащих пары воды// 10-ая международная конференция по тонким пленкам; 5-ая европейская вакуумная конференция: Тез. докл. - Саламанка, Испания, 1996. - С.169. (на англ. яз.)
6. А.И. Бычков, Г.В. Качалин, А.П. Крюков, С.Б. Нестеров. Криосорбция изотопов гелия (^3He и ^4He) при переходе через лямбда-точку. Наземные результаты и перспективы исследований при микрогравитации// Труды объединенного 10-го европейского и VI-го российского симпозиума "Физические науки при микрогравитации". - Москва, 1997. - С.319-324. (на англ. яз.)
7. Г.В. Качалин, А.П. Крюков, С.Б. Нестеров. Адсорбция газообразного гелия вблизи T_λ при низких давлениях// Международный семинар по физике низких температур в условиях микрогравитации: Тез. докл. - Черногловка, Россия, 1997. - С.15. (на англ. яз.)
8. А.И. Бычков, Г.В. Качалин, А.П. Крюков, С.Б. Нестеров. Сорбция ^3He и ^4He криослоями аргона// Четвертая научно-техническая конференция с участием зарубежных специалистов "Вакуумная наука и техника": Тез. докл. - Гурзуф, 1997. - С.126-128.
9. Г.В. Качалин, А.П. Крюков, С.Б. Нестеров. Адсорбция газообразного гелия при низких давлениях// Физика Низких Температур, 1998. - Т.24. - № 2. - С. 136-139.

Подписано к печати

Печ. л. 1, 25

Тираж 100

Заказ 175

Типография МЭИ, Красноказарменная, 13