

Чл. совета Крюкову А.П.

На правах рукописи



Андронов Александр Васильевич

ИССЛЕДОВАНИЕ СЕЛЕКТИВНОЙ ОТКАЧКИ ГАЗОВЫХ СМЕСЕЙ
В НИЗКОТЕМПЕРАТУРНЫХ ВЫСОКОВАКУУМНЫХ ЛОВУШКАХ.

Специальность 05.04.03 – Машины и аппараты, процессы холодильной
и криогенной техники, систем кондиционирования и жизнеобеспечения

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва-2002

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

Научный руководитель – доктор технических наук, профессор Нестеров С. Б.

Официальные оппоненты – доктор физико-математических наук, профессор Семашко Н. Н.

– доктор технических наук, профессор Филин Н. В.

Ведущая организация – ФГУП «Научно-исследовательский институт электрофизической аппаратуры им. Д.В. Ефремова»

Защита состоится «25» декабря 2002 г. в 13⁰⁰ часов в Малом актовом зале на заседании диссертационного совета Д 212.157.04 при Московском энергетическом институте (техническом университете) по адресу: 111250, Москва, Красноказарменная ул., 14

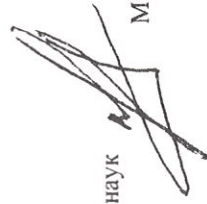
С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МЭИ (ТУ).

Отзывы на автореферат, заверенные печатью учреждения, просим направлять по адресу: 111250, Москва, Красноказарменная ул., 14, Ученый совет МЭИ (ТУ).

Автореферат разослан «22» ноября 2002 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
кандидат физико-математических наук
доцент

Мика В. И.



ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Устройства селективной откачки газовых смесей широко применяются во многих областях современной науки и техники, где используется вакуумное оборудование. Основное назначение устройств селективной откачки, таких как ловушки – это защита различных технологических и испытательных камер от паров веществ, мешающих проведению технологических процессов. Поэтому от такого относительно простого устройства как ловушка могут зависеть технологические процессы, в результате которых получают изделия, стоимость которых превышает во много раз стоимость самой ловушки. Некоторые типы ловушек также служат своего рода насосами и помогают удалять из вакуумной системы такие компоненты смесей как пары воды.

В настоящее время наибольшим спросом пользуются ловушки конденсационного типа, которые охлаждаются в основном водой, жидким азотом или холодильными машинами. Существуют различные подходы для анализа устройств вакуумной техники, в том числе и конденсационных ловушек. Однако расчет таких характеристик ловушек как проводимость и защитная способность проводится, как правило, отдельно, без учета влияния насоса и испытательной камеры, между которыми располагается ловушка. Хотя известно, что неучет влияния испытательной камеры в отдельных случаях может приводить к изменению результатов до 20%.

Совершенствование конденсационных высоковакуумных ловушек осуществляется по двум основным направлениям – изменение температуры рабочих поверхностей ловушек и изменение геометрии рабочих поверхностей. Второй путь является наиболее простым и дешевым способом повышения эффективности. С учетом развития современных вычислительных средств комплексный анализ основных характеристик высоковакуумных ловушек можно проводить с помощью метода статистических испытаний пробной частицы и его приложений.

Также при анализе характеристик высоковакуумных криоловушек необходимо учитывать то, что на рабочих поверхностях постоянно образуется слой криосадка (криослоя). Рост криослоя приводит к уменьшению проводимости ловушки и уменьшению коэффициента прилипания, что в свою очередь ведет к тому, что ловушка прекращает выполнять свои защитные и селективные функции. Поэтому для получения исчерпывающих данных об эффективности работы криоловушки необходимо знание формы и структуры образующегося

на ее поверхностях криослоя. Данная проблема также актуальна при эксплуатации крионасосов, где от толщины криослоя зависит эффективность откачки, при напылении различных функциональных и декоративных покрытий, качество которых также зависит от толщины и формы нанесенного слоя, при молекулярной эпитаксии.

Немаловажную роль при анализе сложных вакуумных систем играет такая характеристика, как шероховатость поверхности. Величина шероховатости поверхности может существенно влиять на такие характеристики вакуумной системы, как проводимость, интегральный коэффициент прилипания, угловое распределение частиц при отражении от стенок системы.

Наличие перечисленных проблем, требующих решения, обуславливает актуальность проведения комплексного анализа устройств селективной откачки и процессов, связанных с их эксплуатацией.

Цель работы. С учетом вышеперечисленных проблем, характеризующих актуальность работы, можно определить ее цели:

1. Проведение анализа известных средств селективной откачки газовых смесей, таких как высоковакуумные ловушки. Создание алгоритма для проектирования устройств селективной откачки;
2. Создание и дополнение уже существующих подходов для анализа сложных вакуумных систем с целью формирования единой, универсальной, способной к дальнейшему расширению методики, позволяющей выполнять тепловой и вакуумный расчет, определять индикатрисы рассеивания;
3. Проведение с помощью созданной методики и экспериментального стенда комплексного исследования конденсационных ловушек для диффузионных насосов;
4. Применение разработанной методики для определения формы криослоев с учетом ранее сформированного слоя и сравнение с известными результатами;
5. Определение проводимости и коэффициента захвата криоловушек для турбомолекулярных насосов с учетом влияния криослоя. Предложения по повышению эффективности ловушек данного типа;
6. Исследование влияния шероховатости поверхности на интегральные характеристики вакуумных систем;
7. Построение модели формирования криослоев с использованием методов фрактальной геометрии.

Научная новизна. Разработан алгоритм на базе метода статистических испытаний пробной частицы, позволяющий моделировать структуру криослоев и проводить анализ вакуумных систем с учетом и без учета этих криослоев. Алгоритм позволяет проводить как вакуумный, так и тепловой расчет устройств селективной откачки с учетом изменения геометрии системы и коэффициентов прилипания.

Проведен анализ влияния формы криослоя на характеристики ловушек типа *Aqua Trap*, применяемых для нужд микроэлектроники, и даны рекомендации по повышению эффективности таких ловушек.

Проведен комплексный анализ и улучшение на его основе характеристик высоковакуумной ловушки типа ЛП, используемой с диффузионными насосами типа *DFR*. Выполнено экспериментальное и расчетное исследование влияния водоохлаждаемой ловушки на откачные характеристики диффузионного насоса *НВДМ-400*.

Выполнено исследование по влиянию шероховатой поверхности на угловое распределение частиц при отражении от стенки и на проводимость цилиндрического трубопровода.

Практическая ценность. Полученные в ходе работы результаты с использованием разработанного программного комплекса нашли применение при решении ряда актуальных задач при проектировании и повышении эффективности криоловушек *Aqua Trap (IGC-APD Strogenics Inc.)* для нужд микроэлектроники и высоковакуумных ловушек типа ЛП (ОАО «Вакууммаш») для диффузионных насосов типа *DFR (Leybold Vacuum GmbH)*.

Результаты по моделированию роста криослоя с учетом его толщины имеют первостепенное значение в таких областях промышленности как: создание декоративных и функциональных покрытий, в области микро- и нанозлектроники, нанотехнологии.

Результаты анализа влияния шероховатости на величину проводимости трубопровода и закон отражения частиц от реальной поверхности рекомендованы для использования в расчетах сложных вакуумных систем.

Полученные в работе результаты используются в учебном процессе в Московском энергетическом институте (техническом университете) в курсах «Криовакуумная техника», «Расчет сложных вакуумных систем», «Основы нанотехнологии».

Автор защищает

– Методику расчета формы криослоя с учетом предвдительно намороженного слоя;

- Компьютерные модели устройств селективной откачки газовых смесей;
- Номограммы для определения формы криослоя для различных типов источника газа, полученные путем сравнения расчетных и известных аналитических результатов;
- Влияние криослоя на рабочие характеристики высоковакуумных криоловушек;
- Влияние шероховатости поверхности стенок цилиндрического трубопровода на угловое распределение частиц и величину проводимости;
- Компьютерную модель роста фрактальных структур применительно к криослоям.

Достоверность полученных результатов. Достоверность полученных результатов расчетов подтверждается проведенным тестированием разработанных алгоритмов на большом количестве широко известных задач и соответствующими теоретическими и экспериментальными данными, полученными в результате независимых исследований.

Апробация работы. Основные положения и результаты работы доложены на V, VI, VII, VIII, IX научно-технических конференциях «Вакуумная наука и техника» (Гурзуф, 1998, 1999 г.г. и Судак 2000, 2001, 2002 г.г.), VI, VII международных студенческих школах-семинарах «Новые информационные технологии» (Судак, 1998, 1999 г.г.), VI, VII, VIII международных научно-технических конференциях студентов и аспирантов «Радиоэлектроника, электротехника и энергетика» (Москва, 2000, 2001, 2002 г.г.), 10-й международной научно-технической конференции «Состояние и перспективы развития вакуумной техники» (Казань, 2001 г.), XXVII международной научно-технической конференции «Гагаринские чтения» (Москва, 2001 г.), 48-ом международном вакуумном симпозиуме Американского вакуумного общества (Сан-Франциско, 2001 г.), V международном симпозиуме «Вакуумные технологии и оборудование» (Харьков, 2002 г.), 20-м заседании научно-технического семинара «Электровacuумная техника и технология» (Москва, 2002), 7-й международной конференции «Инженерные проблемы термоядерных реакторов» (Санкт-Петербург, 2002 г.).

Некоторые части работы выполнялись по заказу группы конструкторов ОАО «Вакууммаш», *IGC-APD Cryogenics Inc.*

Публикации. По теме диссертации имеется 17 печатных работ, в том числе 1 учебное пособие, 6 статей и материалов в трудах конференций, 10 тезисов докладов.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, шести глав и заключения и имеет объем 173 стр., включая 111 рисунков и 20 таблиц. Библиография включает 103 наименования.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность выбранной темы диссертационной работы, определены цели и поставлены задачи. Показана научная новизна и практическая значимость работы. Сформулированы основные научные положения, выносимые на защиту.

В первой главе проведен обзор имеющихся методов и средств селективной откачки газовых смесей применительно к вакуумной технике. Рассмотрен принцип работы таких устройств селективной откачки как вакуумные ловушки. Ловушки предназначаются как для защиты насосов от летучих продуктов, выделяющихся в ходе технологического процесса, так и для защиты откачиваемого объема от рабочего вещества насоса, а также для возвращения рабочего вещества обратно в насос. Улавливание вещества из газовой смеси может быть осуществлено путем конденсации, сорбции или химического связывания. Поэтому рабочие поверхности ловушки должны либо охлаждаться, либо покрываться слоем сорбента или химически активного вещества.

Проведен краткий обзор адсорбционных и каталитических ловушек и подробный обзор низкотемпературных вакуумных ловушек, выпускаемых отечественными и зарубежными фирмами-производителями.

Водоохлаждаемые ловушки служат для возвращения обратного потока масла в насос при его длительной непрерывной работе с вымораживаемыми ловушками, а также для проведения технологического процесса при высокой скорости проникновения масла в откачиваемый объем. Водяные ловушки не обязательно должны быть оптически плотными по отношению к любому направлению. Достаточно, чтобы они экранировали только самый главный источник обратного потока.

Достаточно высокой защитной способностью обладают ловушки, охлаждаемые до температуры $-20...-70^{\circ}\text{C}$. Такую температуру можно получить как с помощью холодильных машин, так и с помощью термоэлектрических охлаждающих аппаратов. Например, при температуре -30°C упругость насыщенных паров масла VM-1 составляет $1\cdot 10^{-12}$ Торр и скорость испарения его в вакуум равна

$2 \cdot 10^{-7}$ мг · ч · см⁻². Для большинства практических приложений откачных систем на основе паромасляных диффузионных насосов такой вылет масла может считаться допустимым. Помимо работы с диффузионными насосами ловушки, охлаждаемые холодильными машинами, применяются с турбомолекулярными насосами при откачке газовых смесей содержащих пары воды. Также такие ловушки могут служить своего рода крионасосами для откачки некоторых углеводородов.

Наибольшей защитной способностью обладают ловушки, охлаждаемые до температур 120 К и ниже. В отечественной промышленности для охлаждения ловушек до таких температур чаще всего применяют азотные ловушки. В свою очередь азотные ловушки обладают рядом следующих недостатков: необходимо наличие жидкого азота, нельзя плавно регулировать температуру рабочих поверхностей ловушки до температур ниже азотных.

Проводимость и защитная способность являются основополагающими величинами при проектировании и модификации высоковакуумных ловушек. Проводимость ловушки зависит от ее геометрии. Но если геометрия адсорбционной ловушки во время работы является неизменной, то геометрия низкотемпературных ловушек, за счет конденсации, десублимации захватываемых веществ, постоянно изменяется. Это, естественно, может приводить к постоянному изменению проводимости и защитной способности ловушки.

Также существенное влияние на характеристики ловушки, в частности, и любой вакуумной системы в целом, оказывает микрогеометрия поверхности (структура поверхности, с которой непосредственно взаимодействует молекула). Поэтому при анализе устройств селективной откачки газовых смесей для получения полноценной информации на макроуровне (проводимость, коэффициент захвата), в том числе и низкотемпературных ловушек, необходимо учитывать процессы, происходящие в них на микроуровне (учет шероховатости поверхности, форма и структура криослоя, локальный коэффициент прилипания, распределение частиц в объеме и на поверхности).

Вторая глава посвящена краткому обзору известных методов расчета устройств селективной откачки с учетом намерзания на рабочие поверхности криослоев. Рассмотрены известные аналитические зависимости для определения формы криослоя. Данные аналитические зависимости характеризуются следующими функциями

распределения: Гаусса, косинусной, лепестковой и равномерной. Приведено описание алгоритма применения метода статистических испытаний пробной частицы Монте-Карло для определения формы намерзающего криослоя.

Аналитические зависимости, в отличие от метода пробной частицы Монте-Карло, не учитывают постоянно изменяющуюся форму поверхности криослоя. Было проведено сравнение профилей криослоев, полученных по аналитическим зависимостям с профилями, полученными с помощью метода пробной частицы Монте-Карло, для случая намерзания газа на плоской поверхности.

Исходя из проведенного выше сравнения результатов, были построены итоговые номограммы. Номограммы позволяют определить степень лепесткового распределения и или среднее квадратичное отклонение σ распределения Гаусса, которые наиболее близко описывают профиль криослоя, построенный по методу Монте-Карло, для известной массы газа, вышедшего из источника.

Показано, что профили криослоя, построенные по различным моделям, хорошо согласуются друг с другом, но для учета ранее сформированного слоя необходимо вносить изменения в параметры аналитических зависимостей.

В третьей главе методом пробной частицы Монте-Карло проводится моделирование формы криослоя, образующегося на охлаждаемых пластинах серийно выпускаемой низкотемпературной ловушки *AquaTrap-200* и производится расчет проводимости и коэффициента захвата ловушки с учетом сконденсированного газа. Полученные расчетные данные сравниваются с результатами, полученными в эксперименте.

Ловушка *AquaTrap-200* предназначена для конденсации паров воды при откачке смеси газов из рабочего объема. При эксплуатации она находится между откачиваемым объемом и турбомолекулярным насосом. Охлаждаемая часть ловушки (рис. 1) представляет набор плоскопараллельных пластин, расположенных внутри кольца. Пластины с кольцом охлаждаются криогенной газовой машиной до температуры 105-120 К. Таким образом, пары воды, проходя через ловушку, конденсируются на охлаждаемых пластинах, а неконденсируемые газы (азот, аргон и др.) откачиваются турбомолекулярным насосом.

Профили криослоя, формирующегося на охлаждаемых пластинах ловушки *AquaTrap-200*, которые были построены с помощью разработанной методики, показаны на рис. 2.

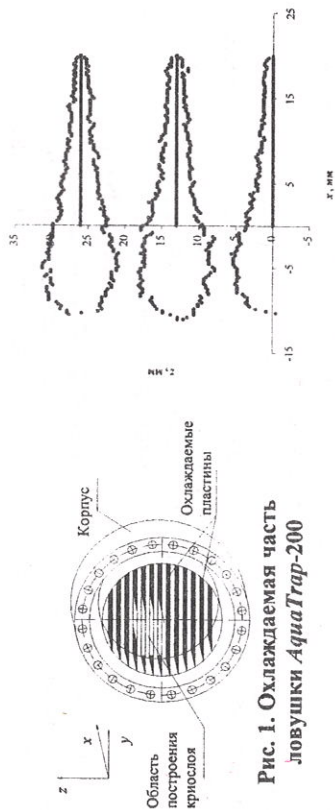


Рис. 1. Охлаждаемая часть ловушки AquaTrap-200

Рис. 2. Профили криослоя

Для экспериментального исследования формы криослоя была спроектирована установка (рис. 3), позволяющая моделировать работу ловушки AquaTrap-200. Визуальное наблюдение за ростом криослоя осуществляется через смотровое окно 1. Напуск влажного воздуха производится через воздушный коллектор 2. Ловушка AquaTrap-200 обозначена на рисунке цифрой 3. С помощью вакуумметра 4 и термометра 5 проводится измерение давления внутри камеры и температуры охлаждаемых поверхностей ловушки соответственно. Расход воздуха измеряется с помощью расходомера 6, а его насыщение водяным паром происходит в резервуаре 7.

В результате проведенного исследования были получены данные о форме криослоя, образующегося на холодных поверхностях ловушки AquaTrap-200 при различных давлениях. На рис. 4 показан профиль криослоя на холодных поверхностях ловушки AquaTrap-200 для случая, когда давление внутри ловушки равно 50 Па, а время намораживания равно 95 часам.

Форма криослоя является качественной характеристикой ловушки, по которой нельзя однозначно судить об эффективности ловушки. Поэтому в следующей части работы проведен расчет таких характеристик ловушки, как проводимость и коэффициент захвата с учетом намерзающего слоя.

На основе полученных результатов оригинальная конструкция ловушки AquaTrap-200 была модифицирована.

Расчеты характеристик новой конструкции показали, что она позволит продлить время работы ловушки до ее полного забивания на 20%. В таблице 1 приведено сравнение характеристик для новой и оригинальной конструкций ловушки, где τ — это безразмерное время

соответствующее определенному количеству условных частиц, влетевших в ловушку.

Таблица 1. Зависимость проводимости и коэффициента захвата ловушки AT-200 от времени τ

τ	Старое расположение пластин		Новое расположение пластин		ΔU	$(\Delta K_{\text{нов}}/K_{\text{стар}}) \times 100\%$	$(\Delta U/U) \times 100\%$
	Коэффициент захвата	Проводимость	Коэффициент захвата	Проводимость			
0	0,594	0,516	0,537	0,552	0,036	-10	7
0,167	0,664	0,415	0,613	0,464	0,049	-8	12
0,333	0,717	0,317	0,667	0,387	0,060	-7	22
0,500	0,751	0,253	0,718	0,331	0,078	-5	31
0,667	0,789	0,198	0,753	0,280	0,082	-5	41
0,833	0,824	0,144	0,781	0,245	0,101	-5	70
1,000	0,844	0,119	0,810	0,204	0,034	-4	72
1,167	-	-	0,845	0,163	-	-	-
1,333	-	-	0,866	0,141	-	-	-

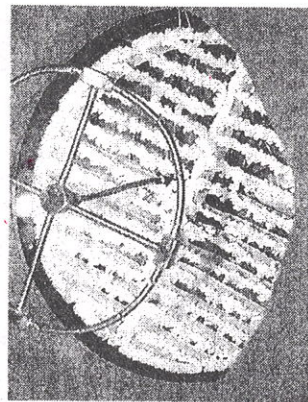


Рис. 4. Профиль криослоя при давлении внутри ловушки 50 Па

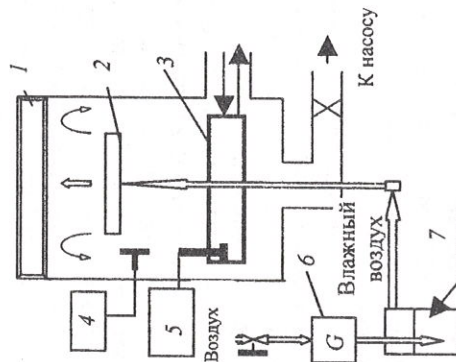


Рис. 3. Схема экспериментальной установки

Моделирование профилей криослоя показало, что на начальном этапе работы ловушки пар конденсируется на поверхности охлаждаемых пластин относительно равномерно. Далее за счет того, что увеличивается толщина конденсирующей поверхности, основная

часть паров воды начинает оседать на передней кромке охлаждаемых пластин. Профиль криослоя принимает каплеобразную форму, что в дальнейшем приводит к забиванию криослоем проходного сечения ловушки. Для более эффективной работы ловушки необходимо обеспечить как можно более равномерное распределение криослоя по поверхности пластин.

Четвертая глава работы посвящена моделированию и анализу структуры криослоя на микроуровне с использованием элементов фрактальной геометрии. В области криовакуумной техники фрактальный рост имеет большое значение при изучении процесса десублимации парогазовой фазы на твердых телах (криопанели насосов и ловушек, криогенные трубопроводы). Образующийся криослой может существенно изменять режим работы этих установок, нарушая их расчетное функционирование.

Моделирование роста фрактальных структур проводится с использованием ранее разработанной методики, которая применялась для исследования формы криослоев. Для образования фрактальной структуры типа криослоев необходимо наличие центра, вокруг которого образуется структура (в нашем случае центр конденсации). В главах 2 и 3 считается, что в образовании криослоя участвуют ранее сконденсированные частицы и вся криоперверхность. В данной главе считается, что частицы могут прилипать либо в определенных местах криоперверхности (пространства) либо сами на себя. Были рассмотрены случаи, когда центр конденсации находится в центре объема, и когда центр конденсации находится на одной из граней поверхности.

Поочередно с каждой грани куба, по прямолинейной траектории, в объем запускается частица. Если частица прилипает к центру конденсации, то она считается прилипшей и производится запуск следующей частицы. Если частица пересекает пространство куба, не соприкоснувшись с центром конденсации или прилипшими ранее частицами, то прекращается отслеживание траектории ее движения и производится запуск следующей частицы. Таким образом, вокруг центра конденсации начинает формироваться некая структура.

На рис. 5 показан вид полученной структуры для случая, когда коэффициент прилипания является постоянной величиной и равен 1. На рис. 6 изображена структура для случая с переменным коэффициентом прилипания, коэффициент прилипания линейно изменяется от 1 в точке с координатами (5;5) до 0 в точках с координатами (0;0), (0;10), (10;0), (10;10).

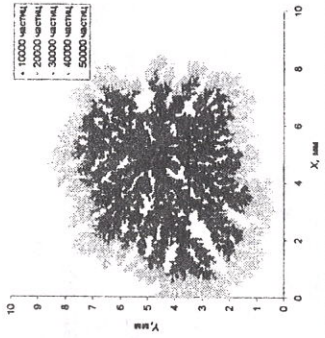


Рис. 5. Фрактальная структура при коэффициенте прилипания равном 1

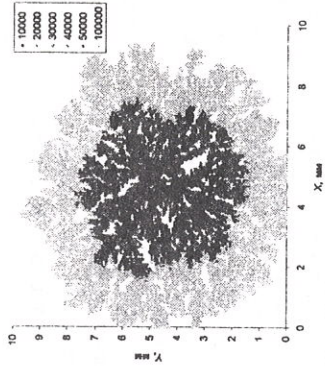


Рис. 6. Фрактальная структура при переменном коэффициенте прилипания

В общем случае для определения фрактальной размерности требуется произвести следующее построение: фрактальное множество покрывается элементарными d -мерными блоками с длиной ребра $l \rightarrow 0$ и производится подсчет их числа $N(l)$. Фрактальная размерность определяется затем из соотношения типа $N(l) \propto l^{-D_f}$.

Описанная методика была реализована в качестве программы определения фрактальной размерности. С помощью данной программы была определена фрактальная размерность полученных ранее фрактальных структур.

Так, фрактальная размерность D_f структуры, полученной при оседании частиц вокруг центра конденсации с постоянным и равным 1 коэффициентом прилипания (рис. 5), равна $1,760 \pm 0,017$. Фрактальная размерность для случая с переменным коэффициентом прилипания (рис. 6) равна $1,86 \pm 0,03$.

Моделирование роста фрактальных структур показало, что влияние коэффициента прилипания на структуру фрактального кластера является незначительным. Основное влияние величина коэффициента прилипания оказывает на время роста фрактального кластера. Определение фрактальной размерности также показало, что влияние на нее коэффициента прилипания является незначительным.

В пятой главе проводится расчет высоковакуумных ловушек для диффузионных насосов с целью повышения их эффективности.

Основным способом повышения эффективности охлаждаемых высоковакуумных ловушек является понижение температуры ее рабочих поверхностей. В зависимости от рабочей жидкости диффузионного насоса незначительное понижение температуры рабочих поверхностей ловушки может уменьшить обратный поток

рабочей жидкости на несколько порядков. Другой способ уменьшения обратного потока — это изменение геометрии рабочих поверхностей ловушки. Данный способ совершенствования ловушек является более простым и дешевым по сравнению с уменьшением температуры. Однако изменение геометрии рабочих поверхностей ловушки приводит, в свою очередь, к изменению проводимости и возникает необходимость поиска компромиссного варианта.

Моделирование геометрии элементов проточной части высоковакуумной ловушки осуществлялось по критериям максимально возможной проводимости при заданных значениях величины обратного потока паров рабочей жидкости.

В качестве базовой была принята шевронная ловушка ЛП-800, изображенная на рис. 7.



Рис. 7. Схема ловушки ЛП-800

Был проведен расчет различных вариантов рабочих поверхностей ловушки ЛП-800 при неизменных габаритных и присоединительных размерах. В таблицах 2 и 3 сравниваются характеристики наиболее удачных, из рассчитанных конструкций измененных ловушек, с характеристиками базовой конструкции.

Таблица 2. Проводимость ловушки и быстрота действия насоса с ловушкой

Конструкция ловушки	Кoeffициент Клаузинга		U, л/с	U, %	S ₀ , л/с	S ₀ , %
	U, л/с	S ₀ , л/с				
Базовая	0,17	9900	100	7170	100	100
Измененная 1	0,072	4200	42	3620	50	57
Измененная 2	0,084	4880	49	4100	57	126
Измененная 3	0,238	13800	140	9000	126	114
Измененная 4	0,205	11900	120	8160	114	

Таким образом видно, что путем незначительного изменения их геометрии можно существенно повысить эффективность ловушки.

Был проведен эксперимент по определению проводимости ловушки. Суть эксперимента заключалась в нахождении быстроты действия насоса с ловушкой S_{н+л} и без нее S_н. Затем из основного уравнения вакуумной техники определяли экспериментальное значение проводимости ловушки U_л. Было проведено испытание ловушки Ду-400, предназначенной для защиты испытательной камеры от паров

масла диффузионного насоса. На рис. 8 и 9 показаны фотографии испытательного стенда и ловушки Ду-400.

Таблица 3. Значения обратного потока паров рабочей жидкости Q, мг/(ч·см²)

Конструкция ловушки	Кoeffициент прилипания		Q, мг/(ч·см ²)
	0,9	0,8	
Базовая	1,1·10 ⁻⁶	2,4·10 ⁻⁶	4,3·10 ⁻⁶
	100	100	7,5·10 ⁻⁶
Измененная 1	2,8·10 ⁻⁷	6,8·10 ⁻⁷	1,4·10 ⁻⁶
	25	28	2,1·10 ⁻⁶
Измененная 2	2,7·10 ⁻⁷	7,7·10 ⁻⁷	1,5·10 ⁻⁶
	25	32	35
Измененная 3	1,7·10 ⁻⁶	3,0·10 ⁻⁶	5,0·10 ⁻⁶
	155	125	116
Измененная 4	6,0·10 ⁻⁷	1,3·10 ⁻⁶	2,6·10 ⁻⁶
	55	54	60

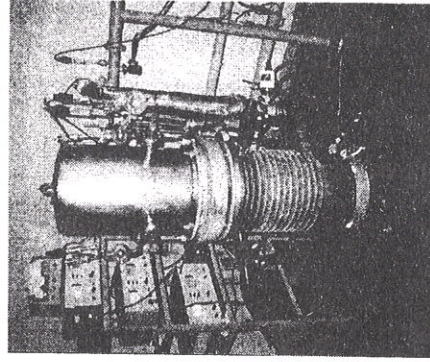


Рис. 8. Испытательный стенд

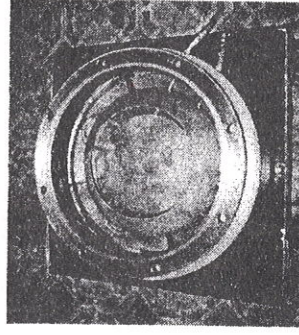


Рис. 9. Ловушка Ду-400

Проведенный эксперимент по определению проводимости ловушки Ду-400 показал, что расчетное значение проводимости (4500 л/с) отличается от опытного (6200 л/с) не более чем на 38%.

В шестой главе проводится исследование влияния шероховатости поверхности на такие характеристики как угловое распределение частиц и коэффициент Клаузинга.

Расчет влияния шероховатости стенки на угловое распределение частиц проводился с помощью разработанного программного комплекса, основанного на методе пробной частицы Монте-Карло.

Из полученных индикатрис рассеивания видно, что шероховатость моделируемой поверхности может существенно изменить закон отражения частиц. По мере роста отношения h/b (глубина/ширина) увеличивается отличие углового распределения частиц от диффузного.

Следующим этапом данной части работы было определение влияния шероховатости на проводимость цилиндрического трубопровода. В качестве расчетной модели был взят цилиндрический трубопровод, внутренняя поверхность которого представляет собой совокупность конических поверхностей (глубина канавки $-h$, шаг между вершинами канавок $-b$). L — длина, R — радиус трубопровода.

В таблице 4 приведены полученные значения коэффициентов проводимости трубопровода (для различных величин L/R , h/b и коэффициента прилипания) и их отклонение от случая трубопровода ($h/b=0,01$).

Таблица 4. Коэффициенты проводимости шероховатого трубопровода

L/R	1			2			4		
	0	0,5	0,9	0	0,5	0,9	0	0,5	0,9
0,01	0,667	0,478	0,397	0,510	0,247	0,181	0,353	0,084	0,059
	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
0,1	0,669	0,48	0,397	0,508	0,249	0,183	0,354	0,084	0,059
	0,30%	0,42%	0,00%	0,39%	0,81%	1,10%	0,28%	0,00%	0,00%
0,5	0,665	0,463	0,394	0,502	0,237	0,181	0,340	0,077	0,059
	0,30%	3,14%	0,76%	1,57%	4,05%	0,00%	3,74%	8,33%	0,00%
1	0,647	0,442	0,389	0,478	0,214	0,174	0,310	0,066	0,057
	3,00%	7,53%	2,02%	6,27%	13,36%	3,87%	12,07%	21,43%	3,39%
2	0,622	0,407	0,386	0,455	0,191	0,172	0,303	0,061	0,057
	6,75%	14,85%	2,77%	10,78%	22,67%	4,97%	14,16%	27,38%	3,39%
3	0,623	0,401	0,382	0,455	0,186	0,173	0,300	0,062	0,057
	6,60%	16,11%	3,78%	10,78%	24,70%	4,42%	15,01%	26,19%	3,39%
4	0,622	0,401	0,384	0,456	0,187	0,174	0,295	0,060	0,056
	6,75%	16,11%	3,27%	10,59%	24,29%	3,87%	16,43%	28,57%	5,08%

Из полученных результатов видно, что шероховатость поверхности может оказывать существенное влияние на такие характеристики, как угловое распределение частиц при отражении от стенки и проводимость элементов вакуумной системы.

Расчет показал, что для принятой модели шероховатой поверхности угловое распределение при отражении частиц значительно отличается от диффузного. Чем больше глубина моделируемой канавки, тем сильнее отличие распределения частиц от диффузного, но при достижении определенного значения h/b дальнейшее изменение углового распределения не происходит.

Реальную поверхность описать сложно. В качестве модели использовалась поверхность, представляющая собой набор пересекающихся конических поверхностей (рис. 10).

Шаг b между вершинами канавок, которые являются линиями пересечения конических поверхностей, составляет 1 мм. Таким образом, при изменении глубины канавки h моделировалось изменение шероховатости поверхности. Расчет выполнялся для $D = 70$ мм. Считается, что отражение частиц от поверхности канавки происходит по диффузному закону. На рис. 11 показаны полученные индикатрисы рассеивания частиц при отражении от моделируемой шероховатой поверхности для различных отношений h/b и различных коэффициентов прилипания.

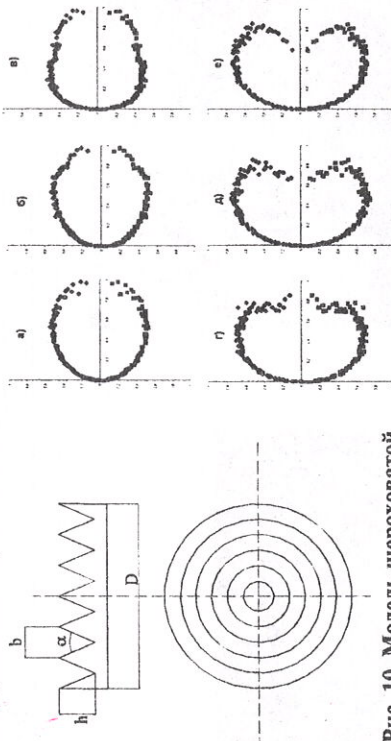


Рис. 10. Модель шероховатой поверхности

Рис. 11. Индикатрисы рассеивания частиц от шероховатой поверхности с коэффициентом прилипания равным 0: а) $h/b=0$; б) $h/b=0,3$; в) $h/b=1$; г) $h/b=3,0$; д) $h/b=6,0$; е) $h/b=14,0$

Изменение закона углового отражения при взаимодействии с поверхностью оказывает заметное влияние на проводимость цилиндрического трубопровода и вакуумной системы в целом. Так, проводимость шероховатого трубопровода с $L/R=4$ и локальным коэффициентом прилипания равным 0, на 16% ниже проводимости такого же гладкого трубопровода. Для такого же трубопровода, но с коэффициентом прилипания 0,5 эта разница может достигать 30%. С другой стороны, шероховатость практически не влияет на угловое распределение частиц на выходе из цилиндрического трубопровода.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

Разработана методика расчета характеристик устройств селективной откачки с учетом влияния образующегося криослоя. Полученный алгоритм позволяет моделировать, помимо криослоев, формирование различных покрытий в области высокого вакуума. Данная методика является дополнением к разработанному ранее программному комплексу расчета сложных вакуумных систем. На основе полученных результатов были сделаны следующие выводы:

1. Неучет ранее сформированного слоя в аналитических зависимостях может приводить к существенному отклонению от реального профиля криослоя. С помощью сравнения профилей криослоев, построенных по аналитическим зависимостям, со слоями, полученными по разработанной методике, можно вносить поправочные коэффициенты в аналитические зависимости для учета ранее сформированного слоя.
2. Созданная компьютерная модель серийно выпускаемой низкотемпературной ловушки *AquaTrap-200* позволила провести расчет характеристик данной ловушки с учетом формирующегося на ее охлаждаемых поверхностях криослоя. Сравнение криослоев, полученных расчетным и экспериментальным путем, показало их качественное сходство. На основе проведенного анализа конструкции ловушки *AquaTrap-200* даны рекомендации по улучшению ее характеристик, связанные с изменением геометрии рабочих поверхностей.
3. Расчет ловушки Ду-400 показал, что в данном случае наличие испытательной камеры не влияет на значение ее проводимости. Проведенный эксперимент по определению проводимости ловушки Ду-400 показал, что расчетное значение проводимости (4500 л/с) отличается от опытного (6200 л/с) не более чем на 38%.

4. На основе расчета характеристик ловушек типа ЛП, выпускаемых ОАО «Вакууммаш» предложен ряд альтернативных конструкций, позволяющих понижать поток масла, проходящего через ловушку, в 1,5-2 раза.
5. Показано, что для принятой модели шероховатой поверхности угловое распределение при отражении частиц может существенно отличаться от диффузного. Изменение закона углового отражения при взаимодействии с поверхностью оказывает заметное влияние на проводимость цилиндрического трубопровода и вакуумной системы в целом.
6. Проведенное исследование показало, что коэффициент прилипания оказывает существенное влияние на время роста фрактальных структур. На величину фрактальной размерности коэффициент прилипания влияет незначительно.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ ИЗЛОЖЕНО В СЛЕДУЮЩИХ РАБОТАХ:

1. Нестеров С. Б., Васильев Ю. К., Андросов А. В., Расчет сложных вакуумных систем // Учебное пособие – М.: Издательство МЭИ. – 2001. – 180 с.
2. Нестеров С.Б., Андросов А.В. Исследование профиля конденсата, формирующегося на охлаждаемых пластинах ловушки // Тезисы докладов VI международной школы – семинара «Новые информационные технологии», Судак. – 1998. – С. 68.
3. Нестеров С.Б., Андросов А.В. Расчет проводимости ловушки с учетом замороженного слоя // Материалы V научно-технической конференции «Вакуумная наука и техника», Гурзуф. – 1998. – С.89-94.
4. Нестеров С.Б., Андросов А.В. Сравнение профилей криослоев, полученных различными методами // Тезисы докладов VII международной школы – семинара «Новые информационные технологии», Судак. – 1999. – С. 179-180.
5. Нестеров С.Б., Андросов А.В. Формирование криослоя на центрах конденсации // Материалы VI научно-технической конференции «Вакуумная наука и техника», Гурзуф. – 1999. – С.138-143.
6. Андросов А.В., Нестеров С.Б. Расчет коэффициентов проводимости и отражательной способности ловушки ЛП-800 // Тезисы докладов VI международной международной научно-технической конференции студентов и аспирантов «Радиоэлектроника, электротехника и энергетика», Москва. – 2000. – Т 3 – С. 124-125.
7. Нестеров С.Б., Андросов А.В. Сравнение профилей криослоев, полученных различными методами // Материалы VII научно-

- технической конференции «Вакуумная наука и техника», Судак. – 2000. – С.111-116.
8. Андросов А.В., Нестеров С.Б. Определение профилей криослоев // Тезисы докладов VII международной международной научно-технической конференции студентов и аспирантов «Радиоэлектроника, электротехника и энергетика», Москва. – 2001. – Т 3 – С. 142-143.
 9. Нестеров С.Б., Андросов А.В. Расчет профилей криослоев // Вакуумная техника и технология. – 2000. – Т 10. – №4. – С.137-143.
 10. Андросов А.В., Нестеров С.Б. Определение характеристик криовакуумной ловушки // Тезисы докладов XXVII международной научно-технической конференции «Гагаринские чтения», Москва. – 2001. – С.98-101
 11. Андросов А.В., Кеменов В.Н. Метод повышения эффективности высоковакуумных ловушек для диффузионных насосов // Тезисы докладов X международной научно-технической конференции «Состояние и перспективы развития вакуумной техники», Казань. – 2001. – С.80-81.
 12. Андросов А.В., Кеменов В.Н., Нестеров С.Б. Пути совершенствования высоковакуумных ловушек для диффузионных насосов типа DFR // Материалы VII научно-технической конференции «Вакуумная наука и техника», Судак. – 2001. – С.124-129.
 13. Боярский М.Ю., Катри А., Нестеров С.Б., Андросов А.В. Компактная ловушка, интегрированная с дроссельным охладителем, работающем на газовой смеси // Book of abstract of 48 American Vacuum Symposium, San Francisco. – 2001. – P.67. На англ. яз.
 14. Андросов А.В., Нестеров С.Б. Определение профиля криослоя, формирующегося на пластинах ловушки А7-200 // Тезисы докладов VIII международной международной научно-технической конференции студентов и аспирантов «Радиоэлектроника, электротехника и энергетика», Москва. – 2002. – Т 3 – С. 134.
 15. Нестеров С.Б., Андросов А.В., Боярский М.Ю. Низкотемпературная ловушка, работающая на дроссельном цикле // Материалы V международного симпозиума «Вакуумные технологии и оборудование», Харьков. – 2002. – С.279-285.
 16. Нестеров С.Б., Андросов А.В., Боярский М.Ю. Экспериментальное и расчетное исследование структуры криослоя. Материалы IX научно-технической конференции «Вакуумная наука и техника», Судак. – 2002. – С.54-58.
 17. Андросов А.В., Васильев Ю.К., Зилова О.С., Нестеров С.Б. Разработка и внедрение методов анализа сложных вакуумных систем // Тезисы докладов VII международной конференции «Инженерные проблемы термоядерных реакторов», Санкт-Петербург. – 2002. – С.205-206.

Подписано в печать 18.11.02. Зак. 343. Тир. 100. П.л. 1,25
 Полиграфический центр МЭИ (ТУ)
 Красноказарменная ул., д. 13