

На правах рукописи

ВАСИЛЬЕВ Юрий Константинович

Определение интегральных и дифференциальных характеристик
сложных криовакуумных систем.

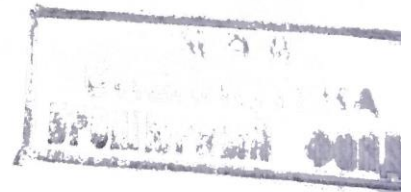
Специальность 05.04.03 – Машины и аппараты, процессы холодильной и
криогенной техники, систем кондиционирования и жизнеобеспечения.

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Ю.В. Васильев

Москва – 2001



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

Научный руководитель — доктор технических наук, профессор
НЕСТЕРОВ С. Б.

Официальные оппоненты — доктор технических наук, профессор
Архаров А. М.

доктор технических наук
Кеменов В. Н.

ентр
ут»

ВОЗВРАТИТЕ КНИГУ НЕ ПОЗЖЕ
обозначенного здесь срока

11 года в 13 30 часов
4 в Московском
ете) по адресу:
ал.

1.

: 111250, Москва,

МИКА В И.

Тип. МЭИ. Зак. 4396

Тир. 500000

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ.

Актуальность работы. В современном низкотемпературном оборудовании, таком как системы микроэлектроники, имитаторы космоса, экспериментальные установки термоядерного синтеза, и т. п. широко применяются различные криовакуумные системы как для обеспечения необходимых условий функционирования, так и в качестве неотъемлемой части этого оборудования. Криовакуумные системы, в свою очередь, являются сложными ресурсоемкими комплексами с технологической и экономической точек зрения, в силу чего проведение исчерпывающих экспериментальных исследований на этапе проектирования затруднено или невозможно.

В связи с этим особое значение приобретает проведение предварительного анализа системы на этапе проектирования. Целями подобного анализа могут быть: получение предварительных данных о характеристиках агрегата; моделирование рабочих режимов для выявления наиболее ответственных частей проекта; оптимизация агрегата по заданным параметрам; сравнение альтернативных конструкций и т. д.

Вышеупомянутые причины обуславливают необходимость развития таких идей и методов проектировочных расчетов сложных криовакуумных систем, которые с одной стороны обладают максимально возможной степенью универсальности, то есть позволяют строить алгоритмы и продукты на их основе, не требующие доработки для анализа каждой конкретной системы, а с другой стороны дают возможность учитывать ключевые факторы, оказывающие существенное влияние на условия функционирования реальной криовакуумной системы и их взаимное влияние:

- наличие множественных распределенных источников и стоков газа различных типов;
- сильная структурная усложненность;
- наличие сильных температурных перекосов, формирующих существенно неравновесные условия функционирования;
- нестационарность протекающих процессов.

Кроме того, особо актуальной представляется разработка алгоритмов и базирующихся на них продуктов, позволяющих получать в результате расчетов традиционные интегральные и дифференциальные параметры, характеризующие условия, сложившиеся в криовакуумной системе, которые позволяют проектировщику максимально быстро и эффективно использовать результаты анализа для дальнейшей работы над проектом.

Под интегральными параметрами понимаются такие характеристики криовакуумных систем как проводимость, быстрота действия, среднее давление, и т. п. Под дифференциальными параметрами подразумеваются такие категории, характеризующие состояние газовой среды в вакуумной системе, как пространственное распределение молекулярной концентрации, плотность молекулярных потоков, и т. п.

В результате проведенного анализа существующих подходов для расчета сложных криовакуумных систем одним из наиболее эффективных методов представляется метод статистических испытаний пробной частицы. Среди основных преимуществ этого подхода следует отметить возможность анализа параметров среды разреженного газа в сколь угодно сложной геометрической структуре, низкие по сравнению с другими методами требования к вычислительным ресурсам, минимальные предварительные операции, необходимые для предварительной подготовки описания анализируемой структуры, и т. д.

Цель работы. Обобщение имеющихся представлений и подходов к анализу криовакуумных систем методом пробной частицы, их модификация и дополнение таким образом, чтобы создать единый модульный, универсальный и легко расширяемый и дополняемый алгоритм, позволяющий получать как интегральные, так и дифференциальные характеристики сложных криовакуумных систем с максимально возможным учетом всех вышеупомянутых факторов, которые оказывают сильное влияние на функционирование криовакуумных систем и друг на друга.

Решение с использованием доработанного алгоритма ряда актуальных задач криовакуумной техники с одной стороны для проверки дееспособности применения данной методики для анализа реальных криовакуумных систем, а с другой стороны для дальнейшей, более глубокой, доработки метода решения, максимально учитывающей требования современных задач¹.

Разработка программного комплекса, имеющего модульную расширяемую структуру и использующего выработанные алгоритмы для исследования интегральных и дифференциальных характеристик сложных криовакуумных систем, который позволит проектировщику самостоятельно проводить необходимые расчеты без его непосредственного участия в реализации вычислительных алгоритмов.

¹ Необходимо отметить, что большая часть внесенных изменений и дополнений в алгоритм метода пробной частицы была продиктована именно требованиями, которые формулировались в процессе решения актуальных задач.

Научная новизна. На базе обобщенных имеющихся представлений о применении метода пробной частицы для анализа сложных криовакуумных систем и разработанных его модификаций и дополнений *впервые* создан единый, универсальный модульный алгоритм, имеющий неограниченные возможности расширения и дополнения и позволяющий проводить анализ сложных криовакуумных систем с учетом одновременного размещения в моделируемой структуре множественных распределенных источников и стоков газа различных типов, непрерывающегося процесса напуска газа в систему, наличия в моделируемой системе сильных температурных перекосов и нестационарности протекающих в анализируемой системе процессов, а также взаимного влияния этих факторов друг на друга.

С использованием данного алгоритма для его проверки и дополнения возможностями, необходимыми для анализа реальных криовакуумных систем *впервые* решен ряд актуальных практических и исследовательских задач:

- комплексный анализ и улучшение на его основе конструкции крионасоса Marathon 8, используемого в микроэлектронике;
- комплексный анализ системы откачки продуктов реакции термоядерного синтеза ИТЭР и выработка рекомендаций по направлениям оптимизации данной системы;
- анализ влияния микроструктуры (шероховатость, зернистость) реальной поверхности на ее интегральные характеристики;
- анализ влияния параметров взаимодействия молекулы с поверхностями вакуумной системы на ее интегральные характеристики;
- анализ влияния структур испытательных камер на результаты измерения откачных характеристик исследуемых насосов;
- анализ криовакуумных условий в системе вакуумной изоляции катушек тороидального поля ИТЭР с целью определения пространственных полей молекулярной концентрации для различных температурных режимов, в том числе для существенно неравновесных условий.

Впервые разработан и реализован универсальный программный комплекс, целиком вобравший в себя созданный алгоритм и все разработанные модификации и дополнения, и позволяющий проектировщику без специальной подготовки самостоятельно проводить комплексный анализ сложных криовакуумных систем. Созданный программный комплекс имеет модульную структуру, что позволяет ему

располагать практически ничем неограниченными возможностями расширения и дополнения.

Практическая ценность. Полученная единая универсальная методика и построенный на ее основе алгоритм позволяют проводить всесторонний анализ широкого спектра современных сложных криовакуумных систем с учетом ключевых факторов, оказывающих сильное влияние на характеристики систем, и не учитываемых традиционными методами анализа. С использованием выработанных методик в результате анализа есть возможность получать традиционные интегральные – проводимость, быстрота действия и дифференциальные характеристики криовакуумных систем – распределения молекулярной концентрации, давления, и т. п.

Результаты решенных с использованием разработанного универсального алгоритма актуальных задач нашли применение в областях проектирования и оптимизации криовакуумных систем для нужд микроэлектроники (IGC-APD Cryogenics Inc.), для международного проекта ИТЭР и в рамках комиссии по пересмотру вакуумного стандарта AVS 4.1.

Разработанный комплекс программ позволяет проектировщику без специальной подготовки в кратчайшие сроки и с достаточной достоверностью проводить анализ вакуумных систем произвольных конфигураций для предварительного определения их характеристик, анализа наиболее влиятельных на работоспособность системы параметров, с целью оптимизации их конструкций и т. п. Модульная конструкция программного комплекса позволяет практически неограниченно расширять его возможности путем простого дополнения и добавления средств, входящих в его состав.

Достоверность полученных результатов. Достоверность полученных результатов различных расчетов подтверждается проведенным тестированием разработанных алгоритмов на большом количестве широко известных задач и соответствующими экспериментальными данными, полученными в результате независимых исследований. Кроме этого, достоверность части полученных экспериментальных результатов подтверждается наличием необходимых сертификатов соответствия.

Апробация работы. Основные результаты работы доложены на III, IV, V, VI и VII научно-технических конференциях “Вакуумная наука и техника” (Гурзуф, 1996, 1997, 1998, 1999 г.г. и Судак, 2000); XXXV международной научной студенческой конференции “Студент и научно-технический прогресс”, Новосибирск, 1997; II международном

совещании «Проблемы вакуумных измерений» (Германия, Магдебург, 1997 г.); VI международной студенческой школе-семинаре «Новые информационные технологии». Судак, 1998; VI и VII международных научно-технических конференциях студентов и аспирантов «Радиоэлектроника, электротехника и энергетика», Москва, 2000 и 2001; 45-ом и 46-ом международных симпозиумах Американского вакуумного общества (США, Балтимор, 1998 г., Сизтл, 1999 г.); XIV международном вакуумном конгрессе (Англия, Бирмингем, 1998 г.); III и IV международном симпозиуме «Вакуумные технологии и оборудование» (Харьков, 1999г., 2001г.); научно-техническом семинаре кафедры МТ-11 «Электронное машиностроение» МГТУ им. Баумана (Москва, 2001); научно-техническом семинаре лаборатории криогенно-вакуумного оборудования и вакуумных систем ОАО «Криогенмаш» (г. Балашиха, 2001); научной сессии МИФИ-2001 (Москва, 2001). Некоторые части работы выполнялись по заказу группы конструкторов ИТЭР, компании APD-IGC Cryogenics Inc. и в рамках комиссии по пересмотру вакуумного стандарта AVS 4.1.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, шести глав и заключения и имеет объем 183 стр., включая 83 рисунка и 15 таблиц. Библиография включает 138 наименований.

Автор защищает. Единую, универсальную, способную к дальнейшему расширению методику анализа сложных криовакуумных систем, построенную на базе метода пробной частицы, дополненную разработанными алгоритмами для анализа традиционных, необходимых проектировщику для непосредственного использования в работе над проектом, интегральных и дифференциальных характеристик газовой среды и вакуумных систем, таких как молекулярная концентрация, давление, проводимость, и т. п. с учетом наличия множественных распределенных источников и стоков газа, сильной структурной усложненности системы, наличия сильных температурных перекосов, нестационарности протекающих процессов, а также других факторов, оказывающих влияние на работу реальных вакуумных систем.

Результаты решения с использованием данной методики ряда актуальных практических и исследовательских задач криовакуумной техники, встающих перед проектировщиком криовакуумных систем.

Разработанный и реализованный программный комплекс, имеющий модульную расширяемую конструкцию и использующий разработанные алгоритмы для исследования интегральных и дифференциальных характеристик сложной криовакуумной системы, который позволяет

проводить анализ, не требуя участия проектировщика в реализации расчетных алгоритмов.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ.

В первой главе проведен обзор имеющихся методов анализа сложных вакуумных систем. Рассмотрены как различные аналитические методы и теории – сосредоточенных параметров, Кнудсена, Клаузинга, угловых коэффициентов, и т. д., так и методы, требующие активного использования вычислительной техники – метод анализа газовых потоков путем решения кинетического уравнения Л. Больцмана, метод Монте-Карло пробной частицы, и т. п.

Применение для анализа сложных криовакуумных систем традиционных подходов, базирующихся на использовании осредненных параметров состояния разреженной газовой среды малоэффективно, поскольку в криовакуумных системах, как правило, реализуются неравновесные условия, и присутствует существенная неоднородность полей скоростей и молекулярной концентрации. Использование адекватных методов расчета, напротив, ориентировано на построение трехмерных полей дифференциальных характеристик газовой среды (молекулярная концентрация, плотности молекулярных потоков, и т. п.).

Метод пробной частицы является одним из самых оптимальных, а в определенных ситуациях единственным подходом, поскольку обладает относительно невысокой требовательностью к вычислительным ресурсам и при этом имеет потенциал для проведения с его помощью анализа криовакуумных систем любой степени сложности, в том числе находящихся в неравновесных условиях с учетом нестационарности протекающих процессов, и других факторов определяющих параметры функционирования реальных криовакуумных систем. Единственным ограничением применения метода пробной частицы в данном направлении является малая развитость соответствующих методик и подходов.

Во второй главе приводится подробное описание алгоритма метода пробной частицы, имеющего модульную структуру, что позволяет ему иметь практически неограниченные возможности расширения и дополнения. Рассмотрены необходимые модификации и дополнения, наличие которых диктуется требованиями, предъявляемыми к результатам решения современными актуальными задачами криовакуумной техники. Произведенные модификации и дополнения можно разделить на несколько частей:

- ранее известные дополнения метода пробной частицы, позволяющие анализировать различные характеристики молекулярных потоков:
 - определение полярных диаграмм скоростей частиц в некотором сечении;
 - определение распределения концентрации частиц в некотором сечении.
- разработанные дополнения метода пробной частицы, необходимые для моделирования различных параметров взаимодействия частицы с поверхностью:
 - учет типа источника газа и различных законов углового (диффузный, равномерный, лепестковый и т. д.) и пространственного (распределение по поверхности, объему, точечный источник и т. д.) распределения при запуске частиц;
 - учет динамического изменения значения коэффициента прилипания на поверхности (вероятности того, что после взаимодействия с поверхностью частица будет захвачена ею).
- разработанные дополнения метода пробной частицы, необходимые для определения полей дифференциальных характеристик газовой среды:
 - учет времени полета частицы;
 - учет скорости частицы;
 - определение пространственного распределения концентрации и давления (на базе подходов, предложенных Ю. Сутсугу (JVST A14(1), Jan/Feb 1996), модифицированных для анализа систем в неравновесных условиях);
- разработанные дополнения метода пробной частицы, необходимые для более полного моделирования процессов, протекающих в криовакуумных системах:
 - моделирование процесса квазипостоянного напуска газа.

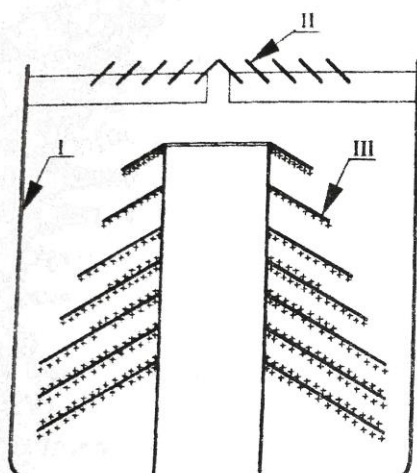
Все дополнения и модификации разработаны с учетом возможности их применения для анализа криовакуумных систем, в которых зачастую реализуются неравновесные и нестационарные условия.

Проведено подробное тестирование реализации модифицированного и дополненного алгоритма на известных расчетных задачах (определение проводимости, полярных диаграмм скоростей и т. п.). Отклонения результатов расчетов не превысили 3,5%.

В третьей главе рассматриваются вопросы проведения проекторочных и оптимизационных аналитических расчетов интегральных вакуумных и тепловых параметров сложных криовакуумных систем с учетом нестационарности протекающих

процессов – накопление сконденсированного слоя и соответствующее динамическое изменение геометрии системы, накопление сорбата и изменение захватных характеристик сорбента, и т. п. на примере двух реальных систем: крионасоса Marathon 8 для нужд микроэлектроники и системы откачки продуктов реакции термоядерного синтеза ИТЭР.

Схема крионасоса Marathon 8 представлена на рис. 1. Он предназначен для откачки смеси газов, например, паров воды, аргона и водорода. На конических панелях экрана (рис. 1, II) и кожухе (рис. 1, I) первой ступени, охлажденных до 70-80 К конденсируются пары воды, на конических панелях второй ступени (рис. 1, III), охлажденных до 10-15 К конденсируется аргон и сорбируется водород.



I-цилиндрический кожух (70-80 К)
II-жалюзийный экран (70-80 К)
III-вторая ступень (10-15 К)
+- места нанесения сорбента

Рис. 1. Схема типового крионасоса.



Рис. 2. Рассчитанная зависимость скорости действия крионасоса по водороду от накопления и сравнение с экспериментальными данными.

Для данной структуры с использованием разработанного модифицированного алгоритма были рассчитаны следующие характеристики:

- значения скорости действия крионасоса по воде, аргону и водороду в начальный момент времени. Сравнение результатов расчетов с независимо полученными экспериментальными данными показало отклонение не более 8% (табл. 1);
- зависимость значения скорости действия по водороду от количества накопленного газа (рис. 2) – в процессе накопления динамически изменяется коэффициент прилипания на сорбенте;
- зависимость скорости действия по водороду и аргону от количества накопленной на панелях экрана воды – геометрия экрана динамически

меняется в процессе конденсации на нем паров воды и проводимость экрана падает;

- зависимость быстроты действия по водороду от количества сконденсированного на панелях второй ступени аргона – растущий криослой аргона препятствует проникновению молекул водорода к панелям с сорбентом;
- структуры криослоев паров воды и аргона на панелях экрана и второй ступени, соответственно;
- теплопритоки к панелям второй ступени.

С учетом полученных результатов расчетов оригинальная конструкция крионасоса Marathon 8 была модифицирована. Расчеты характеристик новой конструкции показали, что значение быстроты действия возросло по аргону на 15%, по водороду на 25%, а теплопритоки ко второй ступени уменьшились на 7%.

Табл. 1. Сравнение результатов расчетов быстроты действия крионасоса в начальный момент времени с независимо полученными экспериментальными данными.

Газ	Расчет	Эксперимент	Отклонение
Вода	4251 л/с	4200 л/с	1,2%
Аргон	1163 л/с	1250 л/с	7,5%
Водород	2885 л/с	3000 л/с	4,0%

Общая схема системы откачки продуктов термоядерного синтеза ITER показана на рис. 3. Система откачки состоит из диверторного трубопровода, внутри которого установлен крионасос. Крионасос состоит из цилиндрического кожуха, внутри которого закреплен цилиндрический тепловой щит, который охлаждается до 80 К. Входное сечение насоса открывается и закрывается посредством клапана, укрепленного на поршне, обеспечивающим регулировку быстроты действия насоса, начало и конец процесса откачки. Кроме цилиндрического щита имеется защитный экран, состоящий из конусов, охлажденных также до 80 К. Внутренняя структура крионасоса показана на рис. 4. Панели с нанесенным сорбентом имеют прямоугольную форму и охлаждаются до 5 К. От входного теплового потока они полностью защищены цилиндрическим щитом и коническим защитным экраном. Анализ проводился как для непосредственно самого крионасоса, так и для всей системы откачки в целом.

В результате анализа были рассчитаны следующие характеристики системы откачки продуктов реакции термоядерного синтеза ИТЭР:

- зависимости скорости действия от коэффициента прилипания на криопанелях с сорбентом (в других местах системы откачки коэффициенты прилипания принимались равными нулю) для системы откачки в целом (рис. 5) и крионасоса в отдельности (рис. 6);
- зависимости значения теплопритоков излучением к криопанелям с сорбентом от значений степеней черноты сорбента и конических панелей экрана и цилиндрического щита;
- зависимости теплопритоков к криопанелям с сорбентом по разреженному газу от значения рабочего давления.



Рис. 3. Структура системы откачки продуктов термоядерного синтеза в ITER.

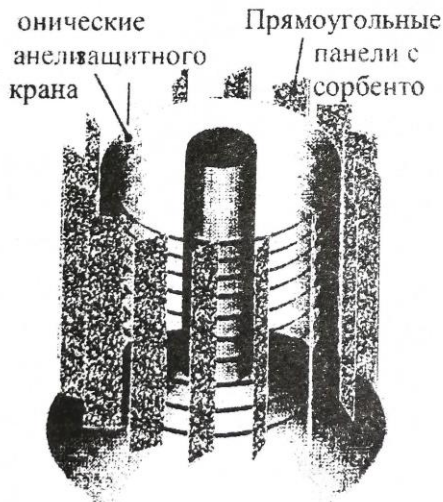


Рис. 4. Внутренняя структура крионасоса ITER.

Сравнение рассчитанного значения скорости действия системы откачки с соответствующими значениями, планируемыми проектировщиками (41500 л/с) показало отклонение не более 15%.



Рис. 5. Зависимость скорости действия и коэффициента захвата системы откачки от коэффициентов прилипания газа на криопанелях насоса.

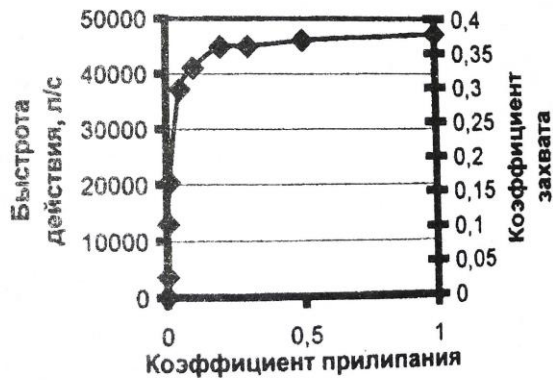


Рис. 6. Зависимость скорости действия и коэффициента захвата крионасоса от коэффициентов прилипания.

Выполненный анализ позволил определить наиболее ответственные с точки зрения проектирования участки системы с целью проведения более подробного анализа и возможной оптимизации.

Четвертая глава посвящена изучению различных аспектов влияния изменения параметров взаимодействия частиц со стенками. В первой части рассматривается степень влияния сложного рельефа (микрogeометрии) различных реальных поверхностей на интегральные характеристики всей поверхности в целом. Во второй части анализируется влияние изменения закона углового распределения при взаимодействии частиц со стенками на интегральные характеристики вакуумной системы.

При анализе вакуумных систем предполагается, что молекулы взаимодействуют с гладкими поверхностями системы и угловое распределение подчиняется диффузному закону. Однако, в реальности поверхности имеют сложную рельефную структуру (рис. 7).

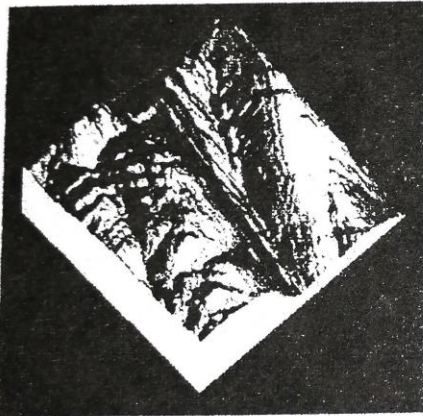


Рис. 7. Структура поверхности активированного угля Chemviron GFF/30. Фрагмент 2.5x2.5 мкм.

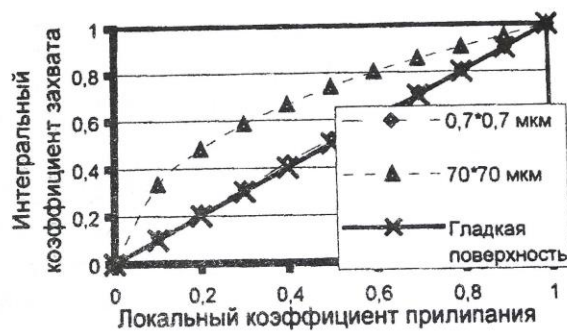


Рис. 8. Зависимость коэффициента захвата (интегрального коэффициента прилипания) фрагмента поверхности от локального («истинного») коэффициента прилипания для фрагмента поверхности и зерна.

Проанализировано влияние, которое может оказать сложная структура реальной поверхности на ее интегральные характеристики. Для этого с использованием электронного туннельного микроскопа и профилометра сканировались реальные поверхности различных сорбентов и других материалов, широко применяющихся при изготовлении криовакуумного оборудования. Далее анализировалось влияние рельефа данного типа поверхности на зависимость интегрального коэффициента захвата (под интегральным коэффициентом прилипания понимается коэффициент захвата всей поверхности в целом,

как сложной разветвленной структуры) от локального коэффициента прилипания, как вероятности прилипания частицы в каждой точке. Данный анализ проводился для нескольких уровней масштаба для того, чтобы определить какие фрагменты поверхности (зерна, поры или их части) оказывают большее влияние на характер зависимости.

В результате анализа было показано, что разница между локальным коэффициентом прилипания и интегральным коэффициентом захвата может достигать 100% и более (рис. 8). За счет многократных соударений частицы с поверхностью внутри одной поры, где вероятность прилипания в каждой точке равна коэффициенту прилипания, интегральный коэффициент захвата всей поверхности возрастает.

Кроме микрогеометрии поверхности влияние на характеристики криовакуумной системы оказывает закон взаимодействия частицы с поверхностью. Проведен анализ влияния, которое может оказывать закон углового распределения при столкновении молекулы со стенкой системы на ее интегральные характеристики, такие как проводимость. Интерес к данной проблеме вызван тем, что экспериментальные данные Дэвиса и др. (J. of Appl. Phys., 1964, v. 35, No. 3, pp. 529-532) показывают устойчивые различия на 15-20% значений проводимости для реального шероховатого и идеального гладкого трубопроводов. Однако, задавать исчерпывающие характеристики микрогеометрии стенок непосредственно при расчете малоэффективно, поэтому предлагается осуществлять моделирование шероховатостей реальной поверхности изменением закона взаимодействия частицы с поверхностью. Причем «отградуировав» соответствие определенных законов взаимодействия и степеней шероховатости на простых системах, например, на трубопроводах, можно использовать эти данные при анализе более сложных вакуумных систем. В результате данного анализа получены обширные данные о влиянии закона углового распределения на значение проводимости трубопровода и структуру формируемого на выходе из него потока газа.

В пятой главе рассматриваются вопросы расчета пространственных полей дифференциальных характеристик разреженного газа (распределение давления, концентрации, и т. п.) на примерах анализа влияния структуры испытательной камеры на значение быстроты действия испытываемого насоса и определения криовакуумных условий в зонах вакуумной изоляции катушек тороидального поля ИТЭР.

В соответствии с ГОСТ 11 295.021-74, а также со стандартами Рпейгор и AVS, для испытаний насосов используются два основных типа

испытательных камер – одноколпаковая (рис. 9) и двухдатчиковая. Причем предполагается, что параметры молекулярного потока на входе в насос соответствуют условиям присоединения к большому объему. На рис. 10 показана структура молекулярного потока, формирующегося на выходе из испытательной камеры одноколпакового типа или, другими словами, на входе в насос.

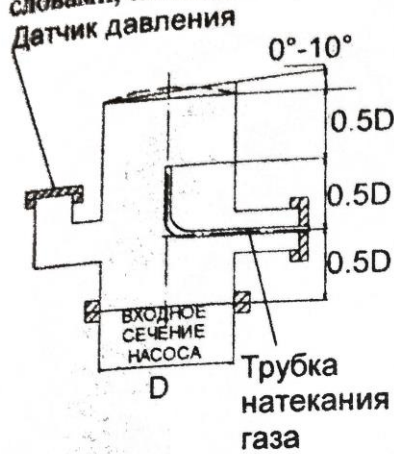


Рис. 9. Схема одноколпаковой испытательной камеры.

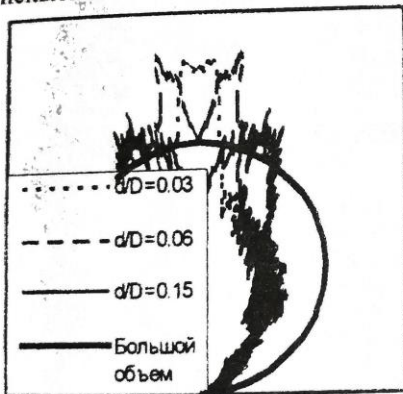


Рис. 10. Диаграмма направлений частиц на выходе из одноколпаковой испытательной камеры для разных соотношений диаметров трубки напуска (d) и камеры (D).

Форма этого потока существенно отличается от диффузного распределения, которое формируется при присоединении к большому объему. Конструкции испытательных камер разрабатывались на основании расчетов Фишера и Моммсена (Vacuum 17, 309, 1967),



Рис. 11. Распределение коэффициента захвата насоса Marathon 8 по входному сечению.

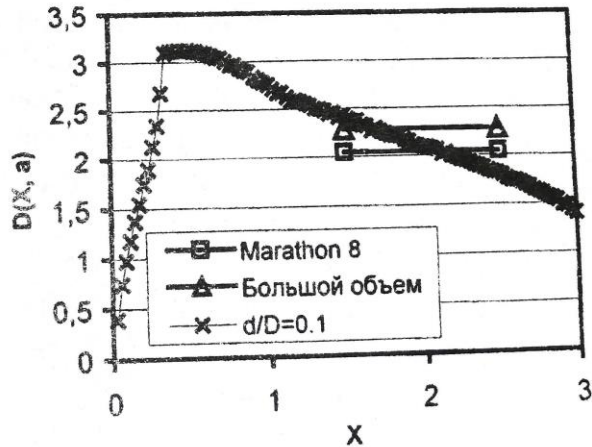


Рис. 12. Относительное распределение давления внутри одноколпаковой испытательной камеры с присоединенным насосом Marathon 8.

проведенных в 1967 и показавших, что при присоединении датчика на расстоянии радиуса испытательной камеры от входного сечения «пористого» насоса (плоскость с равномерно распределенным по площади известным коэффициентом захвата), значение давления будет соответствовать условиям присоединения насоса к большому объему. То есть, $S = Q/P_0$, где P_0 – давление, показываемое датчиком, Q – известное

значение потока напускаемого в камеру газа, S – значение быстроты действия «пористого» насоса. Проведенный с использованием разработанного алгоритма анализ показал, что действительно при присоединении к испытательной камере «пористого» насоса давление в указанной точке соответствует заданной скорости действия. Однако распределение коэффициента захвата по входному сечению реального насоса, например, Marathon 8 существенно отличается от равномерного, принятого для «пористого» насоса (рис. 11). И действительно оказалось, что при присоединении к испытательной камере реального крионасоса, давление в точке присоединения датчика соответствует скорости действия насоса в данный момент (рис. 12, $X=2$), однако это значение скорости действия оказывается на 10-15% выше, чем при присоединении насоса к большому объему. Таким образом, структура потока, формируемого испытательной камерой вкупе со сложной конструкцией реального насоса оказывают существенное влияние на значение давления в точке установки датчика.

Для обеспечения необходимых температурных и вакуумных условий работы система катушек тороидального поля ИТЭР (TFC) оборудована многоступенчатой системой вакуумной изоляции (VVTS) – рис. 13. Тепловая изоляция вакуумной камеры (VVTS) предназначена для ограничения тепловых потоков, идущих от «теплой» вакуумной камеры (VV) на катушки сверхпроводящей электромагнитной системы установки (TFC). VVTS располагается в зазоре между TFC и VV. Она представляет собой стальную тонкую оболочку с формой, повторяющей форму вакуумной камеры. Конструктивно тепловая защита состоит из внутренней и внешней частей. Внутри данной системы реализуются неравновесные условия – температуры VV варьируются от 300 до 520 К, VVTS – от 80 до 300 К, TFC – от 5 до 300 К. Анализ проводился для трехмерной структуры, состоящей из нескольких вложенных друг в друга торов (VV → VVTS → TFC), в межстенном пространстве которых анализировалось распределение концентрации, причем напуск газа осуществлялся со всех поверхностей системы и значение газовыделения

зависело от температуры, откачка газа осуществлялась через патрубки, установленные в точках, показанных на рис. 14.

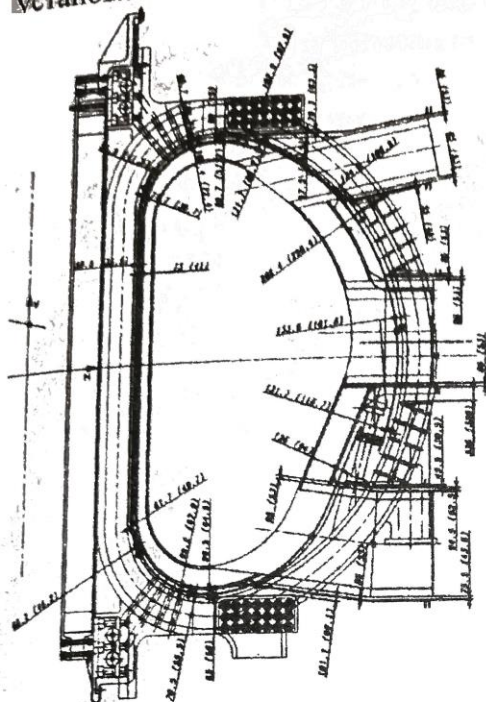


Рис. 13. Система изоляции и значения зазоров при комнатной температуре – RT и (RT).



Рис. 14. Схема областей, на которые разбита анализируемая система.

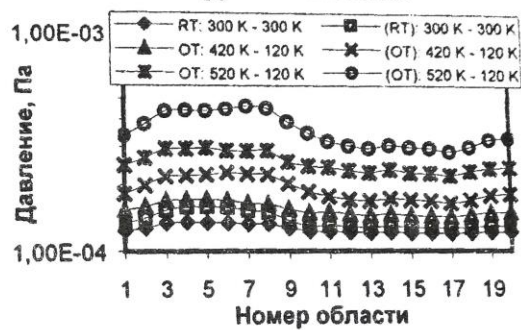


Рис. 15. Распределение давления внутри зоны VV – VVTS.

Проведенный анализ с использованием разработанного алгоритма позволил получить распределения молекулярной концентрации и приведенного к температуре $T=80$ К давления для всех режимов работы TFC (рис. 15). Результаты анализа позволили оценить влияние остаточной газовой среды на процессы теплообмена в зонах системы вакуумной изоляции катушек тороидального поля ИТЭР.

В шестой главе рассматриваются вопросы создания универсального программного комплекса, позволяющего осуществлять анализ криовакуумных систем любой степени сложности с целью получения как интегральных (быстрота действия, проводимость), так и дифференциальных (распределение давления, плотности молекулярных потоков) характеристик. Созданный и реализованный программный комплекс, имеющий дружественный пользовательский интерфейс, позволяет проектировщику без специальной подготовки проводить анализ сложных криовакуумных систем с учетом всех ключевых

факторов, оказывающих существенное влияние на работу криовакуумных систем и самостоятельно решать задачи, аналогичные рассмотренным выше. Возможности созданного комплекса: анализ сколь угодно сложной структуры; возможность задавать неограниченное количество источников и стоков газа разных типов, параметры которых могут динамически изменяться в процессе анализа; возможность анализировать системы, находящиеся в существенно неравновесных условиях (температуры поверхностей задаются индивидуально); анализ интегральных и дифференциальных характеристик в нестационарной постановке.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ.

На базе обобщенных имеющихся представлений о применении метода пробной частицы для анализа сложных криовакуумных систем и разработанных его модификаций и дополнений *впервые* создан единый, универсальный модульный алгоритм, имеющий неограниченные возможности расширения и дополнения и позволяющий проводить анализ сложных криовакуумных систем с учетом одновременного размещения в моделируемой структуре множественных распределенных источников и стоков газа различных типов, непрекращающегося процесса напуска газа в систему, наличия в моделируемой системе сильных температурных перекосов и нестационарности протекающих в анализируемой системе процессов, а также взаимного влияния этих факторов друг на друга.

С использованием данного алгоритма для его проверки и дополнения возможностями, необходимыми для анализа реальных криовакуумных систем *впервые* решен ряд актуальных практических и исследовательских задач:

- комплексный анализ и улучшение на его основе конструкции крионасоса Marathon 8, используемого в микроэлектронике;
- комплексный анализ системы откачки продуктов реакции термоядерного синтеза ИТЭР и выработка рекомендаций по направлениям оптимизации данной системы;
- анализ влияния микроструктуры (шероховатость, зернистость) реальной поверхности на ее интегральные характеристики;
- анализ влияния параметров взаимодействия молекулы с поверхностями вакуумной системы на ее интегральные характеристики;

- анализ влияния структур испытательных камер на результаты измерения откачных характеристик исследуемых насосов;
- анализ криовакуумных условий в системе вакуумной изоляции катушек тороидального поля ИТЭР с целью определения пространственных полей молекулярной концентрации для различных температурных режимов, в том числе для существенно неравновесных условий.

Впервые разработан и реализован универсальный программный комплекс, целиком вобравший в себя созданный алгоритм и все разработанные модификации и дополнения и позволяющий проектировщику без специальной подготовки самостоятельно проводить комплексный анализ сложных криовакуумных систем. Созданный программный комплекс имеет модульную конструкцию, что позволяет ему располагать практически ничем неограниченными возможностями расширения и дополнения.

Основное содержание диссертации отражено в следующих работах:

1. Нестеров С. Б., Васильев Ю. К., Крюков А. П. Влияние формы вакуумной камеры на неравномерность газового распределения // Вакуум. – 1999 – Т. 53. – С. 193-196. (на англ. яз.)
2. Нестеров С. Б., Васильев Ю. К., Саксаганский Г. Л., Логинов Б. А., Протасенко В. В. Как микрогеометрия сорбента влияет на сорбционные характеристики крионасосов // Вакуум. – 1999. – Т. 53. – С. 263-267. (на англ. яз.)
3. Нестеров С. Б., Васильев Ю. К., Крюков А. П. Влияние формы вакуумного объёма на неравномерность газового распределения" // Вакуумная техника и технология. – 1999. – Т. 9. – № 1. – С. 9-16
4. Нестеров С. Б., Васильев Ю. К. Исследование термомолекулярного эффекта // Материалы V научно-технической конференции «Вакуумная наука и техника», Гурзуф. – 1998. – С. 56-61.
5. Боярский М., Вагнер Л., Нестеров С. Б., Васильев Ю. К. Моделирование характеристик крионасоса для откачки водородосодержащих смесей // Материалы V научно-технической конференции «Вакуумная наука и техника», Гурзуф. – 1998. – С. 95-100.
6. Нестеров С. Б., Васильев Ю. К., Саксаганский Г. Л., Логинов Б. А., Протасенко В. В. Влияние микрогеометрии сорбентов на сорбционные характеристики крионасосов // Материалы V научно-технической конференции "Вакуумная наука и техника", Гурзуф. – 1998. – С. 145-149.

7. Боярский М., Вагнер Л., Нестеров С. Б., Васильев Ю. К. Моделирование откачки водородосодержащих смесей для крионасосов // Журнал вакуумной науки и технологии. – (А). – 1999. – Т. 17. – №4, Jul-Aug. – С. 2099-2103.
8. Нестеров С. Б., Васильев Ю. К. Влияние испытательной камеры на измерения скорости действия. Вопросы атомной науки и техники // сер. «Вакуум, чистые материалы, сверхпроводники». – Харьков. – 1999. – вып. 1(9). – С. 33-37.
9. Нестеров С. Б., Васильев Ю. К. Влияние углового распределения частиц на проводимость // Материалы VI научно-технической конференции «Вакуумная наука и техника». – Гурзуф. – 1999. – С. 101-109.
10. Васильев Ю. К., Нестеров С. Б., Исследование влияния микроструктуры на характеристики нераспыляемых геттеров // Вакуумная техника и технология. – 2000. – №1. – С. 9-14.
11. Нестеров С.Б., Васильев Ю.К. Анализ влияния измерительной камеры на откачные характеристики крионасосов. // Материалы Седьмой научно-технической конференции с участием зарубежных специалистов «Вакуумная наука и техника». – Судак. – 2000. – С. 122-127.
12. Нестеров С.Б., Васильев Ю.К., Саксаганский Г.Л. Комплексное исследование системы откачки продуктов реакции термоядерного синтеза ITER. – Материалы Седьмой научно-технической конференции с участием зарубежных специалистов «Вакуумная наука и техника». Судак. 2000. С. 139-145.
13. Нестеров С. Б., Васильев Ю. К. Эффекты в разреженном газе и их анализ. // Материалы IV международного симпозиума «Вакуумные технологии и оборудование». – Харьков. – 2001. – С. 16-20.
14. Нестеров С. Б., Васильев Ю. К., Программный комплекс для анализа параметров вакуумных систем любой степени сложности. // Материалы IV международного симпозиума «Вакуумные технологии и оборудование». – Харьков. – 2001. – С. 56-59.
15. Нестеров С. Б., Васильев Ю. К., Саксаганский Г. Л. Анализ криовакуумных условий в зоне «Камера – экран – система катушек тороидального поля» ИТЭР. // Материалы IV международного симпозиума «Вакуумные технологии и оборудование». – Харьков. – 2001. – С. 49-55.

Печ. л. 1,25

Тираж 100

Заказ 187

НТБ МЭИ

зарменная, 13.



77798