

Крыжову А.П.

На правах рукописи

Асташина Мария Александровна

МОЛЕКУЛЯРНЫЕ ПОТОКИ В СЛОЖНЫХ ОБЪЕКТАХ С УЧЕТОМ  
ГАЗОВЫДЕЛЕНИЯ ПОВЕРХНОСТЕЙ

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-2009

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

Научный руководитель – доктор технических наук, профессор

Нестеров Сергей Борисович

Официальные оппоненты – доктор технических наук, профессор

Розанов Леонид Николаевич

– кандидат технических наук

Кряковкин Вячеслав Петрович

Ведущая организация – Ракетно-космическая корпорация «Энергия»

им. С.П.Королева

Защита состоится «04» декабря 2009 г. в 10:00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.157.04 при Московском энергетическом институте (техническом университете) по адресу: г. Москва, Красноказарменная ул., д. 17, корп. Т, ауд. Т-206

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МЭИ (ТУ).

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

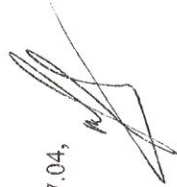
Автореферат разослан « 03 » ноября 2009 г.

Ученый секретарь

диссертационного совета Д 212.157.04,

к.ф.-м.н. доцент

В.И. Мика



## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность работы.** Многие области, в которых используется вакуум, такие как аэрокосмическая промышленность, большие и малые электрофизические установки, физика твердого тела, являются ответственными приложениями, предъявляющими все более жесткие требования к системам обеспечения и контроля вакуума. И, если задача обеспечения необходимого уровня вакуума решается с использованием все более совершенных разрабатываемых средств откачки, то задача контроля сводится не только к доработке и совершенствованию аппаратной базы, но и к разработке методик анализа молекулярных потоков, с учетом основных факторов, влияющих на их изменение. К таким факторам стоит отнести сложную многокомпонентную структуру установок, в которых необходимо контролировать молекулярные потоки, наличие распределенных источников и стоков газа, что формирует неравномерность концентрации, а также, присутствие в реальных условиях нестационарных и неравновесных процессов – изменение скорости откачки в зависимости от давления, появление и исчезновение течей и нерегламентированных источников газовой выделенности. Главной целью такой методики анализа молекулярных потоков является формирование исчерпывающей картины о характере распределения молекулярных потоков, распределении концентрации и их изменении в течение технологического процесса. Актуальность разработки такой методики обуславливает еще и то, что зачастую, в сложных системах аппаратные возможности контроля достаточно ограничены, а значение контроля уровня вакуума велико. Например, возникновение даже небольшой течи или паразитного газового потока в системе вакуумной изоляции сверхпроводящих катушек тороидального магнитного поля в термоядерном реакторе может привести к серьезным последствиям. Столь же существенна роль контроля газовых потоков в ускорительно-накопительных комплексах и космической аппаратуре. При этом, как правило, конструктивные особенности таких систем не позволяют устанавливать в них необходимые аппаратные средства контроля в каждом ответственном участке, поэтому нужно определять распределение молекулярных потоков и концентрации с учетом ограниченности получаемых объективных данных. Главной целью такого подхода является индикация наличия газовых потоков или процессов, не предусмотренных технологическим регламентом, а значит, способных негативно повлиять на работу установки.



**Цель работы.** Разработка методики анализа молекулярных потоков в сложных объектах и системах с учетом газовойделения поверхностей, позволяющей с помощью ограниченного количества объективных данных формировать и отслеживать относительные распределения потоков и концентраций частиц в исследуемом объеме, и, по возможности, прогнозировать соблюдение технологических условий протекания процесса. Разработка и создание модельной экспериментальной установки для расчетно-экспериментального исследования значеня уровня газовойделения различных материалов.

*Для достижения данной цели необходимо решить ряд задач:*

- Сформулировать основные этапы и влияющие факторы, необходимые для создания методики анализа молекулярных потоков в сложных объектах и системах.
  - На основе обзора и сравнительного анализа существующих подходов, которые позволяют анализировать молекулярные потоки в сложных многокомпонентных вакуумных системах выявить наилучший подход для использования в методике анализа молекулярных потоков в сложных объектах и системах с учетом газовойделения поверхностей. Выработать рекомендацию по его применению, и, при необходимости, доработать его для использования в рамках разрабатываемой методики.
  - Выполнить обзор методов и результатов исследования уровня газовойделения материалов в вакууме и разработать на его основе систему анализа и управления данными по газовойделению различных материалов в разных условиях («ПОТОК»).
  - Выполнить экспериментальные исследования влияния различных факторов на структуру и значение газовойделения. Выработать рекомендацию по анализу результатов исследований и использованию системы «ПОТОК».
  - Разработать общий алгоритм методики анализа структуры молекулярных потоков с учетом ограниченных возможностей получения объективных данных.
- На примере задачи исследования и анализа молекулярных потоков вблизи космического аппарата применить разработанную методику:
- Выполнить обзор задач и методов исследования молекулярных потоков вблизи космического аппарата.
  - Осуществить моделирование молекулярных потоков вблизи космического аппарата с учетом различных факторов, оказывающих влияние на них.

- Выработать необходимые рекомендации для изготовления регистрирующего устройства, с помощью которого будет осуществляться мониторинг молекулярных потоков вблизи космического аппарата.

**Научная новизна.** Разработана и создана модельная экспериментальная установка для расчетно-экспериментального исследования влияния различных факторов на структуру и значение уровня газовойделения различных материалов. Установка включает в себя современные безмасляные откачные средства, что позволяет более точно анализировать газовые потоки с поверхности исследуемых объектов без учета влияния паров рабочих жидкостей.

Получены экспериментальные результаты по определению времени откачки вакуумной технологической системы в зависимости от способов присоединения высоковакуумных насосов, выявлен один из важнейших факторов, влияющих на правильность выбора откачного оборудования. С помощью данной установки в дальнейшем планируется проводить экспериментальные исследования уровня газовойделения различных материалов.

Впервые разработана информационно-аналитическая система для сбора, представления, анализа и управления данными по газовойделению различных материалов в широком диапазоне условий, включающая различные материалы (нержавеющая сталь, медь, алюминий, фторопласт, резина, стекло, витон) при давлениях (до  $10^{-8}$  Па), температурах (от 25 до 450°C), продолжительности откачки (от 30 минут до 250 часов).

Впервые разработана методика анализа структуры молекулярных потоков в сложных объектах и системах с учетом газовойделения поверхностей, позволяющая с помощью ограниченного количества объективных данных формировать и отслеживать относительные распределения потоков и концентраций частиц в заданном объеме.

На основе разработанного алгоритма впервые создана программа для моделирования собственной внешней атмосферы космического аппарата с использованием метода пробной частицы, в базовые соотношения которого внесены изменения.

**Практическая ценность.** Разработанная модельная экспериментальная установка для расчетно-экспериментального исследования влияния различных факторов на структуру и значение уровня газовойделения различных материалов используется в ФГУП «Научно-исследовательский институт вакуумной техники им. С.А. Векшинского».



Разработанная в рамках работы система управления данными по вакуумным свойствам материалов «Поток» используется в ФГУП «Научно-исследовательский институт вакуумной техники им. С.А. Векшинского».

Алгоритм расчета сложных многокомпонентных систем используется при проектировании технологических установок в ОАО «Электрприбор», г. Тамбов.

Разработанная методика анализа молекулярных потоков в сложных объектах и системах может использоваться в задачах и приложениях, в которых необходимо контролировать состояние разреженной газовой среды, и при этом, имеются существенные ограничения использования средств такого контроля – мониторинг собственной газовой среды вблизи космического аппарата, поиск, прогнозирование и диагностика течей или нерегламентированных газовых потоков внутри сложных замкнутых вакуумных системах ускорительно-накопительных комплексов, установок термоядерной энергетики, многослойных системах вакуумной изоляции больших криогенных резервуаров.

Методика и результаты расчетов молекулярных потоков в сложных объектах и системах с учетом газовой поверхности используются в РКК «Энергия» им. С.П. Королёва.

#### Автор защищает

- Комплексный алгоритм проектирования многокомпонентных вакуумных систем.
- Результаты экспериментальных исследований зависимости газовой деления от времени откачки, а также времени откачки вакуумной технологической системы от способов присоединения высоковакуумных насосов.
- Методику анализа молекулярных потоков в сложных объектах и системах с учетом газовой поверхности, позволяющую с помощью ограниченного количества объективных данных формировать и отслеживать относительные распределения потоков и концентраций частиц в исследуемом объеме.
- Результаты расчета молекулярных потоков вблизи источников разных типов в зависимости от расположения регистрирующего устройства.
- Информационно-аналитическую систему для сбора, представления, анализа и управления данными по газовой делению различных материалов в широком диапазоне условий «ПОТОК».

#### Достоверность полученных результатов.

Достоверность результатов расчета подтверждается использованием в различных алгоритмах методик и подходов, достоверность которых многократно подтверждена ранее.

Достоверность экспериментальных исследований подтверждается анализом паспортных данных используемых приборов и методической погрешностью метода исследования.

Апробация работы. Основные положения и результаты работы доложены на XIII, XV, XVI научно-технических конференциях «Вакуумная наука и техника» (Судак 2005 г. и Сочи 2007, 2008 г.г.), XII, XIV и XV Международных студенческих школах-семинарах «Новые информационные технологии» (Судак, 2005, 2007, 2008 г.г.), VII, VIII Международных научно-технических конференциях студентов и аспирантов «Радиоэлектроника, электротехника и энергетика» (Москва, 2006, 2009 г.г.), XXXI Международной молодежной научной конференции «Гагаринские чтения» (Москва, 2005 г.), 2-ой Курчатовской молодежной научной школе (Москва, 2004 г.), научно-технических семинарах «Вакуумная техника и технология» (Санкт-Петербург, 2004, 2008 г.г.), 2-ой, 3-ей студенческих научно-технических конференциях «Вакуумная техника и технология» (Казань, 2005, 2007 г.г.), научных сессиях «МИФИ» (Москва, 2006, 2007 г.г.), XIV международной научно-технической конференции «Высокие технологии в промышленности России» (Москва, 2008 г.), итоговой конференции «Всеоссийский конкурс на лучшие научные работы студентов по естественным, техническим наукам и инновационным научно-образовательным проектам» (Звенигород, 2004 г.), федеральной школе-конференции по результатам всероссийского конкурсного отбора инновационных проектов аспирантов и студентов по инновационному малому предпринимательству в приоритетных направлениях науки и высоких технологий (Звенигород, 2005), III международно-научно-технической конференции «Вакуумная техника, материалы и технологии» (Москва, 2008 г.), 4-ой международной научно-практической конференции «Криогенные технологии и оборудование. Перспективы развития» (Москва, 2008 г.).

Разработанная база данных, содержащая информацию по величинам газовой деления материалов, используемых в вакуумной технике, используется в ФГУП «Научно-исследовательский институт вакуумной техники им. С.А. Векшинского». База данных подтверждена свидетельством № 08-210 о регистрации объекта интеллектуальной собственности в системе сертифицирования и оценки объектов



интеллектуальной собственности, зарегистрированной в государственном реестре Госстандарта России 19 июля 1995 г. № РОСС RU.0001.04Я300. Создана в 2006 г.

Часть работы выполнялась в рамках работы по заказу РКК «Энергия» им. С.П. Королева и ОАО «Электронприбор».

Публикации. По теме диссертации опубликовано 29 печатных работ, в том числе 21 статья и материал в трудах конференций, 4 тезиса докладов, 4 статьи в журнале «Вакуумная техника и технология», включенном в перечень изданий ВАК РФ.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, 6 глав и заключения и имеет объем 156 стр., включая 55 рисунков, 17 таблиц и 2 приложения. Библиография включает 84 наименований.

#### СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

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

В первой главе проводится обзор и сравнительный анализ существующих подходов к проектированию многокомпонентных вакуумных систем. При проектировании таких систем для больших технологических установок, необходимо учитывать ряд факторов, таких как: необходимость откачки больших объемов, существенное влияние газовой выделенности, сложность конструкции, динамическое изменение характеристик, результаты экспериментального моделирования рабочих параметров на модельных установках. Это особенно необходимо при разработке систем для ответственных приложений, где «цена ошибки» очень высока. Одним из важнейших факторов, влияющих на правильность выбора откачного оборудования, является учет значений газовой выделенности с поверхностей системы и натекания в нее в течение технологического процесса. Неточный учет этих параметров может повлечь за собой увеличение времени предварительной откачки до рабочего давления, а также, в наихудшем случае – невозможность проведения технологического процесса, когда выбранная откачная система не справляется с необходимым для работы газовым потоком.

В данной главе рассматриваются: метод аналогии с электрическими цепями (традиционный/Дэшмановский подход), метод Монте-Карло (пробной частицы) и метод единого универсального уравнения вакуумной техники (УУВТ).

А также проводится сравнительный анализ и обзор методов исследования газовой выделенности материалов в вакууме (динамический метод при откачке газа через диафрагму известной проводимости, динамический метод при откачке газа через диафрагму с изменяемой проводимостью, динамический двухпоточный метод, метод накопления) с целью выявления оптимального метода исследования уровня газовой выделенности для дальнейшего использования в экспериментальной установке.

В результате этого выработаны следующие рекомендации:

- для приближительных расчетов суммарной проводимости можно применять традиционный метод;
- использование метода, основанного на универсальном уравнении вакуумной техники более эффективно, чем традиционного (Дэшмановского) подхода. Однако его применение осложняется необходимостью наличия исчерпывающих данных о характеристиках элементов, в том числе их зависимостей от рабочего давления, что ограничивает его использование компоновкой вакуумной системы из элементов с известными параметрами. При этом в отличие от метода пробной частицы, область его применения не ограничивается свободномолекулярным режимом;
- использование готовой программы, реализующей метод пробной частицы более эффективно, и вместе с тем, проще для освоения, чем проведение расчета по громоздким формулам метода единого универсального уравнения вакуумной техники.

В результате обзора и сравнительного анализа методов исследования газовой выделенности материалов в вакууме выявлено, что:

- наиболее простым в использовании методом определения газовой выделенности является динамический метод при откачке газа через диафрагму известной проводимости. Его можно применять в процессе работы вакуумной системы;
- самыми точными методами определения газовой выделенности являются метод накопления (взяв в основу экспериментальной установки) и динамический двухпоточный метод.

Во второй главе осуществляется расчет сложной многокомпонентной системы (рис. 1) и фрагмента вакуумной системы (ВС) (рис. 2) для того, чтобы вы-



явить наилучший метод для дальнейшего использования его в методике анализа за молекулярных потоков в сложных объектах.

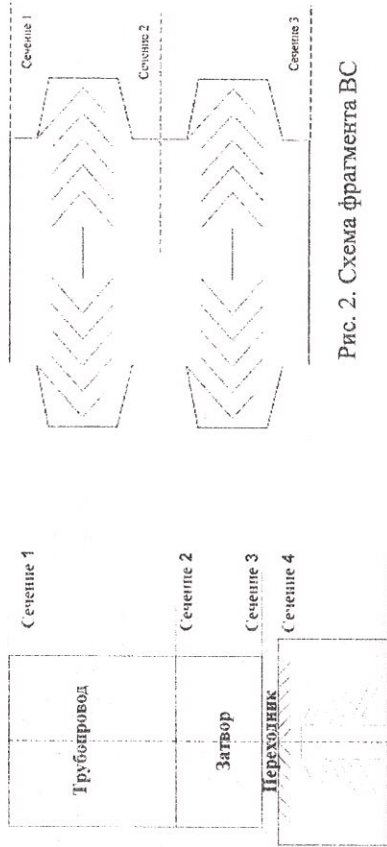


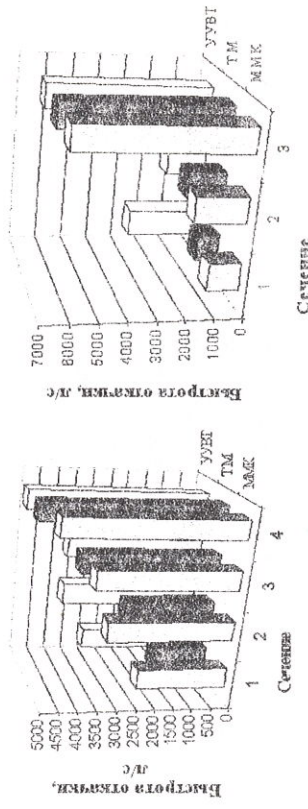
Рис. 2. Схема фрагмента ВС

Рис. 1. Схема многокомпонентной ВС

Для расчета применяются методы, рассмотренные ранее в главе 1. Все элементы этих систем являются реальным вакуумным оборудованием.

Представлено описание используемого оборудования, а также проведены расчеты данных систем разными методами и сравнение полученных результатов.

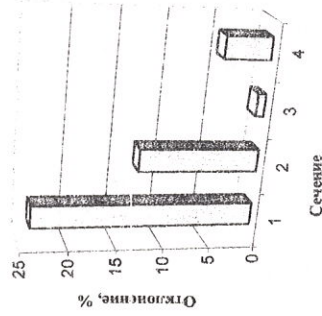
Приведенное сравнение показало (рис. 3,4), что наиболее точный результат (близкий к паспортным данным), дает метод пробной частицы (ММК). Наибольшее отклонение от него дает метод расчета по аналогии с электрическими цепями (ТМ) и метод, основанный на универсальном уравнении вакуумной техники (УУВТ).



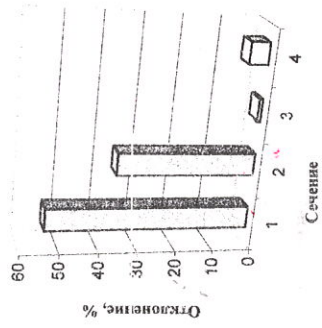
а. Расчет многокомпонентной ВС  
 б. Расчет фрагмента ВС  
 Рис. 3. Результаты расчетов быстроты откачки в сечениях вакуумной системы с использованием разных методов

Для приблизительных расчетов суммарной проводимости можно применять традиционный метод. Использование метода, основанного на универсальном уравнении вакуумной техники более эффективно, чем применение традиционного (Дэшмановского) подхода.

Поэтому, наиболее простым и эффективным методом расчета для анализа вакуумной системы при свободномолекулярном режиме течения является метод пробной частицы.



а. Отклонение УУВТ от ММК



б. Отклонение ТМ от ММК

Рис. 4. Отклонение результатов, полученных разными методами от метода пробной частицы

В третьей главе разработан и создан экспериментальный стенд (модельная установка) для определения значения уровня газовой выделенности различных материалов методом накопления, состоящий из вакуумной камеры, безмасляных средств откачки и измерительной аппаратуры. Рассмотрены основные особенности анализа и проектирования сложных вакуумных систем. Показано, что для более точного выявления характеристик и нюансов работы сложных технологических систем на этапе их проектирования, нужно использовать модельные экспериментальные установки. На примере проектирования вакуумной системы модельной установки (рис. 5) показаны основные факторы, которые нужно учитывать при анализе таких систем – газовой выделенности, сложность конструкции, динамическое изменение характеристик. Проведен анализ газовых потоков в камере на примере присоединения высоковакуумных насосов и получена экспериментальная зависимость газовой выделенности от времени откачки.

В результате эксперимента получена зависимость давления от времени откачки  $p(t)$  (рис. 6, а), а также в результате косвенных измерений была получена зависимость газовыделения со стенок камеры (изготовлена из электрополированной нержавеющей стали)  $q(t)$  (рис. 6, б). Данные, полученные в ходе эксперимента, показаны в таблице 1.

Таблица 1

Время, ч	Давление, Па	Поток со стенок камеры, Па $\times$ м <sup>3</sup> /(с $\times$ м <sup>2</sup> )
0	6,91E-04	2,45E-04
0,5	3,94E-04	1,39E-04
1	3,21E-04	1,14E-04
1,5	2,74E-04	9,70E-05
2,25	2,34E-04	8,28E-05

В результате эксперимента также была исследована зависимость времени откачки вакуумной камеры 40 л для различных способов присоединения к ней (рис. 7) турбомолекулярного насоса производительностью 230 л/с. Указанные значения быстрой действия скорректированы с учетом типа присоединения. Данные, полученные в ходе эксперимента, приведены в таблице 2. Показано, что проведение расчета высоковакуумной системы без учета уровня газовыделения может дать ошибку до двух порядков величины.

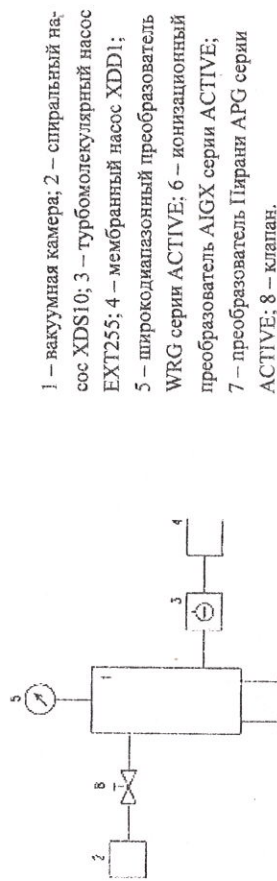
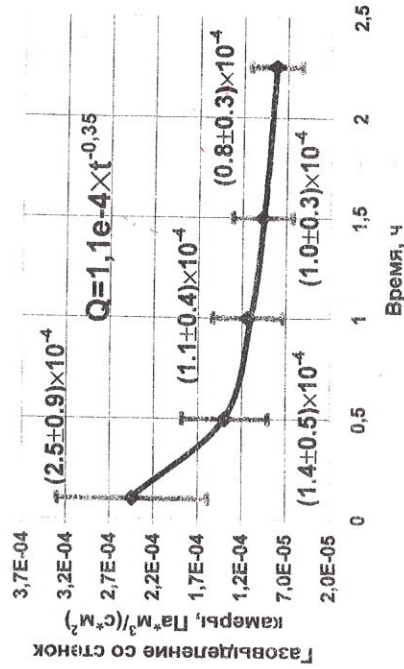


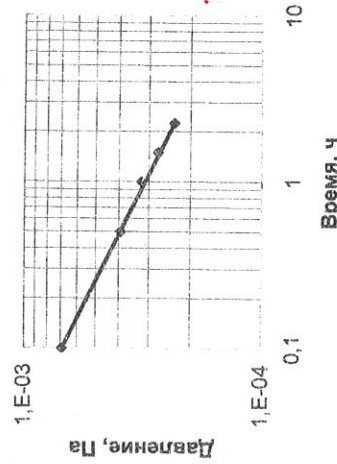
Рис. 5. Схема и внешний вид экспериментального стенда

По результатам экспериментальных исследований можно сделать следующие выводы:

- зависимость газовыделения со стенок электрополированной нержавеющей стали имеет степенной характер;
- при расчете времени откачки необходимо учитывать газовыделение со стенок камеры, поскольку при высоком вакууме ( $P < 10^{-1}$  Па), основной вклад в газовый поток вносит именно этот компонент;
- модельная вакуумная установка позволяет на этапе проектирования получать данные, которые можно использовать при расчете анализируемой системы, и, таким образом, увеличивать точность прогнозирования ее характеристик.



а). Газовыделение со стенок камеры от времени откачки



б). Давление в вакуумной камере от времени откачки

Рис. 6. Зависимость газовыделения со стенок камеры и давления от времени откачки



Преимуществом данной установки является то, что в ней используются современные безмасляные откачные средства, что позволяет более точно анализировать газовые потоки с поверхностей исследуемых объектов без учета влияния паров рабочих жидкостей.

Таблица 2

Время откачки от 1 Па до $5 \times 10^{-4}$ Па в минутах	
ТМН напрямую (S=230 л/с)	2,60
ТМН через сильфон (l=250; d=25 мм) Smmk=6,2 л/с	94,20
ТМН через переходник (l=50; d=25 мм) Smmk=20,2 л/с	28,96
Без учета	С УЧЕТОМ
ГАЗОВЫДЕЛЕНИЯ	ГАЗОВЫДЕЛЕНИЯ
0,02	2,56
0,84	95,19
0,25	29,25

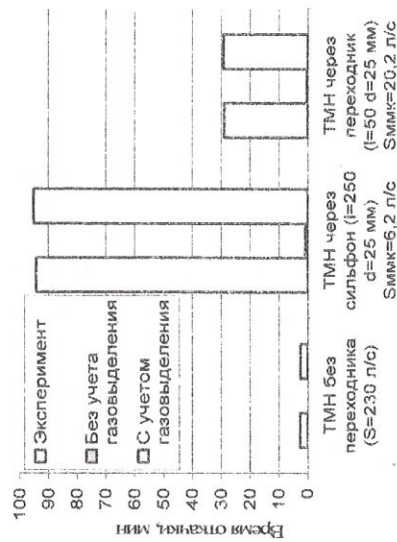


Рис. 7. Зависимость времени откачки камеры от способов присоединения к ней высоковакуумного насоса

Четвертая глава посвящена созданию информационно-аналитической системы для сбора, представления, анализа и управления данными по газовой выделению различных материалов в широком диапазоне условий (рис. 8), которая применяется при анализе имеющихся данных (существующая литература по данной тематике) и может применяться для вновь полученных результатов исследований.

Кроме того, она позволит быстро находить данные по газовой выделению различных материалов в разных условиях для их учета в расчете вакуумных систем, встраивать различные алгоритмы анализа полученного спектра компонентного состава.

Данная задача является актуальной, так как даже в настоящее время не существует автоматизированных средств для ее решения – обычно используется субъективный опыт исследователя, а известные данные разрознены и могут сильно отличаться даже в одинаковых условиях.

Пятая глава посвящена моделированию молекулярных потоков в сложных объемах, разрабатываются предпосылки для построения алгоритма моделирования и сам алгоритм на базе метода пробной частицы, позволяющий анализировать неосесимметричные структуры, имеющие в своем составе произвольно расположенные в пространстве (смененные, наклоненные) поверхности первого и второго порядков.

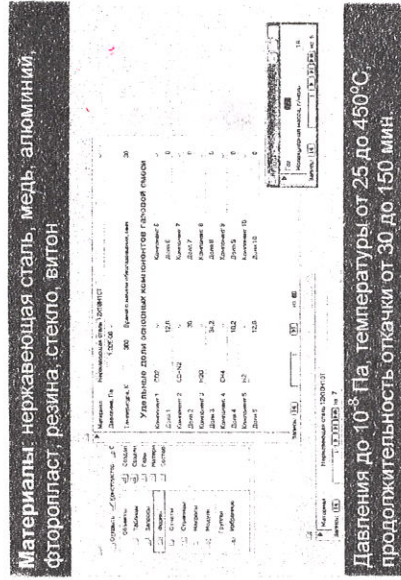


Рис. 8. Система управления данными «ПОТОК»

Для реализации данных возможностей внесены изменения и дополнения в базовые соотношения алгоритма метода. Для обеспечения работы метода пробной частицы с неосесимметричными объектами был добавлен компонент, позволяющий учитывать угловое смещение при старте с поверхностей, которые находятся под углом к продольной оси.

В ряд базовых соотношений внесены следующие изменения:

- в формулы для расчета направляющих косинусов при старте с различных поверхностей (плоскость, цилиндр).
- в формулу для нахождения направляющих косинусов при вылете с различных поверхностей;



- в формулу для нахождения параметра  $t$  при пересечении наклоненного цилиндра  $(x-x_c)^2 \cdot \cos^2 \gamma + (y-y_c)^2 \cdot \sin^2 \gamma = r_c^2$ ;
- в формулу для нахождения параметра  $t$  при пересечении конуса  $(z-c)^2 = \text{ctg}^2 \gamma ((x-x_c)^2 + (y-y_c)^2)$ .

В шестой главе рассматривается применение методики анализа молекулярных потоков в сложных объектах и системах на примере задачи моделирования газовых потоков вблизи космического аппарата и ее отображения с помощью одиночного регистрирующего устройства, перемещаемого с помощью телескопической штанги и поворотной платформы.

Рассматривается традиционная компоновка для экспериментальных исследований молекулярных потоков в открытом космосе (рис. 9), основные особенности, факторы формирования и изменения разреженной газовой среды вблизи космического корабля, а также основные задачи, которые необходимо решить в процессе ее мониторинга.

Полученные ранее экспериментальные данные о характеристиках собственной внешней атмосферы (СВА) позволяют говорить о применимости методов статистического моделирования (метод пробной частицы с возможными модификациями) для анализа экспериментальных данных.

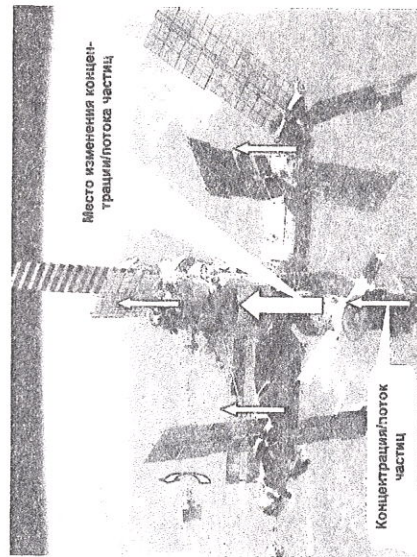


Рис. 9. Традиционная компоновка для экспериментальных исследований молекулярных потоков в открытом космосе

Разработана программа, реализующая алгоритм моделирования молекулярных потоков. В данной главе приведены результаты анализа структуры молекулярных

потоков, а также проведено сравнение полученных результатов. Показана связь данной методики с регистрирующим устройством.

В результате проведенного моделирования молекулярных потоков в сложных объектах было выявлено, что полученные результаты позволяют локализовать источник газового потока с помощью одиночного регистрирующего устройства, которое может перемещаться на телескопической штанге с поворотной платформой (рис. 10). В зависимости от типа перемещения, можно определять как положение источника газового потока, так и его направление (рис. 11).

Согласовывая сигнал реального регистрирующего устройства с результатами моделирования, можно определять характер зафиксированного газового потока - фоновое газоразделение, течь через обшивку космического аппарата, «наводки» от роботы корректирующих двигателей.

Рассматриваются регистрирующие устройства, которые использовались для проведения экспериментов в открытом космосе, выявлены преимущества и недостатки наиболее распространенных типов преобразователей.

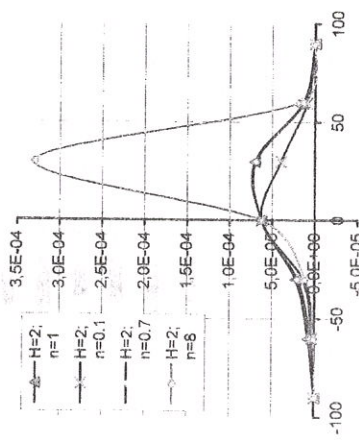


Рис. 10. Моделирование перемещения регистрирующего устройства относительно исследуемого объекта

Рис. 11. Зависимость доли зарегистрированных частиц от угла поворота регистрирующего устройства при различных угловых распределениях

Определены принципиальные отличия данных преобразователей от тех, которые используются в вакуумных установках на Земле.



## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

В рамках данной работы разработана и создана модельная экспериментальная установка для исследования уровня газовойделения различных материалов. Преимуществом данной установки является то, что в ней используются безмасляные средства откачки, которые позволяют обеспечить беспримесную газовую среду, не влияющую на значение уровня газовойделения исследуемых материалов. В результате эксперимента исследована зависимость времени откачки вакуумной камеры от способа присоединения высоковакуумных насосов. Данные эксперимента, близки к расчетным только с учетом значения газовойделения со стенок вакуумной камеры. Традиционные расчеты без учета газовойделения, дают отклонения – в десять и более раз. В результате эксперимента показано, что при подключении высоковакуумного насоса непосредственно к камере, время ее откачки практически не изменяется, при подключении через сиффон – увеличивается в 50 раз, а через переходник в 10 раз.

Впервые разработана информационно-аналитическая система для сбора, представления, анализа и управления данными по газовойделению различных материалов в широком диапазоне условий. Система применяется при анализе имеющихся данных и может применяться для вновь полученных результатов исследований; позволяет встраивать различные алгоритмы анализа полученных данных; включает в себя значения уровня газовойделения и компонентный состав различных материалов (неравнющая сталь, медь, алюминий, фторопласт, резина, стекло, витон) и условия проведения эксперимента (давления до  $10^{-8}$  Па, температуры от 25 до 450°C, продолжительность откачки от 30 минут до 250 часов).

Разработана методика анализа молекулярных потоков в сложных объектах и системах с учетом газовойделения исследуемых поверхностей. На ее основе создана программа с использованием метода пробной частицы, в базовые соотношения которого внесены изменения. В результате моделирования молекулярных потоков выявлено, что данная методика позволяет с помощью ограничения количества активных данных формировать и отслеживать относительные распределения потоков и концентраций частиц в исследуемом объеме с помощью одиночного регистрирующего устройства. В зависимости от типа герметичности, можно определять как положение источника газового потока, так и его направление. Согласовывая сигнал реального регистрирующего устройства с результатами моделирования и уровнем газовойделения исследуемых объектов, можно определять характер зафиксированного газового потока.

Выработаны рекомендации по разработке конструкции регистрирующего устройства для мониторинга собственной внешней атмосферы космического аппарата: определены принципиальные отличия данных устройств от тех, которые используются в вакуумных установках на Земле.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ ИЗЛОЖЕНО В СЛЕДУЮЩИХ РАБОТАХ:

1. Нестеров С. Б., Асташина М. А., Васильев Ю. К. Анализ различных методов расчета многокомпонентных вакуумных систем. // *Вакуумная техника и технология*, 2004. – Т. 14. – № 4. – С. 213-219.
2. Нестеров С. Б., Асташина М. А., Васильев Ю. К. Обзор методов и результатов исследований уровня газовойделения материалов в вакууме. // *Вакуумная техника и технология*, 2007. – Т. 17. – № 2. – С. 97-102.
3. Нестеров С. Б., Асташина М. А., Незнамова Л. О., Васильев Ю. К. Задачи и методы исследования среды разреженного газа вблизи космического аппарата. // *Вакуумная техника и технология*, 2007. – Т. 18. – № 3. – С. 183-186.
4. Асташина М. А., Васильев Ю. К., Нестеров С. Б. Расчетно-экспериментальное исследование характеристик разреженного газа на примере модельной установки. // *Вакуумная техника и технология*, 2009. – Т. 19. – №2.
5. Асташина М. А., Васильев Ю. К., Нестеров С. Б. Использование различных методов расчета для исследования параметров вакуумного оборудования в разных режимах течения // *Материалы второй Российской студенческой научной технической конференции «Вакуумная техника и технология»*. – Казань: КГТУ. – 2005. – С. 24-25.
6. Асташина М. А., Нестеров С. Б. Расчетно-экспериментальное исследование газозовых потоков в вакуумных системах. // *Материалы XIII научно-технической конференции с участием зарубежных специалистов «Вакуумная наука и техника»*. Под редакцией доктора технических наук, профессора Быкова Д. В. – М.: МГИЭМ. – 2006. – С. 321-323.
7. Асташина М. А., Васильев Ю. К., Нестеров С. Б. Расчетно-экспериментальное исследование характеристик разреженного газа в приложении к сложным технологическим системам. // *Материалы третьей Российской студенческой научной технической конференции «Вакуумная техника и технология»*. – Казань: КГТУ. – 2007. – С. 29-31.



8. Асташина М.А., Нестеров С.Б. Исследование и анализ вакуумных свойств материалов для моделирования структуры газовой атмосферы около космического корабля. // Материалы XIV научно-технической конференции с участием зарубежных специалистов «Вакуумная наука и техника». Под редакцией доктора технических наук, профессора Быкова Д.В. – М.: МГИЭМ. – 2007. – С. 51-55.
9. Асташина М.А., Васильев Ю.К., Нестеров С.Б. К вопросу о моделировании структуры молекулярных потоков, формирующих атмосферу вблизи космического корабля. // Материалы 4-ой международной научно-практической конференции «Криогенные технологии и оборудование. Перспективы развития». – Москва. – 2007. – С. 26-27.
10. Асташина М.А., Нестеров С.Б., Васильев Ю.К. Определение источника газозыводения в условиях сложной структуры вакуумной системы. // Сборник научных трудов научной сессии МИФИ-2008. – М.: МИФИ. – 2008. – Т. 2. – С. 45-46.
11. Асташина М.А., Васильев Ю.К., Нестеров С.Б. Вопросы об обеспечении безопасности космических полетов в условиях техногенного загрязнения околоземного космического пространства. // Материалы III международной научно-технической конференции «Вакуумная техника, материалы и технология». Под редакцией доктора технических наук, профессора Нестерова С.Б. – М.: ОМР. ПРИНТ – 2008. – С. 69-70.
12. Асташина М.А., Нестеров С.Б., Васильев Ю.К. Методика обработки результатов мониторинга газовой среды вблизи поверхности космического аппарата. // Материалы XIV международной научно-технической конференции «Высокие технологии в промышленности России». – М.: ОАО ЦНИИ «Техномаш». – 2008. – С. 331-334.
13. Асташина М.А., Васильев Ю.К., Нестеров С.Б. Влияние условий взаимодействия газа с поверхностью космического аппарата на результаты мониторинга его собственной внешней атмосферы. // Материалы XV научно-технической конференции с участием зарубежных специалистов «Вакуумная наука и техника». Под редакцией доктора технических наук, профессора Быкова Д.В. – М.: МГИЭМ. – 2008. – С. 50-51.
14. Асташина М.А., Нестеров С.Б. Расчетно-экспериментальное исследование характеристик разреженного газа на примере модельной установки. // Материалы XV ежегодной международной научно-технической конференции студентов и аспирантов «РАДИОЭЛЕКТРОНИКА, ЭЛЕКТРОТЕХНИКА И ЭНЕРГЕТИКА», М.: МЭИ. – 2009. – Т. 3. – С. 69-71.