

На правах рукописи

Васильева Татьяна Сергеевна

ГАЗОВЫЕ ПОТОКИ В ГЕОМЕТРИЧЕСКИ СЛОЖНЫХ КРИОВАКУУМНЫХ СИСТЕМАХ

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-2006

ИТ  
15.04.03

Работа выполнена в ГОУ ВПО «Московский энергетический институт (технический университет)» на кафедре инженерной теплофизики

Научный руководитель: доктор технических наук,  
профессор Нестеров Сергей Борисович

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор  
Быков Дмитрий Васильевич

кандидат технических наук, доцент  
Никулин Николай Константинович

Ведущая организация: Казанский Государственный технологический университет

Защита состоится 19 мая 2006 года в 11:30 на заседании диссертационного совета Д 212.157.04 при Московском энергетическом институте (техническом университете) по адресу: Москва, Красноказарменная ул., д. 17, корп. Т, кафедра инженерной теплофизики, комн. Т-206

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке Московского энергетического института (технического университета).

Автореферат разослан 18 апреля 2006 г.

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

Ученый секретарь  
диссертационного совета Д 212.157.04  
к.ф.-м.н., доцент

Мика В.И.



## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Вместе с активным развитием вакуумного оборудования и постоянным расширением областей его использования современные наука и технология предъявляют новые требования к процессам разработки и эксплуатации вакуумных систем. Это ведет к активному развитию подходов проектно-конструкторской работы – прежде всего, к повышению значения проектировочных расчетов и численных экспериментов, что позволяет с одной стороны уменьшить время разработки решения, а с другой – снизить затраты на исчерпывающие натурные экспериментальные исследования на этапе проектирования, ограничившись лишь теми вариантами, которые показали лучшие результаты в ходе проектировочных расчетов. Существующие подходы позволяют проводить анализ характеристик разреженного газа в сложных системах при свободномолекулярном и вязкостном режимах течения. Методики для анализа молекулярно-вязкостного режима течения газа менее развиты и ограничиваются аналитическими подходами, использующими полуэмпирические зависимости, позволяющие рассчитывать лишь простые системы, или численными решениями, использование которых для анализа реальных вакуумных систем ограничивается вычислительными затруднениями.

Также необходимо отметить отсутствие сбалансированности и последовательности в применении экспериментальных средств при проектировании – зачастую разрабатываемые системы проектируются, опираясь только на экспериментальный материал, что существенно удорожает конечный продукт.

Кроме этого, многие из существующих подходов не являются универсальными, потому что не редко требуют значительной перестройки алгоритмов при изменении условий расчета – трансформации режимов течения во времени или на протяжении системы, граничных или начальных условий. Универсальность алгоритмов расчета становится особенно актуальной в современных условиях все более расширяющегося спектра задач применения вакуума – нанотехнология, где требуется максимальный учет сложной геометрии реальной поверхности и протекающих на ней процессов; микроэлектроника, где также наряду со сложной геометрией присутствуют различные химические процессы, требующие определения сложных граничных условий; ускорительно-накопительные комплексы и термоядерная энергетика, где вместе с учетом сложной и масштабной структуры необходимо анализировать системы в существенно неравновесных и динамически изменяющихся условиях.

Эти причины обуславливают необходимость развития таких идей и методов



проектировочных расчетов сложных вакуумных 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 вакуумной системы и обладают достаточным потенциалом с точки зрения их автоматизации и использования в технологическом процессе разработки и изготовления оборудования. Нужно отметить также, что важным звеном метода исследования является его комплексность, как с точки зрения анализа системы на разных уровнях детализации — от отдельных элементов до всей системы в целом, так и с точки зрения учета всего спектра технико-эксплуатационных и функциональных факторов, формирующих условия работы вакуумного оборудования.

**Цель работы.** Всесторонний анализ оборудования систем создания и поддержания вакуума, как с технико-экономических, так и с проектно-эксплуатационных позиций с целью выявления основных особенностей процессов разработки, проектирования, модернизации и эксплуатации.

Обзор и сравнительный анализ существующих подходов к проектированию и расчету вакуумного оборудования.

Обзор и сравнение методик экспериментальных исследований различных характеристик вакуумных систем и их элементов.

Разработка на основании проведенного анализа метода комплексного исследования вакуумных систем на этапе проектирования и/или модернизации, включающего методику расчета с учетом всех технико-эксплуатационных факторов, и алгоритмы экспериментальных исследований систем на разных уровнях детализации с целью сравнения с результатами анализа и при необходимости корректировки моделей расчетов.

Определение основных особенностей, необходимых для проведения высокоточных экспериментальных исследований и создание на этой основе установок для таких экспериментов.

Проведение прецизионных экспериментальных исследований характеристик вакуумных систем в различных условиях.

Иллюстрация предлагаемой методики на ряде актуальных задач вакуумной техники и технологии — определение характеристик различного вакуумного оборудования, а также комплексный анализ и разработка на его основе улучшенных конструкций.

Сведение совокупности всех алгоритмов и технологий в единый продукт — инструмент, позволяющий проектировщику в кратчайшие сроки проводить исчерпывающий анализ и на его основе разрабатывать более совершенные конструкции вакуумных систем без необходимости осваивать множество расчетных и экспериментальных методов исследований.

**Научная новизна.** Обобщены современные представления о применении разных методов для анализа различных параметров сложных вакуумных систем. Выявлены характерные типы задач, решенные этими методами, и определены, таким образом, основные области их использования для разных приложений.

Впервые разработана и реализована установка для проведения высокоточных экспериментальных исследований вакуумных систем и на основе известных методик для нее созданы методы определения характеристик разреженного газа.

Впервые проведены прецизионные (с погрешностью не более 5%) экспериментальные исследования характеристик длинного цилиндрического трубопровода. При этом формировались условия, когда в разных частях системы реализовывались и изменялись во времени различные характеристики разреженного газа.

На базе метода статистических испытаний разработан ряд решений и дополнений, позволяющих проводить исследование характеристик потоков частиц в сложных вакуумных системах с учетом их структурной сложности, неравновесности, нестационарности протекающих процессов. Разработаны алгоритмы, которые позволяют автоматизировать предлагаемую методику для ее использования в актуальных задачах проектирования. На их основе впервые реализован программный комплекс, позволяющий с одной стороны использовать все предыдущие наработки в области анализа вакуумного оборудования статистическими методами, а с другой дополнить их следующими возможностями:

- автоматическое формирование нескольких вариантов конфигурации системы по заданному пользователем критерию;
- анализ тепловых характеристик системы и использование его результатов при исследовании параметров потоков частиц;
- проведение исследований системы с различными уровнями детализации: как отдельных элементов, так и всей системы в целом;
- С использованием разработанного программного комплекса, имеющего модульную расширяемую структуру, впервые были решены следующие практические и исследовательские задачи: анализ конструкции и улучшение вакуумных характеристик ловушки, используемой для ограничения потока масла в



отключаемый объем; определение тепловых параметров вакуумных ловушек; расчет теплопритоков и подбор холодильной машины для улучшения эксплуатационных характеристик и снижения стоимости содержания.

Проанализированы методы расчета сложных трубопроводных систем и даны рекомендации по их практическому использованию.

**Практическая ценность.** Предложенная система алгоритмов и реализации подхода к комплексному исследованию вакуумных систем на этапе проектирования и/или модернизации, позволяют проводить всесторонний анализ широкого спектра современных сложных вакуумных систем.

Кроме того, полученные в ходе решения актуальных задач вакуумной науки и техники наработки и рекомендации могут быть использованы при проектировании и модернизации вакуумного оборудования.

Предложенные алгоритмы и реализованный на их основе программный комплекс используются в учебном процессе на кафедре низких температур при чтении курса лекций «Расчет сложных вакуумных систем» и «Криовакуумная техника».

Элементы программного комплекса применяются при анализе сложного вакуумного оборудования в НИИ вакуумной техники им. С. А. Векшинского, ОАО «Вакууммаш» (Казань, Россия), ООО НТК «Криогенная техника» (Омск, Россия), а также в компаниях Tojsoold Systems Inc. (США) и ВОС Edwards (Великобритания).

Разработанный единый комплекс программ, рекомендованный к использованию Российским научно-техническим вакуумным обществом для разработчиков и проектировщиков вакуумной техники, позволяет 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. Модульная конструкция программного комплекса позволяет практически неограниченно расширять его возможности путем простого дополнения новыми алгоритмами.

Разработанная экспериментальная установка может использоваться для проведения высокоточных экспериментальных исследований вакуумного оборудования при проектировании и модернизации.

#### **Автор защищает**

– Разработанные и адаптированные решения, которые легли в основу установки для высокоточных экспериментальных исследований характеристик вакуумных систем.

– Основные принципы, структуру и конструкцию созданной экспериментальной

установки для проведения высокоточных исследований (с точностью около 5 %) характеристик вакуумного оборудования.

– Данные экспериментальных исследований характеристик элементов вакуумных систем. Тарировочные кривые, которые могут быть использованы для тестирования расчетных методов.

– Результаты сравнительного анализа различных методов расчета сложных вакуумных систем и выявленные характерные особенности использования этих методов для разных приложений.

– Реализацию разработанной системы алгоритмов в качестве единого комплекса программ, позволяющего проводить проектировщику исследование характеристик вакуумных систем без необходимости осваивать сложные и разветвленные методы анализа.

– Результаты решения с помощью созданного программного комплекса ряда актуальных задач физики вакуума, вакуумной техники и технологии.

**Достоверность полученных результатов.** Достоверность полученных результатов расчетов подтверждается проведенным тестированием разработанных алгоритмов на большом количестве широко известных задач и сравнением с результатами экспериментальных исследований. Кроме этого, достоверность полученных экспериментальных результатов подтверждается наличием необходимых сертификатов соответствия.

**Апробация работы.** Основные положения работы обсуждались на VII–X научно-технических конференциях студентов и аспирантов «Радиоэлектроника, электротехника и энергетика» 2001–2004 гг. (МЭИ, Москва), на IX и X международных студенческих конференциях «Новые информационные технологии» 2001, 2002 гг. (Судак), на VIII–XII научно-технических конференциях «Вакуумная наука и техника» 2001–2005 гг. (Судак), на международных молодежных конференциях «Гагаринские чтения» 2001, 2003–2005 гг. (МАТИ, Москва), на I и II российских студенческих научно-технических конференциях «Вакуумная техника и технология» 2003 и 2005 гг. (Казань), на итоговой научно-технической конференции «Всероссийский конкурс на лучшие научные работы по естественным, техническим наукам и инновационным научно-образовательным проектам» 2004 г. (Москва), на VIII и IX Научных сессиях МИФИ–2005 и 2006 (Москва), на VI международной научно-практической конференции «Современные информационные и электронные технологии» (Одесса, Украина), 2005.

По итогам участия в различных конкурсах автор поощрен медалью и тремя дипломами Министерства Образования РФ за лучшую научную студенческую



работу, дипломом 2-й степени на IX международной научно-технической конференции студентов и аспирантов «Радиоэлектроника, электротехника и энергетика», ценным подарком за второе место на X международной молодежной конференции «Гагаринские чтения», дипломами 1-й и 2-й степени Российского научно-технического Общества на I и II российских студенческих научно-технических конференциях «Вакуумная техника и технология», по итогам 2002, 2003 и 2004 года стипендиями Правительства и Президента РФ.

**Публикации.** По теме диссертации имеется 33 печатные работы, в том числе 10 статей и 23 тезиса докладов.

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, шести глав и заключения и имеет объем 134 стр., включая 68 рисунков, 11 таблиц и приложения. Библиография включает 126 наименований.

#### 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** на основе изученных данных по современному подходу к проектированию, предлагается комплексный метод для анализа характеристик сложных вакуумных систем.

Самыми заметными тенденциями изменения подходов к проектированию являются:

- стремление производителей к унификации и стандартизации производимых вакуумных систем, чтобы предложить максимально широкие и гибкие решения потребителям путем дополнения и развития их вакуумных систем, и снизить собственные издержки на создание и модификацию вакуумного оборудования;
- универсализация вакуумных систем. При разработке какого либо агрегата производитель старается заложить в него максимальный потенциал, с тем, чтобы в результате было создано универсальное решение, которое может быть использовано в различных приложениях;
- необходимость предусматривать возможности дальнейшей значительной модернизации агрегатов с целью увеличения времени жизни продукта;
- увеличение доли предварительных проектировочных расчетов разных вариантов конструкции.

На основе проведенного анализа с учетом основных особенностей современного

процесса проектирования, разработан комплексный подход для исследования характеристик вакуумных систем на этапе проектирования и/или модернизации. Он включает методику предварительного анализа как системы в целом, так и ее отдельных элементов с учетом всех технико-эксплуатационных факторов, а так же экспериментальные исследования системы на разных уровнях детализации с целью сравнения с результатами расчетов и при необходимости корректировки моделей расчетов.

Алгоритм предложенного подхода можно разделить на следующие этапы:

1. Определение конфигурации системы, условий взаимодействия газа с поверхностями и характеристик этих поверхностей (эмиссивность, газовыделение, температура и др.).
2. Определение начальных условий расчета (режим течения, начальные распределения концентрации, температур и др.).
3. Формирование нескольких аналогичных конфигураций для выбора из них той, которая имеет лучшие характеристики.
4. Расчет вакуумных и тепловых параметров вакуумной системы. Определение их взаимного влияния друг на друга. Определение лучшей конфигурации системы по заданным критериям. Определение наиболее ответственных частей проекта. Формирование исходных предпосылок, необходимых для проведения экспериментальных исследований на этапе проектирования.
5. Экспериментальные исследования проектируемой системы с учетом особенностей, выявленных на предыдущих этапах в процессе проектировочных расчетов.

Преимуществами такого подхода является то, что процесс проектирования/модернизации вакуумного оборудования начинается с расчетов его основных характеристик, определения наиболее ответственных частей проекта. И только после проведения исчерпывающего анализа параметров вакуумного оборудования, на основании его результатов на последнем этапе выполняются экспериментальные исследования. Это позволяет ускорить процесс разработки продукта благодаря широкой автоматизации проектирования. А так же снизить технологические и экономические затраты за счет проведения глубоких экспериментальных исследований только в ответственных частях проекта, выявленных в ходе проектировочных расчетов.

**Вторая глава** посвящена обзору известных методов расчета характеристик вакуумных систем в различных режимах течения, с целью выработать такие расчетные методики, которые позволят проводить исчерпывающие исследования



характеристик вакуумных систем с учетом всех факторов, влияющих на их работу. Для реализации расчетной части подхода, предложенного в первой главе, необходимо подобрать такие алгоритмы, которые можно максимально автоматизировать и которые дают более полные и точные результаты.

Существующие теоретические методы не позволяют в общем случае достоверно определять проводимость элементов вакуумных систем сложной геометрической конфигурации в переходном режиме течения. Степень достоверности получаемых результатов зависит от адекватности выбранной модели течения разреженного газа физике процессов переноса и удачно подобранной методики решения. Это вызывает, как правило, необходимость дальнейшей проверки точности полученных решений в сравнении с экспериментом.

Трудности при расчете проводимости во всем диапазоне молекулярно-вязкостного режима привели к условному разделению на области вблизи молекулярного и вблизи вязкостного режимов течения.

В области вязкостного режима для математического описания используются методы динамики сплошной среды. Уравнения состояния газа преобразуются с учетом эмпирических коэффициентов, в связи с чем требуется дальнейшее уточнение решений при натурных экспериментах.

В области течения, где необходимо учитывать первые межмолекулярные столкновения, можно применить метод Монте-Карло. Однако при значении  $Kn < 1$  нельзя ограничиваться первыми столкновениями и анализ существенно усложняется.

**В третьей главе** проведен краткий обзор существующих экспериментальных методов определения характеристик вакуумных систем.

Основными характеристиками, влияющими на функционирование вакуумной системы, являются значения потока и давления разреженного газа в различных точках.

Проанализированы основные особенности методов определения значения газового потока в системе. Более простым и универсальным методом измерения потоков с чувствительностью порядка  $10^{-7}$  торр\*л/с является метод, в котором используют калиброванное сопло и два манометрических датчика. Измерение малых потоков с чувствительностью порядка  $10^{-10}$  торр\*л/с может быть обеспечено применением метода накопления с анализом динамики изменения давления во времени.

Таким образом, самыми удобными в использовании подходами измерения потока является комбинация методов калиброванного сопла и накопления, что с

одной стороны повышает точность получаемых результатов, а с другой — позволяет проводить измерения в широком диапазоне значений газового потока.

Поскольку измерения давления газов носят непосредственный характер, то рассматривались основные типы вакуумметров: тепловые, электронные ионизационные, магнитные газоразрядные, емкостные высокоточные датчики давления.

Самым точным средством измерения давления газа является вакуумметр емкостного типа, который кроме высокой точности обеспечивает независимость проводимых исследований от типа и состава газа. Поэтому его использование в экспериментальных установках позволяет добиваться высокой точности измерений в широком диапазоне давлений — от  $10^3$  до  $10^{-6}$  торр с точностью от 0,25% до 0,05% от показания, то есть обеспечивать исследования во всех режимах течения разреженного газа.

**Четвертая глава** посвящена экспериментальным исследованиям вакуумных систем. Предложена экспериментальная установка (рис. 1), которая состоит из следующих частей: система натекания газа внутрь исследуемого участка; исследуемый участок вакуумной системы, снабженный приборами для измерения давлений во входном и выходном сечениях; вакуумная емкость известного объема с датчиком давления, присоединяемая к исследуемому участку через калиброванную диафрагму; система откачки.

В рамках разработки данной установки был сделан ряд нововведений, позволяющих говорить о высокой степени точности получаемых результатов:

- использование современных высокоточных средств измерения давления емкостного типа Baratron с погрешностью 0,2% от показания;
- наличие калиброванного объема, много большего, чем объем исследуемого участка позволяет с одной стороны использовать метод натекания газа в калиброванный объем для определения значения потока, а с другой — избежать возможных концевых эффектов в системе и снизить до пренебрежимо малого значение нестабильных режимов работы вакуумного насоса;
- в рамках метода натекания газа в

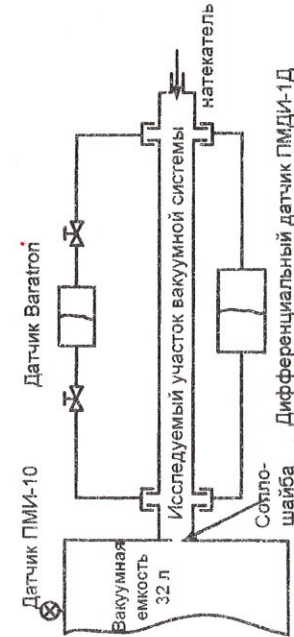


Рис. 1. Схема экспериментальной установки.



калиброванный объем проводилось измерение «паразитных» натеканий при отсутствии откачки и натекания из анализируемого участка, что существенно увеличило точность и повторяемость результатов;

- параллельно использовались два метода определения значения потока газа через систему — метод накопления в калиброванный объем и метод калиброванного сопротивления и двух манометрических датчиков, что также давало возможность дополнительной проверки;

- перед и после исследований проводились проверки всех используемых средств измерения и с учетом этих данных анализировались полученные результаты;
- специально разработанная система измерения давления также содержала в себе дублирующие возможности, причем измерялись как абсолютные, так и относительные величины.

В рамках данной работы совместно с Центральным аэрогидродинамическим институтом им. Н. Е. Жуковского по предложенной схеме была реализована установка для проведения высокоточных измерений характеристик вакуумного оборудования и были выполнены экспериментальные исследования.

С помощью вакуумного натекателя, позволяющего задавать малые потоки, из атмосферы в исследуемый участок вакуумной системы поступает газ. В проведенных экспериментах в качестве исследуемого участка использовались длинные трубопроводы с отношениями  $L/d=167$  и  $L/d=250$ . Эти параметры позволяют достигать условий, при которых на входе и на выходе трубопровода реализуются разные режимы течения газа.

Измерение перепада давления на участке проводим дифференциальным датчиком ПМДИ-1Д. Абсолютное давление на входе и на выходе из трубопровода определяем датчиком Baraton, который с помощью системы клапанов включается в ту или иную часть магистралей. Кроме непосредственного измерения давлений можно контролировать и согласовывать показания различных датчиков.

Значение потока определяются методами калиброванного сопротивления и натекания в постоянный объем. Поток находится по перепаду давления в вакуумной емкости известного объема:

$$Q = \frac{\Delta P}{\Delta t} V,$$

где  $\Delta P$  — изменение давления в объеме  $V$  за время  $\Delta t$ . При этом  $\Delta P$  рассчитывалось с учетом «паразитного» натекания в системе:  $\Delta P = \Delta P_{\text{натек}} - \Delta P_{\text{изм}}$ , здесь  $\Delta P_{\text{изм}}$  — измеренная величина изменения давления, а  $\Delta P_{\text{натек}}$  — величина изменения давления за счет постороннего натекания, полученная в системе с перекрытой системой

напуска газа.

После этого с использованием соотношения  $U = \frac{Q}{(P_2 - P_1)}$  определяли проводимость, где  $(P_2 - P_1)$  измеряли с использованием дифференциального датчика.

Тарировку измерительной аппаратуры, использованной в экспериментах, выполняли на стенде для градуировки вакуумметров, погрешность которого составляет не более 2% в диапазоне давлений  $10^{-1} - 9 \cdot 10^4$  Па.

Кроме того, после снятия экспериментальных точек измеряется значение «паразитного» натекания в вакуумную емкость, обусловленного наличием микрогечей и других возможных факторов. Для этого измеряется изменение давления во времени в вакуумной емкости с перекрытым натекателем.

Относительная погрешность полученных результатов не более 5%.

Результаты экспериментов для трубопровода  $L=1000$  мм,  $d=6$  мм показаны на рис. 2, 3. Там же даны результаты расчетов характеристик этого трубопровода с помощью классического соотношения Кнудсена и методом пробной частицы, используемым в свободномолекулярной области. При этом в рамках эксперимента реализовывались условия, когда в разных частях трубопровода режимы течения газа различны: например, на входе в трубопровод давление  $P_1 \approx 35$  мкм рт. ст. ( $Kn \approx 0.15$  переходный режим течения), а на выходе  $P_2 \approx 5$  мкм рт. ст. ( $Kn \approx 1$  граница молекулярного и переходного режимов).

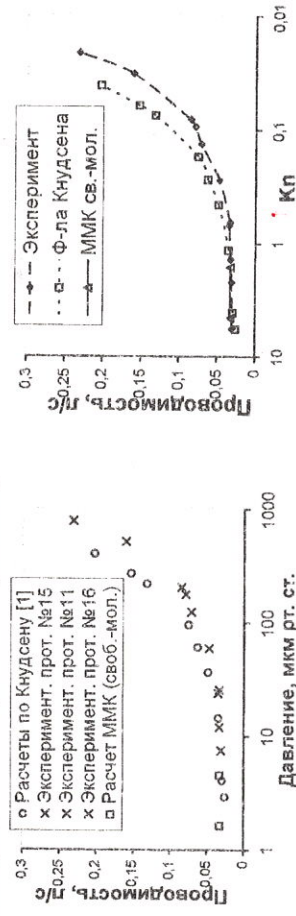


Рис. 2. Зависимость проводимости от трубопровода ( $L=1000$  мм,  $d=6$  мм) от давления.

Сравнение показывает, что существуют отличия результатов экспериментов для трубопровода  $L/d=167$  от расчетных данных с помощью аналитической зависимости в области начала вязкостного режима течения газа. По-видимому, это вызвано большим числом допущений при выводе аналитических соотношений для расчета



проводимости цилиндрического трубопровода. Кроме того, в приведенных результатах эксперимента не наблюдается явления «парадокса Кнудсена» - минимума зависимости проводимости от давления в области  $Kn \approx 1$ .

В результате проведенных исследований такого минимума зафиксировано не было. Это может быть связано с тем, что в рамках данного эксперимента моделировались условия, когда в разных частях трубопровода реализуются разные режимы течения, в то время как традиционные исследования проводились в условиях постоянства режимных характеристик разреженного газа на протяжении трубопровода и при малых потоках. Таким образом, увеличение потока при переходе от молекулярного к переходному режиму течения газа «сглаживает» зависимость проводимости от давления и явление «парадокса Кнудсена» не наблюдается.

**В пятой главе** приводятся описание доработанного программного комплекса для расчета параметров вакуумных систем, а так же тестирование результатов, полученных с его помощью, на реальных задачах вакуумной науки и техники.

На базе проанализированных существующих подходов и разработанных алгоритмов реализована совокупность инструментов, позволяющих проводить исследование всего комплекса характеристик вакуумных систем на этапах проектирования и модернизации.

Основным модулем разработанного программного комплекса является модуль для построения конфигурации системы, в котором пользователь, аналогично известным САД-системам, рисует вакуумную систему.

Для того, чтобы уменьшить время и облегчить пользователю процесс оптимизации сложных конструкций, в разработанной надстройке программного комплекса предусмотрена возможность автоматического задания изменяемой части конструкции, пределов ее изменения и количество шагов, за которое их необходимо произвести. Для всех сформированных конфигураций программа производит расчет и выдает данные в виде таблицы, с указанием максимального и минимального значения параметров.

Для выполнения предварительного анализа характеристик вакуумной системы был создан модуль экспресс-анализа. Его функция заключается в построении кривой откачки - зависимости давления в откачиваемом объеме от времени откачки для заданной вакуумной системы. Пользователь задает характеристики вакуумной камеры и откачной системы. Кроме того, определяется значение газовой выделенной в камере с использованием известных пользователю данных об объеме и характерном времени откачки в известном диапазоне давлений. С использованием этих данных

строится кривая откачки, и затем пользователь получает возможность, меняя характеристики откачной системы, подбирать характеристики оборудования для более эффективной работы установки. В данном модуле используются как традиционные аналитические соотношения - в областях высоких давлений, так и численные методы (Монте-Карло пробной частицы) в области низких давлений, когда реализуется свободномолекулярный режим течения газа.

Для расчета теплопотоков к различным элементам анализируемой конструкции создан специальный модуль. В нем предусмотрены следующие возможности: автоматизированный расчет характеристик, связанных со структурой анализируемой системы, таких как площади поверхностей, угловые коэффициенты и характерный линейный размер; определяемые пользователем значения температур входного и выходного сечений и поверхностей анализируемой системы, а также значения коэффициентов лучеиспускания для различных поверхностей; также пользователем определяются значения теплоты фазового перехода, значения параметров, необходимых для расчета теплопотока при сорбции, а также среднее значение давления внутри системы для расчета теплопотоков через слой разреженного газа.

В результате расчета пользователь получает долю каждого компонента (излучения, через разреженный газ, сорбцией и т. п.) в общем значении теплопотока к поверхностям анализируемой системы и их распределение.

Тестирование результатов, полученных с помощью предложенного программного комплекса, было проведено как на модельных задачах, так и на примере определения характеристик реальных систем. Сравнение проводилось с данными, полученными другими методами, и с паспортными данными приборов.

Анализ характеристик сложных составных трубопроводов, являющихся частью любой вакуумной системы, есть необходимый компонент комплексного подхода к исследованию характеристик систем создания и поддержания вакуума. Поэтому одной из решенных задач было сравнение проводимости сложного трубопровода, определенной различными методами. По результатам рассмотрения различных как традиционных, так и современных методик анализа характеристик сложных составных трубопроводов можно сказать, что самые широкие возможности имеются у методов, базирующихся на методе Монте-Карло, которые обладают высокой универсальностью и, хотя и не являются самыми простыми в использовании, позволяют создавать на своей основе программные продукты, дающие пользователю возможность всестороннего анализа характеристик сложных составных систем без изучения математического аппарата метода. Современные



развитые аналитические подходы позволяют проводить анализ с меньшими затратами вычислительных ресурсов, однако требуют длительной предварительной подготовки и ограничиваются расчетом систем из компонентов с заранее известными характеристиками, что не дает возможности использовать их при проектировании и модернизации вакуумных систем.

С использованием разработанных алгоритмов был выполнен анализ вакуумных характеристик реального сложного оборудования: ловушки ЛП-250, производства ОАО «Вакууммаш», и крионасоса Marathon 16 компании APD Cryogenics Inc. На рис. 4 показано сравнение паспортных данных ловушки, полученных экспериментально с результатами проведенных расчетов. Экспериментальные данные определяют минимальные значения проводимости в заданном диапазоне

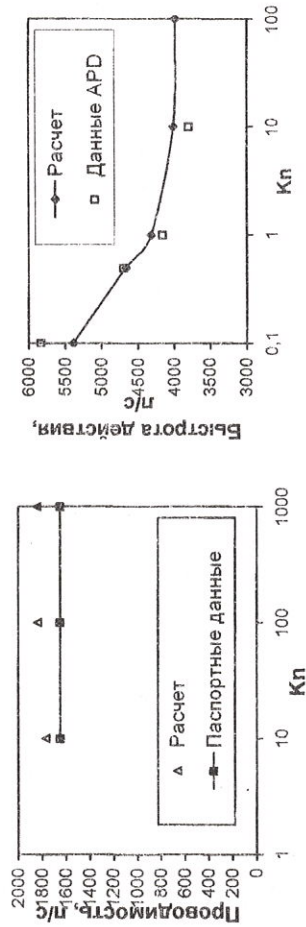


Рис. 4. Ловушка ЛП-250

давления. Рис. 5 иллюстрирует сравнение экспериментальных данных с результатами расчета крионасоса Marathon 16 с помощью разработанных алгоритмов. Сравнение показывает удовлетворительное соответствие результатов расчета и паспортных данных производителя, что позволяет говорить о применимости рассматриваемого подхода для расчета характеристик сложных вакуумных систем.

В шестой главе проводится расчет характеристик высоковакуумных ловушек для диффузионных насосов и крионасосов с целью повышения их эффективности.

Данная часть работы выполнена в рамках совместного проекта с ОАО «Вакууммаш» (Казань, Россия) и ООО НТК «Криогенная техника» (Омск, Россия) по улучшению характеристик вакуумного оборудования. Все расчеты проводились с помощью разработанных средств, описание которых приводилось выше.

Для получения улучшенных характеристик ловушек можно уменьшить температуру охлаждения ее панелей, либо изменить конфигурацию системы. Эффективность каждого из этих способов рассмотрена на примере оптимизации

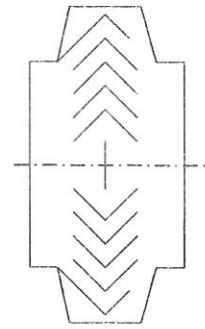


Рис. 6. Схема ЛП-250

к ловушке, которые должны компенсировать такая холодильная машина. Самый заметный вклад вносит теплоприток излучением. При замене охлаждающей воды на охлаждение с помощью холодильной машины, работающей на смеси, машина должна обеспечивать такую холодопроизводительность, чтобы компенсировать значение суммарного теплопритока к ловушке и поддерживать температуру панелей ловушки на уровне 250 К. Для ловушки ЛП-250 такая машина должна обеспечивать холодопроизводительность 100 Вт.

С целью подбора холодильной машины, выполнен технико-экономический анализ рынка систем охлаждения. Рассматривались одноступенчатые поршневые холодильные машины при работе на смеси хладагентов. Проведенный анализ позволяет говорить о снижении стоимости обслуживания данной ловушки по сравнению с традиционной азотной заливной ловушкой. При этом, характеристики с точки зрения защитной способности по маслу существенно выше чем у водяной проточной ловушки, а общая стоимость ниже чем у азотной заливной ловушки, поскольку исключаются затраты на покупку и доставку азота, а также на заработную плату специального персонала, обслуживающего заливные ловушки.

Вторым направлением улучшения характеристик ловушек является изменение их геометрии. Геометрия рабочих поверхностей является компромиссом между максимальной проводимостью ловушки и минимальным потоком паров рабочей жидкости, попадающим в откачиваемый объем. Проанализированы альтернативные конструкции ловушек с углами наклона панелей отличающихся от оригинальных.

При использовании в сочетании с низкотемпературной системой охлаждения лучшей является альтернативная конфигурация с углами наклона панелей 34°, обеспечивающая максимальную проводимость по откачиваемому газу без ухудшения степени захвата паров масла при коэффициентах прилипания, близких к 1. При коэффициентах захвата масла на панелях ловушки, меньших, чем 1 можно использовать альтернативные конфигурации с углами наклона нижних панелей 60° и 55,5°. Данные конструкции хоть и показывают худшие по отношению к оригинальной значения проводимости по откачиваемому газу, но превосходят ее по



степени захвата паров масла в широком диапазоне коэффициентов прилипания.

Анализ возможности улучшения характеристик был проведен для криовакуумных насосов типа НВК. Блок криооткачки такого насоса, состоит из двух частей – панелей защитного экрана и криопанелей второй ступени с нанесенным на них сорбентом. Одной из основных функций экрана является изоляция панелей второй ступени от воздействия легкоконденсируемых газов и от теплопритока излучением из тепловой откачиваемой зоны. Для увеличения ресурса работы второй ступени необходимо снизить теплоприток излучением, попадающий на нее из откачиваемого насоса.

По результатам проведенного анализа можно сделать вывод, что для увеличения ресурса работы крионасоса при откачке плохо откачиваемых газов целесообразно уменьшить угол наклона конических панелей защитного экрана. Это повлечет уменьшение значения теплопритока излучением из тепловой зоны.

#### ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

Проведенный анализ современных представлений о применении разных методов для расчета различных параметров сложных вакуумных систем вместе с обзором текущих тенденций развития вакуумного оборудования позволили выявить характерные типы актуальных задач, решенных этими методами, и определить, таким образом, основные области их использования для разных приложений.

1. В результате предложен метод комплексного исследования вакуумных систем на этапе проектирования и/или модернизации, включающий методику предварительного анализа как системы в целом, так и ее отдельных элементов с учетом всех технико-эксплуатационных факторов, влияющих на ее работу, экспериментальные исследования системы на разных уровнях детализации с целью сравнения с результатами расчетов и при необходимости корректировки моделей расчетов.
2. Разработана и реализована установка для проведения высокоточных экспериментальных исследований проектируемой системы с учетом особенностей и характеристик, выявленных в результате проекторочных расчетов. На основе существующих экспериментальных методов определения характеристик вакуумных систем для этой установки были созданы и реализованы методы и алгоритмы, позволяющие исследовать параметры вакуумного оборудования с высокой точностью.
3. Проведена серия прецизионных экспериментальных исследований характеристик вакуумных систем в различных режимах течения разреженного газа. При этом в системе формировались такие условия, что в разных ее частях реализовывались и

динамически менялись различные режимы течения. Относительная погрешность результата не более 5%. По результатам этих исследований показано, что в условиях больших перепадов давлений явление «парадокса Кнудсена» не наблюдается. Получены тарировочные кривые, которые могут быть использованы для тестирования расчетных методов.

4. На базе метода статистических испытаний разработан ряд решений и дополнений, позволяющих проводить исследование характеристик потоков частиц в сложных вакуумных системах с учетом их структурной сложности, неравновесности, нестационарности протекающих процессов. Разработаны алгоритмы, позволяющие автоматизировать предлагаемую методику для ее использования в актуальных задачах проектирования. На их основе реализован программный комплекс.

5. Тестирование алгоритмов, вошедших в программный комплекс, проведено на примере решения следующих задач: сравнение результатов расчета значения проводимости ловушки ЛП-250 с паспортными данными показало отклонение не более 8%, а результатов анализа характеристик крионасоса Marathon 16 - отклонение не более 12%. Сравнение результатов расчета проводимости длинного цилиндрического трубопровода с экспериментальными данными, полученными в проведенном в рамках данной работы высокоточном эксперименте, показало отклонение не более 6%.

6. С использованием разработанного программного комплекса, решены следующие практические и исследовательские задачи: определена проводимость сложного трубопровода, разработаны на основе комплексного анализа улучшенные конструкции различного вакуумного оборудования (ловушек ЛП и крионасосов НВК).

Таким образом, на основе метода комплексного анализа сложных вакуумных систем, разработан единый универсальный продукт, позволяющий проводить исчерпывающие аналитические и экспериментальные исследования на этапе проектирования /модернизации в сжатые сроки без необходимости освоения и реализации множества расчетных и экспериментальных подходов.

#### ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ ИЗЛОЖЕНО В СЛЕДУЮЩИХ РАБОТАХ:

(Соискатель в списке фигурирует под девичьей фамилией Строгова)

1. Нестеров С. Б., Строгова Т. С. Направления развития САПР вакуумного оборудования // Материалы девятой научно – технической конференции с



- участием зарубежных специалистов «Вакуумная наука и техника». – Сулак, 2002. – С. 373-378.
2. Нестеров С. Б., Строгова Т. С. Анализ подходов к расчету проводимости сложных трубопроводов при молекулярном режиме течения. // Журнал «Вакуумная техника и технология». – 2002. – Т. 12. – № 3. – С. 141-144.
  3. Ануфриева И. В., Васильев Ю. К., Кеменов В. Н., Нестеров С. Б., Строгова Т. С. Современное состояние рынка безмасляных средств откачки. // Вакуумная техника и технология. – 2003. – Т. 13. – № 2. – С. 93-99.
  4. Нестеров С. Б., Строгова Т. С., Васильев Ю. К. Анализ характеристик разреженного газа в сложных системах в переходном режиме течения. // Вакуумная техника и технология. – 2003. – Т. 13. – № 4. – С. 237-242.
  5. Нестеров С. Б., Строгова Т. С., Андросов А. В., Зилова О. С., Васильев Ю. К. Универсальное программное обеспечение для проектирования и анализа сложных вакуумных систем. // Материалы XI Международной научно-технической конференции «Высокие технологии в промышленности России». – М.: ОАО ЦНИТИ «ТЕХНОМАШ», 2003. – С. 242-247.
  6. Нестеров С. Б., Строгова Т. С., Васильев Ю. К. Исследование характеристик разреженного газа в различных режимах течения. // Материалы X Международной научно-технической конференции «Высокие технологии в промышленности России». – М.: ОАО ЦНИТИ «ТЕХНОМАШ», 2004. – С. 247-256.
  7. Васильева Т. С., Васильев Ю. К., Нестеров С. Б., Липин А. В., Титов В. А. Экспериментальные исследования характеристик вакуумных систем в разных режимах течения. // Вакуумная техника и технология. – 2005. – Т. 15. – № 2. – С. 159-162.
  8. Нестеров С. Б., Васильев Ю. К., Васильева Т. С., Андросов А. В., Зилова О. С., Сабирзянов Н. Р. Особенности использования расчетных и экспериментальных методов в приложении к анализу характеристик вакуумного оборудования. // Вакуумная техника и технология. – 2006. – Т. 16. – № 1. – С. 55-62.

Подписано в печать 17.04.06 Зак. 188 Тир. 100 П. л. 12,5  
 Полиграфический центр МЭИ (ТУ)  
 Красноказарменная ул., д. 13