

1551251

Московский ордена Ленина, ордена Октябрьской Революции и ордена
Трудового Красного Знамени
государственный технический университет имени Н.Э.Баумана

На правах рукописи

УДК 621.52

Макаров Константин Анатольевич

**РАЗРАБОТКА УНИВЕРСАЛЬНОЙ МОДЕЛИ
ПРОЦЕССОВ ПЕРЕНОСА ГАЗА КАНАЛАМИ ОГРАНИЧЕННОЙ ДЛИНЫ
В УСЛОВИЯХ ВЫСОКОГО ВАКУУМА**

05.04.06. Вакуумная, компрессорная техника и пневмосистемы

Автореферат

диссертация на соискание ученой степени

кандидата технических наук



Москва 1996

Работа выполнена в Московском ордена Ленина, ордена Октябрьской Революции и ордена Трудового Красного Знамени Государственном Техническом Университете имени Н.Э.Баумана

Научный руководитель: доктор технических наук,
профессор К.Е.Демихов

Официальные оппоненты: доктор технических наук,
профессор С.Б.Свищевский,
кандидат технических наук,
старший научный сотрудник
В.И.Бойцов

Ведущая организация: НИИ вакуумной техники
им. С.А. Векшинского

Защита диссертации состоится "1" июня 1996г. в 14 час. на заседании специализированного Совета К.053.15.07 при Московском Государственном Техническом Университете имени Н.Э.Баумана по адресу: 1070055, г.Москва, Лефортовская наб., д.1, ф-т "Энергомашиностроение"

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МГТУ.

Отзывы в двух экземплярах просим направлять по адресу: 107005, Москва, 2-я Бауманская улица, д.5.

Автореферат разослан "31" мая 1996г.

Ученый секретарь
диссертационного совета К.053.15.07
кандидат технических наук

 В.Н.Козлов

Подп. к печати 27.05.96 Заказ 197 Объем 1 п. Тир. 100 экз.
Типография МГТУ им. Н.Э.Баумана.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Высокий уровень вакуумной техники, особенно в области сверхвысокого вакуума, является необходимым условием для удовлетворения постоянно возрастающих потребностей таких областей промышленного производства как микроэлектроника, атомная и аэрокосмическая техника, а также для решения важнейших научных проблем современной физики: исследование природы элементарных частиц, получение устойчивой реакции термоядерного синтеза и др. Развитие вакуумной техники выдвигает все более высокие требования к высоковакуумным средствам откачки. При сохранении тенденции к усложнению создаваемых систем повышается роль математического моделирования при решении задач оптимизации рабочих и массогабаритных характеристик системы на стадии проектирования.

Задача оптимизации сложной высоковакуумной установки, состоящей из различных элементов, требует разработки единого подхода к описанию рабочих процессов в каждом отдельном элементе, основанного на общей для них системе базовых теоретических положений, адекватной рассматриваемым процессам. Математические модели, создаваемые на основе такого подхода для применения в оптимизационных расчетах, должны отличаться универсальностью, высокой степенью физической строгости и математической корректности наряду с простотой и экономичностью расчетов.

Как правило, использование более строгих физических моделей влечет за собой усложнение используемого математического аппарата и существенно затрудняет проведение практических расчетов, поэтому известные в настоящее время в вакуумной технике модели не в полной мере удовлетворяют перечисленным требованиям.

Цель работы

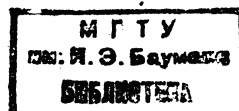
- Создание единой методологии моделирования рабочих процессов, пригодной для описания различных элементов проточной части системы откачки, основанной на простом классическом математическом аппарате дифференциальных уравнений, наполненных новым физическим содержанием, позволяющим учесть характерные особенности свободномолекулярного режима течения откачиваемого газа.

НТБ МГТУ им. Н.Э. Баумана



1551251

Макаров К.А. Разработка ун



- Создание на этой основе математических моделей основных элементов проточной части систем откачки.

- Проверка работоспособности моделей, построенных при использовании разработанного подхода, путем сравнения результатов расчетов с экспериментальными данными и с результатами известных в вакуумной технике теорий.

Научная новизна.

- Предложена модернизация уравнения типа Фоккера-Планка-Колмогорова (ФПК), позволяющая корректно описывать процесс блуждания единственной частицы газа в канале ограниченной длины. Нелокальные эффекты, характерные для свободномолекулярного режима течения, учитываются при этом с помощью членов - аналогов конвективного сноса и объемного поглощения, которые естественным образом появляются в уравнении типа ФПК вследствие ограниченности длины канала.

- Рассмотрены вопросы физической обоснованности разработанного подхода, в частности, предложен способ постановки граничных условий к модернизированному уравнению ФПК.

- Предложен способ описания общего случая взаимодействия элементов системы. В рамках более строгой модели, использующей основное кинетическое уравнение, получены результаты, подтверждающие правомерность использования основного уравнения вакуумной техники в форме, впервые предложенной С.Оутли.

Практическая ценность.

- Разработанный подход позволяет во многих случаях отказаться от сложных и дорогостоящих экспериментальных исследований.

- Разработаны алгоритмы и программы расчета параметров течения разреженного газа в различных каналах ограниченной длины, используемых в вакуумных насосах и системах

- Получена общая форма основного уравнения вакуумной техники, частным случаем которой является соотношение С.Оутли, и обосновано ее применение для решения практических задач при создании с временных вакуумных насосов и систем.

-Использование результирующих соотношений для общей проводимости вакуумной системы позволяет проектировать установки с улучшенными рабочими и массогабаритными характеристиками.

- Разработан алгоритм определения оптимальных параметров активных элементов вакуумных насосов. В результате решения задачи оптимизации геометрической формы сорбционного насоса цилиндрического типа получены результаты, позволяющие в конкретном случае сократить массу используемого сорбента на 44% по сравнению с насосом традиционной формы.

Апробация работы

Основные положения работы обсуждались на II международной конференции "Актуальные проблемы фундаментальных наук"(Москва 1994г.), на международной конференции "Вакуумная наука и техника" (Гурзуф 1994г.), на конференции, посвященной 165-летию МГТУ им. Н.Э. Баумана (Москва 1995г.), на международном конгрессе молодых ученых "Молодежь и наука - третье тысячелетие" (Москва 1996г.).

Публикации

По результатам проведенных исследований опубликовано 4 печатных работы.

Структура и объем диссертации

Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, выводов, списка литературы и приложения. По объему работа состоит из 134 страниц текста, 21 рисунка, 1 таблицы, библиография насчитывает 164 наименования.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность исследуемого вопроса, сформулированы цели и перечислены основные положения, выносимые автором на защиту.

В первой главе представлен обзор наиболее используемых в современной вакуумной технике моделей течения разреженного газа, проведен их сравнительный анализ с точки зрения соответствия требованиям модульного принципа при проектировании систем откачки.

Так, известные представления о течении разреженного газа в каналах ограниченной длины М.Кнудсена, М.Смолуховского, гипотеза С.Дэшмана, результаты работ С.Оутли, А.Макарова отличаются простотой математической

формулировки, приводят к качественно приемлемым результатам, но, вместе с тем, базируются на внутренних противоречивых физических предположениях. Более глубокие представления теории П.Клаузинга приводят к математическим моделям высоковакуумных систем, затрудняющим многовариантные расчеты. К подобному результату приводят и безупречные по обоснованности методы статистического моделирования (Монте-Карло), которые отличаются относительной простотой реализации вычислительного алгоритма на ЭВМ, но требуют больших затрат машинного времени.

Методы динамики разреженного газа, к которым относится прямое использование распределения молекул газа по скоростям и кинетического уравнения Больцмана, отличаются сложностью математического аппарата и трудностью реализации вычислительной процедуры на ЭВМ.

Перечисленные основные методы к настоящему времени получили большое развитие, но, вместе с тем, работа по созданию единого теоретического подхода к описанию процесса переноса молекул газа различными элементами системы, удобного для проведения оптимизационных расчетов, еще далека от завершения.

Таким образом, задачами настоящего исследования являются:

1. Создание единой для наиболее распространенных типов модулей высоковакуумной системы откатки физически строгой и математически корректной теории, использующей традиционный математический аппарат дифференциальных уравнений, приспособленных для описания свободномолекулярного режима течения.
2. Создание на основе этой теории математических моделей различных элементов, образующих проточную часть вакуумной системы (отработка способов ее применения для решения практических задач).
3. Разработка способа описания взаимодействия различных модулей высоковакуумной системы в рамках разработанной единой теории.

Вторая глава посвящена разработке теоретических основ единого подхода к описанию течения разреженного газа в каналах ограниченной длины.

Основные допущения:

1. В канале имеет место свободномолекулярный режим течения;
2. Закон, отражения молекул газа элементом поверхности считается известным. В рассмотренных моделях предполагалась полная

термическая аккомодация молекул со стенкой и использовался диффузный закон испускания в системе координат, связанной с испускающей площадкой.

3. За характерное время τ все молекулы, находящиеся в окрестности сечения x' на боковой поверхности канала покидают свои места, и с вероятностью $K(x, x') dx' d\sigma$ попадают на элементарную площадку $d\sigma$ в окрестности сечения x . Вид функции $K(x, x')$ определяется законом испускания и геометрической формой поверхности канала.

4. В объемах, граничащих с рассматриваемым каналом, газ находится в состоянии термодинамического равновесия. Это дает возможность считать входное отверстие канала поверхностью, испускающей молекулы в соответствии с диффузным законом. В соответствии с этим допущением определяется величина $f(x) d\sigma$ - вероятность нахождения на элементарной площадке $d\sigma$ в окрестности сечения x молекулы влетающей в канал через начальное сечение.

5. Молекулы, покидающие канал через начальное или конечное сечения, в дальнейшем процессе не участвуют (кроме специально оговоренных случаев).

На основе перечисленных допущений можно записать основное кинетическое уравнение как уравнение баланса поверхностной плотности молекул (плотности вероятности нахождения молекулы) откачиваемого газа на элементарной площадке $d\sigma$ в окрестности сечения x .

$$\tau \frac{\partial v}{\partial t} = -v(x, t) + \int_0^L K(x, x') v(x', t) dx',$$

с начальным условием $v(x, 0) = f(x)$, где L - длина канала.

Если разложить искомую функцию в ряд Тейлора в окрестности точки x и ограничиться первыми тремя членами разложения, можно получить модернизированное дифференциальное уравнение типа Доккера-Планка-Колмогорова (ФПК).

$$\frac{\partial v}{\partial t} + V(x) \frac{\partial v}{\partial x} = D(x) \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} - \alpha(x) v,$$

$$\text{где } \alpha(x) = \tau^{-1} \left[1 - \int_0^L K(x, x') dx' \right]$$

$$V(x) = -\tau^{-1} \int_0^L (x' - x) K(x, x') dx'$$

$$D(x) = \tau^{-1} \int_0^L \frac{(x' - x)^2}{2} K(x, x') dx'$$

Как следует из рассмотрения физического смысла полученных выражений, величина D описывает среднеквадратичное смещение молекулы вдоль оси x за единицу времени, а V - среднее смещение. То есть, величины D и V можно считать, соответственно, коэффициентом диффузии и конвективного сноса, как их принято вводить в теории случайного блуждания. С помощью коэффициента объемного поглощения α учитывается возможность молекулы покинуть канал через начальное или конечное сечение.

Слагаемые - аналоги конвективного сноса и объемного поглощения - появляются в модернизированном уравнении ФПК вследствие ограниченности канала как проявление влияния границ непосредственно на всю область течения. В традиционных локальных моделях обычно делается предположение о малости относительного смещения молекулы за один акт блуждания. В рассмотренной модели, если устремить границы канала соответственно в $+\infty$ и в $-\infty$, то $V=0$, $\alpha=0$. Последнее следует из условия нормировки: $\int_{-\infty}^{+\infty} K(x, x') dx' = 1$, физический смысл которого состоит в том, что за единичный акт блуждания молекула не может покинуть бесконечно длинный канал.

В настоящей работе предложен новый физически обоснованный способ постановки граничных условий к модернизированному уравнению ФПК.

Традиционный способ описания абсолютно поглощающих экранов заключается в постановке однородных граничных условий I рода.

В предлагаемой постановке задачи из формы записи коэффициентов V и D следует, что они описывают перераспределение поверхностной плотности молекул только в конечных пределах $(0, L)$. Таким образом, представляется физически обоснованной постановка однородных граничных условий III рода:

$$\begin{cases} G(0, t) = 0 \\ G(L, t) = 0 \end{cases}, \text{ где } G(x, t) = \left(V(x) + \frac{dD}{dx}(x) \right) v(x, t) - D(x) \frac{\partial v}{\partial x}(x, t)$$

- поток поверхностной плотности молекул газа через сечение x . Вылет молекул описывается с помощью объемного поглощения α

Выражение для коэффициента Клаузинга (канал конечной длины) получено в диссертационной работе.

На рис.1 приведены результаты расчетов коэффициента Клаузинга автором в сравнении с результатами известных численных и физических экспериментов. На рис.2 приведены аналогичные результаты для текущего распределения поверхностной плотности молекул по длине канала. Легко видеть, что предложенный способ постановки граничных условий дает значения, наиболее близкие к решению исходного основного кинетического уравнения. В результате решения модернизированного уравнения ФПК с граничными условиями III рода получается зависимость, наиболее близкая к зависимости, полученной в рамках достаточно строгой модели П.Клаузинга. Рассматриваемые результаты особенно близки для каналов малой и средней относительной длины. При $L/d < 1.5$ расхождение не превышает 5%. Анализ приведенных зависимостей позволяет сделать заключение о том, что разработанный подход позволяет создавать расчетные модели на базе относительно простого математического аппарата дифференциальных уравнений, приводящие к результатам, хорошо совпадающим с экспериментальными данными и с результатами более строгих теорий.

Предложенный в работе способ постановки удобен еще и тем, что позволяет, не меняя граничных условий, описывать конечную область течения и с "эластичными" и с "отражающими" экранами на границах. Влияние физических условий на границе канала сказывается непосредственно на

коэффициентах модернизированного уравнения ФПК. На практике такой подход позволяет с максимальной точностью описывать течения газа в элементах сложной вакуумной системы изолированно друг от друга, что является необходимым при структурной оптимизации.

Рассмотрена модель, учитывающая различное время перелета молекул, имеющих разную скорость. На ее основе получена количественная оценка характерного осредненного времени перелета молекул $\bar{t}$.

Введена классификация, положенная в основу построения комплекса расчетных моделей элементов вакуумных систем.

Третья глава посвящена описанию примеров создания расчетных моделей элементов вакуумных систем с использованием модернизированных уравнений ФПК.

Рассмотрены модели круглого цилиндрического и щелевого каналов с пассивными стенками и абсолютно поглощающими торцами. Предложен метод расчета степени поглощения молекул сорбирующими или конденсирующими стенками канала. Как примеры приведены расчетные модели вакуумных ловушек различной геометрической формы.

В качестве канала с поглощающим торцем и пассивными стенками рассмотрена модель сорбционного насоса. При этом величина $K(x, x')$ состоит из двух слагаемых, одно из которых описывает переход молекулы с одной элементарной площадки на другую непосредственно, а второе - после отражения от частично поглощающего торца. Таким образом, влияние условий на границе канала сказывается непосредственно на виде выражений для коэффициентов модернизированного уравнения ФПК, что позволяет учесть нелокальность свободномолекулярного режима течения.

Для каналов, образованных поверхностями, эквивалентными с точки зрения вероятности попадания на них молекул откачиваемого газа вследствие особенностей их геометрической формы или взаимного перемещения, которое учитывается при записи закона испускания молекулы элементом поверхности, система модернизированных уравнений ФПК имеет вид:

$$\begin{cases} \frac{\partial v_1}{\partial t} = D_{11} \frac{\partial^2 v_1}{\partial z^2} + D_{12} \frac{\partial^2 v_2}{\partial z^2} - V_{11} \frac{\partial v_1}{\partial z} - V_{12} \frac{\partial v_2}{\partial z} - \\ \quad - \alpha_{11} v_1 - \alpha_{12} v_2 \\ \frac{\partial v_2}{\partial t} = D_{21} \frac{\partial^2 v_1}{\partial z^2} + D_{22} \frac{\partial^2 v_2}{\partial z^2} - V_{21} \frac{\partial v_1}{\partial z} - V_{22} \frac{\partial v_2}{\partial z} - \\ \quad - \alpha_{21} v_1 - \alpha_{22} v_2 \end{cases}$$

где:

$$\alpha_{ii}(z) = \tau^{-1}(1 - (1 - \gamma_i(z)) \int_0^z K_{ii}(z, z') dz'),$$

$$\alpha_{ij}(z) = -\tau^{-1}(1 - \gamma_i(z)) \int_0^z K_{ij}(z, z') dz' \quad \text{н пу } i \neq j,$$

$$V_{ij}(z) = -\tau^{-1}(1 - \gamma_i(z)) \int_0^z (z' - z) K_{ij}(z, z') dz',$$

$$D_{ij}(z) = \tau^{-1}(1 - \gamma_i(z)) \int_0^z \frac{(z' - z)^2}{2} K_{ij}(z, z') dz',$$

где K_{ij} - плотность вероятности перехода частицы с поверхности j на поверхность i . γ_i - вероятность поглощения молекулы i -ой поверхностью. Начальные условия имеют вид:

$$\begin{cases} v_1(z, 0) = (1 - \gamma_1(z)) K_{10}(z) \\ v_2(z, 0) = (1 - \gamma_2(z)) K_{20}(z) \end{cases}$$

В качестве примеров таких каналов в работе рассмотрены модели активных элементов турбомолекулярного, молекулярного и диффузионного насосов. В модели турбомолекулярного насоса входное сечение рассматривается как движущаяся поверхность, диффузно испускающая молекулы в связанной с ней системе отсчета. При переходе в систему отсчета, связанную с каналом, закон испускания принимает вид, отличный от известного кнудсеновского закона, что позволяет учесть разную вероятность попадания молекул на лопатки вследствие вращения ротора $K_{10} \neq K_{20}$. Поглощение на

лопатках отсутствует $\gamma_1 = \gamma_2 = 0$. Молекулы могут перелетать только с одной поверхности на другую $K_{11} = K_{22} = 0$.

В модели молекулярного насоса поверхности расположены равнозначно с точки зрения вероятности попадания на них молекул откачиваемого газа $K_{10} = K_{20}$, но вследствие того, что первая поверхность движется, - $K_{12} \neq K_{21}$. Поглощение на лопатках отсутствует $\gamma_1 = \gamma_2 = 0$. Молекулы могут перелетать только с одной поверхности на другую $K_{11} = K_{22} = 0$.

В модели диффузионного насоса граница струи представлена как движущаяся и одновременно поглощающая поверхность $\gamma_1 \neq 0$, $K_{11} \neq K_{21}$. Так как струя занимает не весь объем проточной полости, молекулы могут перелетать с одной площадки поверхности стенки корпуса на другую $K_{22} \neq 0$ (при записи выражений K_{ij} учтено явление затенения поверхностей).

В четвертой главе разработан способ описания взаимного влияния модулей в системе в рамках предложенного теоретического подхода и рассмотрено его физическое обоснование. Влияние остальных элементов системы на течение в рассматриваемом модуле проявляется в том, что молекула, покидающая модуль через начальное сечение a или конечное сечение b , имеет возможность вернуться. Общая безразмерная проводимость системы, состоящей из двух модулей, в направлении $a \rightarrow b$ с учетом многократного перехода части молекул из одного модуля в другой определяется соотношением: $W_{ab\Sigma} = \frac{W_{ab1}W_{ab2}}{1 - W'_{ab2}W'_{ba1}}$, а вероятность возврата

молекулы через сечение a : $W'_{ab\Sigma} = W'_{ab1} + \frac{W_{ab1}W_{ba1}W'_{ab2}}{1 - W'_{ab2}W'_{ba1}}$, где W_{abi} -

вероятность прохождения молекулой отдельно взятого i -го модуля в прямом направлении, и W_{bai} - в обратном, а W'_{abi} и W'_{bai} - вероятности возврата молекулы, влетевшей в канал, соответственно через сечение a и b .

Если рассматривать частный случай двух каналов с непоглощающими стенками и с одинаковой вероятностью прохождения молекулы в одном и в

допом направлении $W_{abi} = W_{bai} = W_i$, то из приведенных выражений можно получить форму безразмерного основного уравнения вакуумной техники, впервые предложенную С.Оутли:

$$\frac{1}{W_\Sigma} = \frac{1}{W_1} + \frac{1}{W_2} - 1$$

Приведенные выше зависимости описывают более общий случай каналов и позволяют учесть как особенности геометрической формы канала, так и возможность поглощения на стенках.

При выводе этих соотношений поверхности торцевых сечений a и b рассматриваются как частично поглощающие экраны с вероятностью поглощения $\gamma_b = 1 - W'_{ab\Sigma}$, где $W'_{ab\Sigma}$ - вероятность возврата молекулы, влетающей через начальное сечение в систему модулей, присоединенную своим началом a к выходному сечению рассматриваемого модуля b . $\gamma_a = 1 - W'_{ba\Sigma}$, где $W'_{ba\Sigma}$ - вероятность возврата молекулы, влетающей через конечное сечение в другую систему модулей, которая присоединена своим концом b к входному сечению рассматриваемого модуля a .

Для того, чтобы описать процесс течения разреженного газа в отдельном модуле с учетом влияния остальных, в разработанном подходе записывается сначала основное кинетическое уравнение, в интегральное ядро $K(x, x')$ которого входят члены, учитывающие многократное отражение и частичное поглощение молекул торцами a и b . Из основного кинетического уравнения выводится модернизированное уравнение ФПК. С его помощью, а также с помощью основного кинетического уравнения, для частного случая системы, состоящей из круглого цилиндрического канала длиной L и радиуса r и насоса с безразмерной быстротой действия $S=0.5$, получены значения эффективной скорости откачки.

Из анализа результатов можно заключить, что при традиционном использовании основного уравнения вакуумной техники величина эффективной скорости откачки снижалась. Для коротких патрубков результаты близки

вследствие относительно большой вероятности пролета молекул через патрубков без столкновения со стенками.

L/r	Проводимость изолированного патрубка		Эффективная быстрота откачки (безразмерная)		
	данные П.Клаузинга	данные автора	основное уравнение вак. техники	данные автора	метод С.Оутли
0.2	0.909	0.909	0.323	0.476	0.476
0.5	0.801	0.801	0.308	0.441	0.445
1.0	0.672	0.672	0.287	0.387	0.402
5.0	0.315	0.308	0.190	0.224	0.235
10.0	0.197	0.185	0.135	0.148	0.156

Для патрубков с $L/r > 10$ расхождение в результатах не превышает 6% так как на больших длинах влияние переотражения сказывается меньше. Для патрубков средней и короткой длины ($0,1 < L/r < 10$) разница достигает 70%. Этот результат имеет большое практическое значение, так как наиболее часто встречающиеся в технических системах патрубки имеют величину относительной длины, лежащую в этом диапазоне.

Таким образом, на основе интегродифференциального основного кинетического уравнения впервые строго показано, что в основном уравнении вакуумной техники должно использоваться значение проводимости патрубка в системе, а не отдельно взятого, изолированного патрубка. Если в расчетах используется значение проводимости отдельно взятого изолированного патрубка, то основное уравнение вакуумной техники должно быть записано в форме, предложенной в работе, частным случаем которой является соотношение С.Оутли, в противном случае эффективная быстрота действия системы откачки оказывается заниженной.

В приложении приведена методика оптимизационного расчета эффективной быстроты действия сорбционного насоса с помощью разработанного единого теоретического подхода к моделированию элементов высоковакуумных систем. В результате решения задачи оптимизации геометрической формы сорбционного насоса цилиндрического типа получены результаты, позволяющие в конкретном случае сократить массу используемого сорбента на 44% по сравнению с насосом традиционной формы.

Основные выводы и итоги работы

1. Разработан единый теоретический подход к построению моделей течения разреженного газа в каналах ограниченной длины с подвижными и неподвижными, поглощающими и отражающими стенками. В основу теоретического подхода положено модифицированное в настоящей работе уравнение Фоккера-Планка-Колмогорова, учитывающее нелокальный характер свободномолекулярного течения газа в каналах ограниченной длины. При этом модели, создаваемые на основе разработанного подхода, свободны от внутреннего противоречия известной модели М.Кнудсена.
2. Разработан физически обоснованный способ постановки граничных условий к модифицированному уравнению Фоккера-Планка-Колмогорова, позволяющий корректно описывать течение в канале конечной длины с частично поглощающими и отражающими торцами. На практике этот способ позволяет с максимальной точностью рассматривать элементы сложной вакуумной системы изолированно друг от друга, что представляется удобным при оптимизации высоковакуумной системы.
3. На основе разработанного теоретического подхода созданы модели различных типов элементов высоковакуумных систем, в том числе: модели каналов различной геометрии, модели ловушек как каналов с сорбирующими стенками, сорбционного насоса, элементарной ячейки молекулярного и турбомолекулярного насоса, проточной части диффузионного насоса.
4. Разработан способ определения общей проводимости системы, состоящей из произвольного числа модулей с учетом их взаимного влияния. Способ отличается относительной простотой, экономичностью и может быть использован в задачах оптимизации.
5. В рамках разработанного теоретического подхода описано течение разреженного газа через отдельный модуль, находящийся в системе. Исследовано влияние остальных элементов системы на характер процесса в модуле, описано изменение проводимости модуля в зависимости от его места в системе.
6. На основе интегродифференциального основного кинетического уравнения впервые строго показано, что в основном уравнении вакуумной техники должно использоваться значение проводимости патрубка в системе, а не

отдельно взятого, изолированного патрубка. Если в расчетах используется значение проводимости отдельно взятого, изолированного патрубка, то основное уравнение вакуумной техники должно быть записано в форме, частным случаем которой является соотношение С.Оутли.

Проведенное сравнение результатов расчетов отдельных модулей с экспериментальными данными и результатами известных теорий подтвердило работоспособность разработанного теоретического подхода.

Публикации по теме диссертации:

1.К.А.Макаров, А.М.Макаров, Л.А.Лунёва. К проблеме локальности в теории броуновского движения // Тр. Второй междунар. конф. "Актуальные проблемы фундаментальных наук". - МГТУ им. Н.Э.Баумана. - М.1994. - Т.3. - С.153.

2.К.А.Макаров, Д.В.Макаров. Расчёт элементов вакуумных систем на основе кинетических уравнений // Тр. междунар. конф. "Вакуумная наука и техника". - Гурзуф. - 1994. - С.60

3.К.А.Макаров, А.М.Макаров. Проблема локальности при описании течения разреженного газа // Тр. конф "165 лет МГТУ", - МГТУ им. Н.Э.Баумана. - М. - 1995. - Т.2.- С.166.

4.К.А.Макаров. Проблема нелокального описания свободно-молекулярного течения газа в каналах ограниченной длины // Тр. междунар. конгресс "Молодежь и наука - третье тысячелетие". - М. - 1996. Т.2.- С.84.

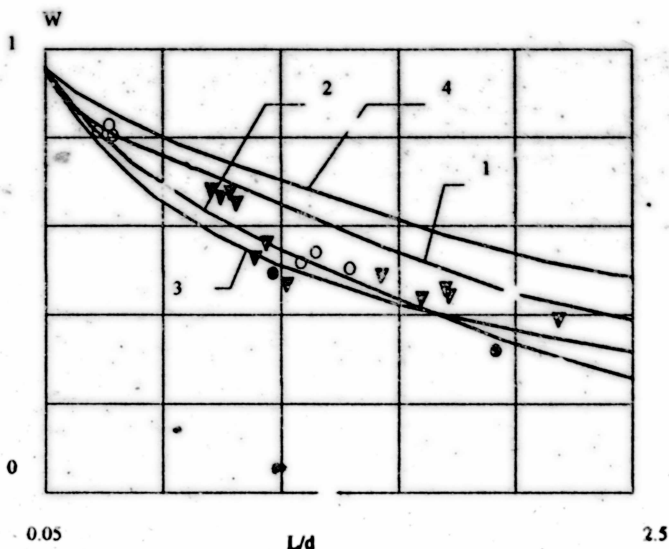


Рис. 1

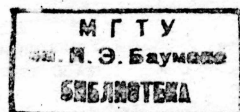
Зависимость коэффициента Клаузинга от отношения длины к диаметру для круглого цилиндрического канала. Результаты получены:

В рамках разработанного подхода

1. с помощью модернизированного уравнения ФПК с граничными условиями I рода
2. с помощью модернизированного уравнения ФПК с граничными условиями III рода
3. путем решения основного кинетического уравнения а также уравнения Клаузинга
4. В рамках модели М. Кнудсена.

Экспериментальные данные

- C.W.Oatley
- D.H.Davis, Levenson L.L., N.Milleron
- ▼ L.M.Lund, A.S.Berman



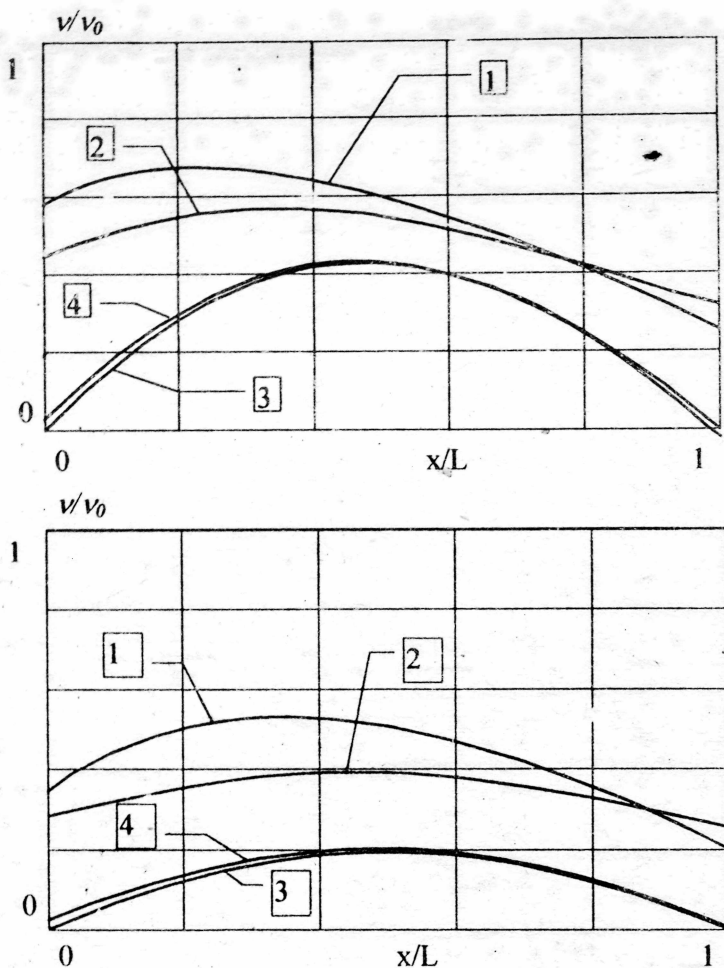


Рис.2.

Изменение со временем распределение плотности вероятности обнаружения молекулы по длине канала

1. Решение основного кинетического уравнения
2. Уравнение ФПК с граничными условиями III рода
3. Уравнение ФПК с граничными условиями I рода
4. Уравнение ФПК с граничными условиями, полученными с помощью преобразований Лапласа