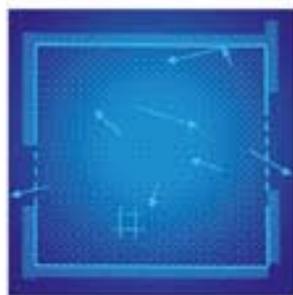


физики и техники

Методы расчета
сложных вакуумных
систем



ТЕХНОСФЕРА

УДК 621.52(035,5)
ББК 31.77 я 2
М 54

Авторы:

**Нестеров С.Б., Бурмистров А.В., Андросов А.В., Бронштейн М.Д.,
Васильев Ю.К., Ерофеев А.И., Саликеев С.И.**

М54 Методы расчета сложных вакуумных систем: С.Б. Нестеров, А.В. Бурмистров и др.
Под общей редакцией С.Б. Нестерова, А.В. Бурмистрова. **Москва: Техносфера,**
2012. — 384 с.
ISBN 978-5-94836-337-0

В книге рассматриваются методы расчета сложных вакуумных систем. Под сложной вакуумной системой понимается система, состоящая хотя бы из двух простых элементов. Книга утверждена на научно-техническом совете ФГУП «НИИВТ им. С.А. Векшинского» и рекомендована для научных сотрудников, аспирантов и студентов теплофизических и инженерно-физических специальностей.

УДК 621.52(035,5)
ББК 31.77 я 2

© 2012, Нестеров С.Б.
© 2012, ЗАО «РИЦ «Техносфера», оригинал-макет, оформление

ISBN 978-5-94836-337-0

Содержание

Введение	9
Глава 1. ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ	10
Глава 2. МЕТОДЫ РАСЧЕТА	16
2.1. Обзор методов	16
2.1.1. Классические аналитические методы	16
2.1.2. Развитие аналитических подходов в приложении к актуальным задачам вакуумной техники	19
2.1.3. Метод угловых коэффициентов	20
2.1.4. Метод эквивалентных поверхностей	20
2.1.5. Метод анализа газовых потоков путем решения кинетического уравнения Л. Больцмана	21
2.1.6. Метод Монте-Карло пробной частицы	22
2.2. Метод угловых коэффициентов	25
2.2.1. Основные понятия	25
2.2.2. Расчет угловых коэффициентов	26
2.2.3. Примеры решения задач методом угловых коэффициентов	35
2.3. Метод Монте-Карло пробной частицы для свободномолекулярного режима	45
2.3.1. Основные понятия	45
2.3.2. Описание общего алгоритма	46
2.3.3. Нахождение полярных диаграмм скоростей частиц	58
2.4. Нахождение пространственного распределения частиц	60
2.4.1. Типы угловых распределений	61
2.4.2. Учет времени полета частицы	63
2.4.3. Учет скорости частицы	64
2.4.4. Определение распределения концентрации и давления	66
2.4.5. Пример расчета параметров коаксиального трубопровода	69
2.5. Метод эквивалентных поверхностей	73
2.6. Метод балансовых уравнений	74
2.6.1. Аналитические соотношения	81
2.6.2. Расчет с помощью предложенного алгоритма коэффициента захвата крионасоса Marathon-8	87

Глава 3. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕТОДОВ РАСЧЕТА ДЛЯ АНАЛИЗА СЛОЖНЫХ ВАКУУМНЫХ СИСТЕМ	90
3.1. Реальные вакуумные системы и их классификация	90
3.2. Проводимость сложного трубопровода в свободномолекулярном режиме	92
3.2.1. Основные понятия	92
3.2.2. Методы расчета общей проводимости сложного трубопровода	93
3.2.3. Алгоритм расчета проводимости по теореме аддитивности обратной проводимости	96
3.2.4. Сравнение значений суммарной проводимости при ее расчетах разными методами	97
3.2.5. Пример расчета сложного трубопровода	100
3.3. Расчет характеристик откачных систем	105
3.3.1. Расчет проводимости и коэффициента захвата криоловушки с учетом формирующегося криослоя	105
3.3.2. Расчет криоловушки	105
3.3.3. Измененная конструкция ловушки АТ-200	107
3.3.4. Расчет и проектирование крионасоса	109
3.3.5. Анализ типовой конструкции крионасоса	110
3.3.6. Результаты предварительного сравнения с экспериментальными данными	110
3.3.7. Изменение коэффициента захвата системы по водороду в зависимости от переменных коэффициентов прилипания	111
3.3.8. Зависимость быстроты действия насоса от его геометрических характеристик	113
3.3.9. Зависимость быстроты действия от количества накопленной воды	114
3.3.10. Зависимость быстроты действия от количества накопленного аргона	115
3.3.11. Структура распределения частиц воды на экране крионасоса	116
3.3.12. Структура распределения частиц аргона на панелях II ступени	116
3.3.13. Пример расчета альтернативной конструкции насоса на основе имеющейся модели	113
3.3.14. Постановка задачи теплового расчета	119
3.3.15. Теплопритоки излучением	120
3.3.16. Теплота, выделяемая при конденсации	122
3.3.17. Теплота адсорбции	123
3.3.18. Теплопритоки через слой разреженного газа	123
3.3.19. Влияние щели в панели II ступени на ухудшение свойств теплового моста	126
3.3.20. Подведение итогов теплового расчета	128
3.4. Комплексное исследование системы откачки продуктов термоядерного синтеза ITER	128
3.4.1. Конструкция системы откачки	129

3.4.2. Расчеты быстроты действия	130
3.4.3. Расчеты теплопотоков через слой разреженного газа	132
3.4.4. Расчеты теплопотоков излучением	132
3.5. Анализ испытательных камер для определения характеристик откачных систем	134
3.5.1. Анализируемые структуры	135
3.5.2. Анализ характеристик потока на выходе из испытательной камеры	137
3.5.3. Анализ распределения давления внутри испытательных камер	139
Глава 4. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕТОДОВ РАСЧЕТА ДЛЯ АНАЛИЗА ЛОКАЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ЭЛЕМЕНТОВ СЛОЖНЫХ ВАКУУМНЫХ СИСТЕМ	142
4.1. Расчет профилей криослоев	142
4.2. Зависимости для определения профилей криослоев	143
4.3. Влияние микрогеометрии сорбентов на сорбционные характеристики крионасосов	164
4.3.1. Изучение характера поверхностей разных сорбентов	164
4.3.2. Моделирование фрагмента поверхности	167
4.4. Влияние углового распределения частиц на проводимость	170
4.4.1. Описание метода расчетов	171
4.4.2. Влияние закона распределения	172
4.4.3. Влияние значения коэффициента прилипания	180
4.4.4. Выводы	180
4.5. Анализ криовакуумных условий в зоне вакуумной изоляции катушек тороидального поля ИТЭР	181
4.5.1. Физические предпосылки и методология расчета	181
4.5.2. Общие условия расчетов	182
4.5.3. Расчет проводимости патрубков VVTS и лабиринтных соединений	185
4.5.4. Расчет распределения давления	187
4.5.5. Расчет фонового давления	189
4.5.6. VV—VVTS	189
4.5.7. VVTS	190
4.5.8. VVTS—TFC	191
4.5.9. VVTS—TFC с увеличенным значением плотности десорбционного потока с поверхности TFC	192
4.5.10. Выводы	193
Глава 5. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕТОДОВ РАСЧЕТА ДЛЯ АНАЛИЗА СМЕЖНЫХ ЗАДАЧ ВАКУУМНОЙ ТЕХНИКИ	194
5.1. Исследование термомолекулярного эффекта	194
5.1.1. Расчет для случая двух сфер, соединенных диафрагмой	195
5.1.2. Расчет для случая двух сфер, соединенных трубопроводом	196
5.1.3. Влияние геометрии и температуры	196
5.1.4. Выводы	199

Глава 6. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕТОДОВ РАСЧЕТА ДЛЯ СТРУКТУРНО-ПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ ОПТИМИЗАЦИИ СЛОЖНЫХ ВАКУУМНЫХ СИСТЕМ	200
6.1. Разработка и модернизация вакуумных криогенных насосов	200
6.1.1. Конструкция и описание крионасосов	200
6.1.2. Анализ влияния геометрии экрана на его эффективность.....	202
Глава 7. МЕТОДЫ РАСЧЕТА ОТКАЧНЫХ ХАРАКТЕРСТИК БЕСКОНТАКТНЫХ ВАКУУМНЫХ НАСОСОВ	206
7.1. Общие положения	206
7.2. «Вакуумные» методы расчета откачных характеристик	207
7.3. Методы расчета, основанные на дифференциальных уравнениях, описывающих изменение параметров газа	219
7.4. Прямой поток в бесконтактных вакуумных насосах. Коэффициент использования рабочего объема	221
Глава 8. ПРОВОДИМОСТЬ ЩЕЛЕВЫХ КАНАЛОВ В ВЯЗКОСТНОМ РЕЖИМЕ ТЕЧЕНИЯ ГАЗА	224
8.1. Основные типы щелевых каналов бесконтактных вакуумных насосов	224
8.2. Методы расчета проводимости щелевых каналов, используемые в компрессорной технике	225
8.3. «Вакуумные» методы расчета проводимости	231
8.4. Экспериментальные исследования проводимости щелевых каналов в молекулярном, переходном и вязкостном режимах	234
8.5. Метод расчета проводимости щелевых каналов в ламинарном режиме течения при отношениях давлений на концах, близких к единице	237
8.6. Проводимость щелевых каналов в ламинарном режиме при произвольных перепадах давлений	243
8.6.1. Математическая модель. Проверка адекватности	243
8.6.2. Результаты численного решения и уравнения для расчета проводимости щелевых каналов, образованных цилиндрическими стенками	250
8.6.3. Результаты численного решения и уравнения для расчета проводимости плоской прямоугольной щели	257
Глава 9. ПРОВОДИМОСТЬ ЩЕЛЕВЫХ КАНАЛОВ ПРИ МОЛЕКУЛЯРНОМ РЕЖИМЕ ТЕЧЕНИЯ ГАЗА	260
9.1. Методы расчета проводимости щелевых каналов ДВН	260
9.2. Расчет проводимости щелевых каналов методом пробной частицы	265
9.2.1. Постановка задачи. Допущения. Проверка адекватности модели	265
9.2.2. Проводимость каналов, образованных цилиндрическими поверхностями	272
9.2.3. Проводимость канала, образованного эллипсом и окружностью	276

9.2.4. Проводимость радиального канала ДВН с подрезкой головки ротора	282
9.2.5. Проводимость межроторных каналов ДВН	283
Глава 10. ПРОВОДИМОСТЬ ЩЕЛЕВЫХ КАНАЛОВ ПРИ МОЛЕКУЛЯРНО-ВЯЗКОСТНОМ РЕЖИМЕ ТЕЧЕНИЯ ГАЗА	291
Глава 11. УНИВЕРСАЛЬНЫЙ МЕТОД РАСЧЕТА ПРОВОДИМОСТИ КАНАЛОВ БЕСКОНТАКТНЫХ ВАКУУМНЫХ НАСОСОВ	303
Глава 12. УЧЕТ ПОДВИЖНОСТИ СТенок КАНАЛОВ ПРИ РАСЧЕТАХ ОБРАТНЫХ ПЕРЕТЕКАНИЙ В БЕСКОНТАКТНЫХ ВАКУУМНЫХ НАСОСАХ	328
12.1. Учет подвижности стенок каналов при молекулярном режиме течения газа	328
12.1.1. Общие положения	328
12.1.2. Проводимости радиальных каналов ДВН с окружным профилем ротора	331
12.1.3. Проводимости радиальных каналов ДВН с подрезкой ротора	335
12.1.4. Проводимости радиальных каналов ДВН с эллиптическим профилем ротора	336
12.1.5. Проводимости межроторных каналов ДВН	336
12.1.6. Проводимости торцевых каналов ДВН с движущимися стенками	338
12.2. Учет подвижности стенок каналов при молекулярно-вязкостном и вязкостном режимах течения газа	346
Глава 13. ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА ПРЯМОГО СТАТИСТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ДЛЯ РАСЧЕТА ВАКУУМНЫХ СИСТЕМ	351
13.1. Введение	351
13.2. Общее описание метода и алгоритма	355
13.3. Физические модели. Расчетные процедуры	358
13.3.1. Столкновение частиц	359
13.3.2. Определение количества столкновений в ячейке	361
13.3.3. Перенумерация молекул	363
13.4. Особенности применения метода ПСМ в вакуумной технике	363
Литература	382

ГЛАВА 1

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Бурное развитие и все более расширяющиеся области применения вакуумного оборудования, например для обеспечения технологических процессов в экспериментальных термоядерных установках, имитаторах космического пространства, ускорителях на встречных пучках, в микроэлектронике, физике твердого тела и т. д., обуславливают разнообразие и индивидуальность физических и эксплуатационных факторов, увеличивающую структурную усложненность, возрастающую ресурсоемкость действующих и в еще большей степени разрабатываемых вакуумных систем. Таким образом, процесс проектирования современных вакуумных систем является сложной и разветвленной задачей, подверженной влиянию многих факторов, характеризующих специфичность и многообразие параметров функционирования вакуумной системы. Поэтому решение подобной задачи требует зачастую индивидуального подхода, так как современные реальные вакуумные системы являются сложными ресурсоемкими комплексами как с технологической, так и с экономической точек зрения и проведение исчерпывающих экспериментальных исследований на этапе проектирования затруднено или невозможно.

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

- наличие множественных распределенных источников и стоков газа;
- сильную структурную усложненность;
- наличие сильных температурных перекосов;
- нестационарность протекающих процессов.

Современная ситуация с использованием различных методик и подходов складывается следующим образом. Применение традиционных подходов для анализа реальных сложных вакуумных систем малоэффективно, так как эти подходы базируются на осредненных параметрах состояния разреженного газа и заимствованы из механики сплошных сред. Использование адекватных методов расчета, напротив, ориентировано на построение трехмерных полей дифференциальных характеристик газовой среды (молекулярная кон-

центрация, плотности молекулярных потоков и т. п.). Давняя и широкая известность большинства подобных методов анализа сформировала устойчивый стереотип о простоте решения большинства задач, которые могут встать перед проектировщиком вакуумной системы и, соответственно, о нецелесообразности дальнейшего развития существующих подходов.

Однако при попытке использовать для анализа конкретной вакуумной системы имеющиеся описания методов проектировщик сталкивается с их разрозненностью, половинчатостью, а зачастую и незавершенностью, что наряду с наличием чисто практических трудностей в освоении разветвленных и довольно громоздких математических аппаратов этих методов обуславливает сложность их непосредственного использования. Кроме этого, увеличивающиеся требования к точности расчетов и к более адекватному описанию процессов, протекающих в вакуумных системах, обуславливают необходимость решения задач в нестационарной постановке, анализа систем со сложной, динамически изменяющейся геометрией, находящихся в существенно неравновесных условиях, учета влияния параметров взаимодействия молекул со стенками и т. п. Также особо актуальным представляется развитие подходов в направлении, позволяющем получать в результате анализа традиционные параметры вакуумных систем, такие как давление, концентрация и т. п., наиболее удобные и привычные для проектировщика в целях наиболее эффективного дальнейшего их использования в работе над проектом.

Наличие вышеозначенных вопросов, требующих решения, определяет актуальность обобщения имеющихся представлений и выработку на их основе и на базе необходимых модификаций единой, максимально универсальной методики для анализа вакуумных систем, ориентированной на решение современных задач, стоящих перед проектировщиком. Отдельной проблемой, также требующей решения, является приведение такой методики к виду, позволяющему создать универсальные программные продукты, которые позволят проводить комплексный анализ интегральных и дифференциальных характеристик любой вакуумной системы, причем не требуя участия проектировщика в реализации расчетных алгоритмов.

Главным объектом исследования при анализе вакуумных систем являются разреженный газ и параметры, характеризующие его состояние. Разреженный газ близок по своим свойствам к идеальному газу. Идеальными газами принято считать такие, у которых:

- молекулы можно представить как упругие материальные частицы (в силу этого часто вместо термина «молекула» используется «частица»);
- между частицами происходят только упругие взаимодействия, то есть отсутствуют силы межмолекулярного воздействия;
- объем, занимаемый частицами, пренебрежимо мал по сравнению со свободным объемом.

Одним их основных параметров, характеризующих совокупность молекул внутри объема, является молекулярная концентрация n . Концентрация показывает, сколько частиц (молекул) находится в единице объема системы — n [м⁻³].

Поведение каждой отдельной молекулы характеризуется ее тепловой скоростью. Максвелл показал, что газ, не подвергающийся какому-либо

постороннему механическому или температурному воздействию, всегда приходит в такое состояние, когда молекулы распределяются по скоростям теплового движения по вполне определенному статистическому закону. Распределение Максвелла по скоростям носит следующий характер.

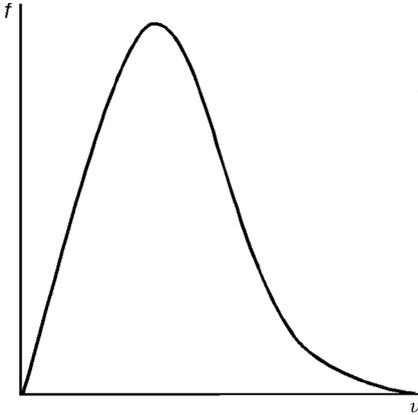


Рис. 1.1. Графическое представление распределения Максвелла

Графическая иллюстрация распределения Максвелла показана на рис. 1.1 — качественная зависимость числа молекул, имеющих значение скорости v [м/с].

На основе этого закона можно подсчитать тепловые скорости молекул:

- наиболее вероятную

$$v_{\text{нв}} = \sqrt{\frac{2R_0T}{M}} = 129\sqrt{\frac{T}{M}};$$

- среднеарифметическую

$$v_{\text{а}} = \sqrt{\frac{8R_0T}{\pi M}} = 145,51\sqrt{\frac{T}{M}};$$

- среднюю квадратичную

$$v_{\text{кв}} = \sqrt{\frac{3R_0T}{M}} = 158\sqrt{\frac{T}{M}}.$$

Как видно из зависимостей, параметрами, влияющими на значение тепловой скорости молекулы, являются температура T и молекулярная масса M ($R_0 = 8,314$ Дж/(К · моль) — универсальная газовая постоянная).

Кроме закона распределения значения скорости в расчетах следует учитывать угловое распределение скоростей, то есть определенное соотношение значений компонент скорости. Одним из наиболее распространенных типов углового распределения является диффузный, или косинусный закон. При диффузном законе распределения число молекул dN_θ , попавших в элементарный телесный угол $d\omega = 2\pi \sin(\theta) d\theta$, пропорционально $\cos(\theta)$. В общем случае этот закон имеет вид

$$dN_\theta = N d\omega \cos^b \theta. \quad (1.1)$$

При $b = 1$ данное соотношение отражает косинусный закон распределения, при $b = 0$ — равномерное распределение, а при других значениях b — лепестковый закон углового распределения молекул.

Плотность газа определяется соотношением $\rho = nm$, где n — концентрация молекул, m — масса молекулы [кг].

Соотношение для определения значения давления газа, имеющего заданную концентрацию и температуру,

$$p = nkT, \quad (1.2)$$

где $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К — постоянная Больцмана, следует из закона Менделеева—Клапейрона:

$$pV = \frac{m}{M} R_0 T.$$

Здесь следует указать, что для неравновесных систем понятие давления не отражает полного состояния газа, поскольку при наличии температурных полей становится непонятным, к какой именно температуре относится полученная характеристика. Однако в силу сложившихся традиций термин «давление» активно используется в расчетах. Поэтому удобно использовать понятие «приведенное давление», когда давление характеризует распределение концентрации при одной общей температуре. То есть если, например, внутри системы присутствуют температурные поля, то, рассчитав распределение концентрации молекул внутри нее, можно определить по соотношению (1.2) распределение приведенного к определенной общей (средней) температуре давления.

Хаотическое движение молекул сопровождается не только их соударениями со стенками, но и взаимными столкновениями. Таким образом, траектория молекулы представляет собой ломаную прямую линию, прямые участки которой характеризуют свободный от столкновений путь. Эти участки не могут быть одинаковы, но, поскольку существует определенный закон распределения, аналогично средней скорости молекул вводится понятие средней длины свободного пробега:

$$\bar{l} = \frac{kT}{p\pi\sigma^2\sqrt{2}}, \quad (1.3)$$

где k — постоянная Больцмана; T — температура; p — давление; σ — диаметр молекулы.

Среднюю длину свободного пробега молекулы используют для определения режима течения газа с помощью числа Кнудсена:

$$\text{Kn} = \frac{\bar{l}}{d}, \quad (1.4)$$

где d — характерный линейный размер вакуумной системы. В зависимости от значения числа Кнудсена различают несколько режимов течения газа:

- $\text{Kn} < 0,3$ — вязкостный: характер движения в основном определяется межмолекулярным взаимодействием, влияние стенок вакуумной системы незначительно, газ ведет себя как вязкая жидкость; для анализа с достаточной степенью точности применимы законы гидродинамики;

- $5 < \text{Kn}$ — свободномолекулярный: движение газа представляет собой независимое перемещение молекул, претерпевающих только соударения со стенками вакуумной системы;

- $0,3 < \text{Kn} < 5$ — переходный: движение газа характеризуется столкновениями обоих типов.

Поскольку основными характеристиками, определяемыми при анализе вакуумной системы являются параметры, характеризующие поведение газовых потоков, важное значение имеет величина числа молекул, ударяющихся о единичную поверхность в единицу времени ν [$1/(m^2 \cdot c)$]:

$$\nu = \frac{nv_a}{4}. \quad (1.5)$$

Соответственно «объем» молекул, ударяющихся о единичную поверхность в единицу времени V_0 [$m^3/(m^2 \cdot c)$] равен

$$V_0 = \frac{\nu}{n} = \frac{v_a}{4}. \quad (1.6)$$

При перетекании газа из одного бесконечно большого объема с давлением p_1 [Па] в другой, с давлением p_2 [Па], через малое отверстие или диафрагму с идеально тонкими стенками молекулярный поток определяется соотношением

$$Q_{\text{отв}} = V_0 F_{\text{отв}} = \frac{v_a F_{\text{отв}}}{4} (p_1 - p_2), \quad (1.7)$$

где $F_{\text{отв}}$ — площадь отверстия [m^2].

Из соотношения (1.7) вытекает зависимость для определения пропускной способности (проводимости) отверстия или диафрагмы с идеально тонкими стенками:

$$U_{\text{отв}} = \frac{v_a F_{\text{отв}}}{4}. \quad (1.8)$$

Одним из важнейших элементов системы понятий вакуумной техники, основанной на традиционном подходе к расчету и проектированию вакуумных систем, является быстрота действия насоса S_H [m^3/c]. Быстрота действия насоса определяет объем газа, проходящий через входное сечение в направлении откачки за единицу времени.

Аналогичная характеристика, отнесенная к объекту откачки, — быстрота откачки S , [m^3/c] в некотором сечении — газовый поток, протекающий в этом сечении, отнесенный к давлению в том же сечении:

$$S = \frac{Q}{p}. \quad (1.9)$$

Количественная связь между потоком газа, проходящим через сечение некоторого канала вакуумной системы, в котором существует давление p , и давлениями p_1 и p_2 во входном выходном его сечениях выражается зависимостью

$$Q = U(p_1 - p_2). \quad (1.10)$$

В терминах механики сплошных сред уравнение (1.10) выражает условие неразрывности газового потока. Из него следует основное уравнение вакуумной техники:

$$\frac{1}{S_H} = \frac{1}{U} + \frac{1}{S} \quad \text{или} \quad S_H = \frac{SU}{(U + S)}. \quad (1.11)$$

Представленные характеристики являются базисными параметрами традиционной системы понятий вакуумной техники и активно используются при анализе вакуумных систем. В рассматриваемой системе понятий все статические и динамические характеристики выражаются через осредненные параметры состояния разреженного газа, поэтому, строго говоря, применимы при условиях равновесности вакуумной системы.

Это ограничение снимается при развитии системы понятий до уровня, допускающего использование дифференциальных и интегральных характеристик, описывающих с использованием статистически детерминированных констант процессы локальных взаимодействий молекулы с элементами вакуумной системы. Наиболее часто используются следующие параметры:

- коэффициент прилипания — дифференциальная характеристика, определяющая вероятность длительного удержания поверхностью вакуумной системы упавшей на нее молекулы; нужно отметить, что схожий статистический смысл имеют другие коэффициенты, отражающие лишь отличную физику процесса взаимодействия, например коэффициент конденсации, коэффициент сорбции;
- коэффициент проводимости — интегральная характеристика, определяющая среднюю для совокупности молекул вероятность пролета от входного до выходного сечения некоей проводящей системы; при условиях диффузного отражения и состояния равновесия в системе коэффициент проводимости численно равен коэффициенту Клаузинга;
- коэффициент захвата — интегральная характеристика, определяющая среднюю для совокупности молекул вероятность быть поглощенными элементом вакуумной системы.

Принципиальной особенностью интегральных характеристик является универсальность даваемого ими описания элементов вакуумной системы. Кроме этого, безразмерность и относительность этих параметров дают возможность распространять их на анализ практически любых вакуумных систем безотносительно к режиму течения газа, степени сложности и равновесности вакуумной системы.

Также эти характеристики делают возможным построение на базе формулирования систем интегро-дифференциальных уравнений математических моделей элементов и вакуумных систем в целом, что позволяет осуществлять их структурно-параметрическую оптимизацию.

ГЛАВА 2

МЕТОДЫ РАСЧЕТА

2.1. Обзор методов

Выбор методики для анализа вакуумной системы определяется, с одной стороны, факторами, характеризующими эту вакуумную систему и условия ее функционирования, а с другой стороны, условиями, накладываемыми на качество и достоверность результатов, которые планируется получить.

Существует несколько уровней описания процессов, протекающих в разреженном газе, и ряд соответствующих им методов и подходов, в рамках которых реализуется замкнутая система понятий, описывающих состояние разреженного газа и интегральные характеристики вакуумных систем.

Существующие методы и подходы можно условно разделить на две основные части: аналитические и численные. Под аналитическими методами подразумеваются так называемые традиционные подходы к анализу вакуумных систем, получившие развитие в первой половине прошлого века и базирующиеся на осредненных параметрах состояния разреженного газа и на связанной с этой предпосылкой системе допущений. Модели аналитических методов относительно просты и пригодны для непосредственного использования проектировщиком. Под численными методами понимаются подходы, требующие большого количества вычислений, причем возможность применения этих методов зачастую напрямую связана с количеством вычислительных ресурсов. Развитию численных методов дали импульс увеличение мощности и совершенствование вычислительной техники во второй половине прошлого века. Необходимо отметить, что численные методы зачастую являются комбинированными и активно используют известные аналитические соотношения для представления результата.

Далее рассмотрим основные имеющиеся подходы, которые наиболее широко применяются при анализе вакуумных систем с точки зрения целесообразности и эффективности использования этих подходов в реальных актуальных задачах проектирования и оптимизации.

2.1.1. Классические аналитические методы

Одной из наиболее распространенных задач, встающих перед разработчиком вакуумных систем, является задача об определении проводимости (сопротивлении) трубопровода. Поиску корректных методов вычисления этих величин посвящена, пожалуй, большая часть публикаций по вакуумной технике. По-видимому, этот поиск дал решающий толчок серии классических исследований М. Кнудсена, М. Смолуховского и П. Клаузинга. Результаты этих и ряда других классических исследований широко известны, поэтому здесь остановимся лишь на основных этапах, наиболее выпукло

характеризующих процесс формирования и развития различных теорий и воззрений на пути анализа вакуумных систем.

Одной из простейших методик анализа вакуумных систем является теория сосредоточенных параметров, в рамках которой разреженный газ описывают термодинамически, принимая, что параметры состояния связаны между собой уравнением состояния идеального газа. Данная теория определяет такие базовые понятия вакуумной техники, как проводимость, сопротивление и быстрота действия. Согласно этой теории основная часть расчетов базируется на записи интегральных балансовых уравнений сохранения. В рамках этого подхода были выработаны основные соотношения для расчетов суммарных проводимости и сопротивления сложных составных вакуумных систем, а также основное уравнение вакуумной техники, устанавливающее связь между быстротой действия насоса $S_{\text{н}}$, присоединенного к откачиваемому объему через патрубок, имеющего проводимость U и эффективную быстроту откачки рассматриваемого объема $S_{\text{эфф}}$:

$$\frac{1}{S_{\text{эфф}}} = \frac{1}{S_{\text{н}}} + \frac{1}{U}.$$

Развитием данного подхода занимался С. Дэшман, выдвинувший гипотезу об аналогии процессов течения разреженного газа в каналах и тока в электрических цепях и предложивший известное соотношение для расчета суммарной проводимости составного трубопровода U_{Σ} :

$$\frac{1}{U_{\Sigma}} = \sum_{i=1}^N \frac{1}{U_i}.$$

Данное соотношение, однако, не учитывает так называемый пучковый эффект, когда параметры газового потока на входе в каждую следующую часть формируются предыдущей частью и структура потока приобретает сильную продольную составляющую. В результате этого эффекта параметры потока на входе в каждую следующую часть существенно отличаются от условий диффузного напуска.

Определенную коррекцию в соотношение, предложенное С. Дэшманом, внес К. Оутли. Основным понятием его теории является вероятность прохождения молекулы газа через данный элемент U . При соединении двух трубопроводов одинакового радиуса и разной длины, имеющих вероятности прохождения U_1 и U_2 соответственно, результирующая вероятность прохождения всей системы в целом U_{Σ} , составленной из двух последовательно соединенных патрубков, определяется так:

$$\frac{1}{U_{\Sigma}} = \frac{1}{U_1} + \frac{1}{U_2} - 1.$$

В. Штекельмахер в известном обзоре отмечает, что подход К. Оутли по результативности аналогичен подходу С. Дэшмана.

Вышеупомянутые подходы рассматривают задачу определения проводимости канала в стационарной постановке. Процесс нестационарной откачки некоторого объема с учетом зависимости проводимости патрубка от

давления исследовал Г.А. Тягунов. Кроме этого, он впервые описал влияние изменения температуры газа на процесс откачки и внес фундаментальный вклад в развитие классических подходов в приложении к сложным трубопроводам.

Другую теорию течения разреженного газа через канал предложил М. Кнудсен. Среди основных предпосылок его теории можно назвать следующие: молекулярный поток на поверхность формируется и определяется параметрами газовой среды в рассматриваемом элементарном объеме; поведение газа описывается в терминах механики сплошных сред при рассмотрении процессов взаимодействия молекулы со стенками не учитываются температура стенки (изотермическая система), возможность поглощения или миграции молекулы по поверхности. В рамках разработанной теории М. Кнудсеном были получены приближенные соотношения для расчета проводимости протяженного канала круглого сечения, позднее подтвержденные М. Смолуховским, который на основе подхода М. Кнудсена при более строгом рассмотрении процесса течения разреженного газа получил соотношения для расчета проводимости протяженного канала произвольного сечения.

Благодаря простому математическому аппарату теория М. Кнудсена нашла широкое применение в качестве базиса для развития аналитических подходов для анализа молекулярных течений.

Следующим этапом развития теоретических основ расчета вакуумных систем стала теория П. Клаузинга. Главным новшеством теории П. Клаузинга стал полный отказ от попытки увязать плотность падающего потока молекул на фрагмент поверхности системы с локальными характеристиками газовой среды в прилегающем объеме. Следуя П. Клаузингу, поток молекул, вылетающих через выходное сечение канала $U_{\text{тр}}$ можно выразить через поток молекул, влетающих в его входное отверстие $U_{\text{отв}}$. То есть

$$U_{\text{тр}} = kU_{\text{отв}}.$$

Данный подход развивал также и С. Дэшман, однако П. Клаузинг дал коэффициенту пропорциональности k ясное физическое истолкование и вычислил его для труб кругового и прямоугольного сечения. В рамках теории П. Клаузинга стал ясно виден ряд принципиальных моментов: значение потока через трубопровод зависит не от температуры его стенок, а только от температуры газа на входе в трубопровод; на значение потока через канал имеют влияние лишь геометрическая структура канала и параметры взаимодействия молекул со стенками — физическая модель рассеяния и характеристики поверхности с точки зрения возможности поглощения (захвата) молекул.

Как уже отмечалось, П. Клаузинг внес существенный вклад в чисто практическую область проведения вакуумных расчетов: обосновал диффузный (косинусный) закон отражения молекул от стенки, получил соотношения для расчета проводимости канала произвольной длины и разных типов поперечного сечения, одним из первых применил законы молекулярного течения газов к расчету оптической задачи, а при расчете молекулярных потоков использовал законы оптики, и т. д.

Методика П. Клаузинга получила широкое применение для расчетов проводимостей каналов, а заложенные в нее предпосылки позволяют рассматривать этот подход в качестве начального этапа развития единой универсальной методики для анализа сложных вакуумных систем. Подход П. Клаузинга для анализа вакуумных систем получил интенсивное развитие в работах Г.Л. Саксаганского [1], Ю.А. Рыжова, Ю.А. Кошмарова и др.

2.1.2. Развитие аналитических подходов в приложении к актуальным задачам вакуумной техники

Расширение областей применения вакуумной техники ощутимо увеличило спектр актуальных задач вакуумной техники, решение которых, с одной стороны, может быть найдено в рамках имеющихся классических подходов и воззрений, а с другой стороны, требует существенного развития и совершенствования методов их расчета. Наиболее простым и очевидным выходом из ситуации, когда классические подходы формулируют необходимые предпосылки, но не дают конкретных методик, применимых для анализа систем с усложняющейся геометрией или для решения новых возникающих задач, таких как анализ профилей замороженного слоя конденсата и т. п., является развитие аналитических методов расчета.

Развитие и совершенствование аналитических методик для анализа вакуумных систем в приложении к задачам, отличным от расчета проводимости трубопроводов, происходило параллельно с возникновением необходимости формирования подходов, пригодных для применения при проектировании вакуумных систем. Основными требованиями к подобным методам были простота и прозрачность математических моделей, которые не вынуждают проектировщика длительно осваивать метод, а позволяют непосредственно использовать его для решения поставленной задачи а при необходимости самостоятельно развивать и совершенствовать.

Одно из решений данной проблемы предложил Быков, разработавший простой и легко расширяемый и развиваемый аналитический метод, позволяющий проводить оценочные расчеты интегральных характеристик вакуумных систем, гораздо более сложных, чем трубопроводы.

Развитие аналитических методов анализа вакуумных систем шло не только в направлении углубления и усложнения постановки традиционных задач вакуумной техники, таких как определение интегральных характеристик вакуумных систем, но и в направлении расширения спектра решаемых задач. С развитием криовакуумной техники актуальными стали задачи изучения структуры замороживаемого слоя конденсата. А.М. Макаров сформулировал метод, позволяющий определять структуру замороженного слоя сконденсированного газа на криопанелях для различных типов источников напуска газа и геометрических характеристик системы. Полученные им соотношения позволяют быстро и без использования сложного математического аппарата получать информацию о структуре накопленного слоя.

Различные аналитические методы продолжают развиваться, поскольку сочетают в себе простоту применения и необходимую для оценочных расчетов точность.

2.1.3. Метод угловых коэффициентов

Одним из наиболее детально развитых подходов, получивших широкое распространение в расчетах вакуумных систем и выделившихся в отдельную методику, является метод угловых коэффициентов, или метод лучистой аналогии.

Как следует из названия, он строится на аналогии между закономерностями течения газа в системах с диффузно отражающими стенками и лучистого теплообмена в диатермических замкнутых средах. Данный метод строится на использовании базового понятия углового коэффициента, который выражает собой долю потока, диффузно эмитируемого с одного элементарного фрагмента поверхности (или со всей поверхности в целом) и падающего на другой элементарный фрагмент поверхности (или на другую поверхность в целом). Значения угловых коэффициентов зависят от взаимного расположения и типов поверхностей, составляющих анализируемую систему. После определения значений угловых коэффициентов с использованием параметров, характеризующих взаимодействие с поверхностью (коэффициенты поглощения или прилипания и отражения), находятся значения потоков с поверхности на поверхность, которые, в свою очередь, позволяют определять интегральные характеристики системы — проводимость, быстроту действия и т. п.

В применении к расчетам молекулярных потоков в вакуумных системах метод угловых коэффициентов активно развивали и распространяли Г.Л. Саксаганский, А.Д. Савельев, Л.С. Гуревич, С.Р. Галимов. Кроме того, метод угловых коэффициентов также широко используется при решении задач лучистого теплообмена в вакуумных системах. Особую актуальность эти задачи приобрели в контексте криовакуумных систем. Развитием метода угловых коэффициентов для анализа теплообмена излучением в приложении к задачам криовакуумной техники занимался Ю.А. Суринов.

Метод угловых коэффициентов является относительно простым в применении аналитическим методом, позволяющим проводить анализ структурно сложной системы с достаточно высокой степенью достоверности. Математический аппарат этого метода разработан настолько детально, что позволяет говорить об алгебре угловых коэффициентов («поточной алгебре») как о самостоятельном разделе общей теории теплообмена излучением. Большое количество всевозможных таблиц, дающих соотношения для определения угловых коэффициентов для множества комбинаций различных типов поверхностей и широкие возможности для их расширения и дополнения, послужило причиной распространения этого подхода в качестве одного из основных аналитических методов расчета вакуумных систем, применяемых в проектно-конструкторской практике.

2.1.4. Метод эквивалентных поверхностей

Особняком от других методов и подходов к анализу вакуумных систем стоит метод эквивалентных поверхностей. Данный подход не является методом анализа в непосредственном понимании, он представляет собой методику, органично дополняющую практически любой метод анализа, описы-

ваемый в данной главе. Суть данной методики сводится к замене сложного фрагмента вакуумной системы некоторой эквивалентной поверхностью, характеристики которой эквивалентны характеристикам всего фрагмента в целом. Таким образом, с одной стороны, происходит существенное упрощение анализируемой структуры, а с другой стороны, драматической потери точности результата не происходит, так как эквивалентная поверхность определяется как газокINETическая копия сложного фрагмента. При этом подобная схема анализа допускает и, более того, предполагает дальнейшую детализацию расчетов.

Использование данного подхода в качестве универсального дополнения практически к любому методу анализа было предложено и активно развивалось Г.Л. Саксаганским и Б.Д. Ершовым [1].

2.1.5. Метод анализа газовых потоков путем решения кинетического уравнения Л. Больцмана

Одним из наиболее строгих и общих подходов к анализу течений разреженного газа в вакуумных системах является метод, состоящий в использовании кинетического уравнения Л. Больцмана. Данное уравнение было выведено Л. Больцманом в 1872 г. Оно устанавливает взаимосвязь между скоростями молекул до и после столкновения.

Использование кинетического уравнения Л. Больцмана для анализа процессов течения разреженного газа является настолько всеобъемлющим и универсальным подходом, что для него разработаны как аналитические, так и численные методики, позволяющие использовать богатый математический аппарат на разных уровнях детализации анализируемой системы. Среди главных достоинств этого метода следует отметить возможность его использования для анализа молекулярных потоков в любом режиме течения — свободномолекулярном, переходном, сплошном.

К методикам, допускающим аналитическое решение уравнения Л. Больцмана, следует отнести моментный метод, рассмотренный М.Н. Коганом, суть которого сводится к замене уравнения Л. Больцмана системой моментных уравнений. При этом уравнению Л. Больцмана соответствует система бесконечного числа моментных уравнений, поэтому степень достоверности решения прямо связана с количеством уравнений. Существенный вклад в развитие данного подхода анализа газовых потоков внес Д.А. Лабунцов, получивший аналитические решения задачи в линейной постановке для шести- и восьмимоментного приближения.

Большая часть подходов к решению кинетического уравнения Л. Больцмана опирается на использование численных методик. В этом направлении метод использования кинетического уравнения для анализа газовых потоков развивается особенно бурно. Среди наиболее широко известных следует отметить метод прямого статистического моделирования, суть которого сводится к представлению реальных физических процессов с молекулами газа вероятностными моделями и статистическим анализом множества моделируемых процессов, и метод прямого численного решения кинетического уравнения Л. Больцмана, использование которого наиболее физически обосновано. Большой вклад в развитие направления использования чис-

ленных методов для решения уравнения Л. Больцмана внесли Ф.Г. Черемисин и А.П. Крюков.

К сожалению, при современном уровне развития вычислительной техники широкое применение методов анализа вакуумных систем с использованием решения кинетического уравнения Л. Больцмана ограничивается лишь простыми моделями рассчитываемых структур. Однако непрекращающееся развитие вычислительной мощи компьютеров вкупе с постоянным совершенствованием численных алгоритмов позволяют говорить о данном подходе как об одном из самых перспективных и универсальных методов анализа вакуумных систем.

2.1.6. Метод Монте-Карло пробной частицы

Метод Монте-Карло (далее ММК), называемый также методом статистических испытаний, является численным методом решения математических и физических задач путем моделирования характерной случайной величины. ММК был предложен в 1949 г. американскими математиками Н. Метрополисом и С. Уламом и изначально нашел применение в рассмотрении проблемы ослабления нейтронного излучения при решении кинетических уравнений, расчете интегралов и т. д. Теоретическое обоснование и вопросы прикладного применения ММК рассматривались И.М. Соболев, С.М. Ермаковым и др.

Одним из вариантов метода Монте-Карло, который используют для вакуумных расчетов, является метод пробной частицы, состоящий в моделировании движения молекул и статистической оценке результатов этого моделирования. Так как движение отдельных молекул газа подчинено законам статистической физики и носит случайный характер, ММК, как отмечал Г.Л. Саксаганский, «...полностью адекватен физической природе молекулярного переноса». При помощи метода пробной частицы анализируются различные параметры молекулярных течений внутри системы с заданной геометрией и условиями взаимодействия с поверхностями заданной системы. Метод пробной частицы используется для анализа молекулярных потоков, для которых выполняется допущение о свободномолекулярном режиме течения. Так как молекулы не сталкиваются между собой, алгоритм расчета строится таким образом, что частицы запускаются в систему по очереди и следующая запускается после того, как закончила полет предыдущая. На самом деле происходит многократный запуск одной и той же частицы, но поскольку параметры запуска и полета моделируются случайно, то считается, что все анализируемые варианты принадлежат разным частицам. Важное значение в расчетах методом пробной частицы играет датчик случайных чисел. Он должен генерировать случайное число, равномерно распределенное в заданных пределах. Стандартные датчики, предоставляемые различными языками программирования, показывают удовлетворительные результаты и вполне годятся для использования. В описанных ниже расчетах используется датчик, генерирующий случайное число, равномерно распределенное на отрезке от 0 до 1. Учет и накопление параметров полета, необходимых для анализа, ведется индивидуально для каждой час-