

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 теплопритоков через слой разреженного газа	132
3.4.4. Расчеты теплопритоков 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 фоновое 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 ХАРАКТЕРИСТИК 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