

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ «МЭИ»

А.Т. Комов

**ВАКУУМНЫЕ,
КРИОГЕННЫЕ И СВЕРХПРОВОДЯЩИЕ
СИСТЕМЫ ТОКАМАКОВ**

Учебное пособие

для студентов, обучающихся по программе
14.04.03 «Термоядерные реакторы и плазменные установки»
и 14.04.01 «Техника и физика низких температур»

Москва
Издательство МЭИ
2022

УДК 621.039.6:621.52(075.8)

ББК [22/333+31.77]я73

К 636

*Утверждено учебным управлением НИУ «МЭИ»
в качестве учебного издания*

Подготовлено на кафедре общей физики и ядерного синтеза

Рецензенты: докт физ.-мат. наук, проф., ведущий научный сотрудник
НИЦ «Курчатовский институт» В.П. Будаев;
докт. техн. наук, проф. «МГТУ им. Н.Э. Баумана»
С.Б. Нестеров

Комов, А.Т.

К 636 Вакуумные, криогенные и сверхпроводящие системы токамаков:
учеб. пособие для вузов / А.Т. Комов. – М.: Издательство НИУ МЭИ»,
2022. – 404 с.

ISBN 978-5-7046-2526-1

Приведены физические основы получения безмасляного вакуума и явления сверхпроводимости, описаны методы получения низких температур и проектирования вакуумных систем, методика расчета криогенных гелиевых установок. Описаны вакуумные, криогенные и сверхпроводящие комплексы экспериментальных термоядерных установок и международного экспериментального реактора ИТЭР.

Для студентов, обучающихся по профилям 14.04.03 «Термоядерные реакторы и плазменные установки» и 14.04.01 «Техника и физика низких температур».

УДК 621.039.6:621.52(075.8)

ББК [22/333+31.77]я73

ISBN 978-5-7046-2526-1

© Национальный исследовательский
университет «МЭИ», 2022

ОГЛАВЛЕНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ.....	7
ВВЕДЕНИЕ. ЭТАПЫ РАЗВИТИЯ ТОКАМАКОВ.....	8
Раздел I. ОСНОВЫ ВАКУУМНОЙ ТЕХНИКИ.....	18
Глава 1.1. ФИЗИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ В ВАКУУМЕ. ЯВЛЕНИЯ ПЕРЕНОСА.....	18
1.1.1. Общие положения.....	18
1.1.2. Приближенное обобщенное математическое описание явлений переноса.....	19
1.1.3. Диффузия газов.....	20
1.1.4. Перенос тепла.....	23
1.1.5. Вязкость.....	26
Глава 1.2. ТЕЧЕНИЕ ГАЗА В ВАКУУМЕ.....	29
1.2.1. Общие положения.....	29
1.2.2. Вязкостный режим течения.....	30
1.2.3. Молекулярный режим течения.....	31
1.2.4. Молекулярно-вязкостный режим течения.....	37
1.2.5. Примеры расчета проводимости.....	38
1.2.6. К расчету времени откачки.....	40
Глава 1.3. ПРИНЦИПЫ ВАКУУМНОЙ ОТКАЧКИ. МОЛЕКУЛЯРНАЯ ОТКАЧКА.....	44
1.3.1. Принципы вакуумной откачки. Классификация вакуумных насосов.....	44
1.3.2. Основы молекулярной откачки.....	45
1.3.3. Конструкции молекулярных насосов.....	50
Глава 1.4. ПРОЦЕССЫ НА ПОВЕРХНОСТИ ТВЕРДЫХ ТЕЛ. СОРБЦИЯ... ..	55
1.4.1. Общие положения.....	55
1.4.2. Гиперболическое уравнение изотермы адсорбции.....	60
1.4.3. Механизм поглощения молекул газа адсорбентом.....	64
1.4.4. Время адсорбции.....	67
Глава 1.5. НАСОСЫ ПОВЕРХНОСТНОГО ДЕЙСТВИЯ (НПД).....	69
1.5.1. Классификация НПД.....	69
1.5.2. Сорбционные насосы.....	70
1.5.3. Ионные насосы.....	72
1.5.4. Геттерные насосы.....	75
1.5.5. Геттерно-ионные насосы.....	77
Глава 1.6. КРИОГЕННАЯ ОТКАЧКА.....	87
1.6.1. Криоконденсационная откачка.....	89
1.6.2. Криоадсорбционная откачка.....	92
1.6.3. Криосорбция на газовых конденсатах.....	96
1.6.4. Конструкции высоковакуумных криогенных насосов.....	102
Вопросы для самоконтроля.....	104
Раздел II. ОСНОВЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ВАКУУМНЫХ СИСТЕМ.....	107
Глава 2.1. Типовые вакуумные системы.....	107
2.1.1. Высоковакуумная установка с масляной откачкой.....	107
2.1.2. Комбинированная вакуумная система.....	110
2.1.3. Высоковакуумная система с безмасляной откачкой.....	111
2.1.4. Высоковакуумная установка с турбомолекулярной откачкой... ..	112

Глава 2.2. МЕТОДИКА РАСЧЕТА И ПРОЕКТИРОВАНИЯ КРИОВАКУУМНЫХ НАСОСОВ (КВН).....	113
2.2.1. Структурная схема КВН.....	113
2.2.2. Схема проектного расчета КВН.....	115
Глава 2.3. КОНСТРУКТИВНЫЕ ОСОБЕННОСТИ КРИОВАКУУМНЫХ НАСОСОВ (КВН).....	130
2.3.1. Конструкции криопанелей (КП).....	130
2.3.2. Теплозащитные экраны. Тепловая изоляция.....	132
2.3.3. Режимы работы КВН.....	137
Глава 2.4. НЕКОТОРЫЕ ВОПРОСЫ ВЫСОКОВАКУУМНОЙ ТЕХНОЛОГИИ.....	140
2.4.1. Материалы высоко- и сверхвысоковакуумных систем.....	140
2.4.2. Неразборные вакуумные соединения.....	145
2.4.3. Разборные вакуумные соединения.....	150
Глава 2.5. ИЗМЕРЕНИЕ ПАРЦИАЛЬНЫХ ДАВЛЕНИЙ. МАСС-СПЕКТРОМЕТРЫ.....	158
2.5.1. Общие положения. Структура масс-спектрометров.....	158
2.5.2. Ионные источники.....	161
2.5.3. Спектр масс и его расшифровка.....	163
2.5.4. Статические масс-спектрометры.....	164
2.5.4.1. Магнитный газоанализатор.....	164
2.5.4.2. Панорамный газоанализатор (фарвитрон).....	167
2.5.5. Динамические масс-спектрометры.....	168
2.5.5.1. Циклотронный газоанализатор (омегатрон).....	168
2.5.5.2. Квадрупольный масс-спектрометр.....	171
2.5.5.3. Времяпролетные газоанализаторы (хронотроны)....	172
2.5.5.4. Монополярный масс-спектрометр.....	174
2.5.6. Течеискатели.....	177
2.5.6.1. Качественные методы течеискания.....	177
2.5.6.2. Гелиевый течеискатель.....	178
2.5.6.3. Галогенный течеискатель.....	180
РАСЧЕТ КРИОВАКУУМНОГО НАСОСА ДЛЯ ОТКАЧКИ ГЕЛИЙ-ВОДОРОДНОЙ СМЕСИ.....	182
Вопросы для самоконтроля.....	189
Раздел III. ВАКУУМНЫЕ СИСТЕМЫ ТЕРМОЯДЕРНЫХ УСТАНОВОК (ТЯУ) И РЕАКТОРОВ (ТЯР).....	191
Глава 3.1. ОСОБЕННОСТИ ВАКУУМНЫХ СИСТЕМ ТЯУ.....	191
3.1.1. Основные параметры вакуумных систем.....	191
3.1.2. Выбор средств вакуумной откачки.....	195
Глава 3.2. СТРУКТУРА И СОСТАВ ВАКУУМНЫХ СИСТЕМ ТЯУ.....	202
3.2.1. Структура вакуумных систем.....	202
3.2.2. Компоновка и технологическая подготовка разрядной камеры...	203
3.2.3. Вакуумные системы инжектора, криостата, комплекса высокочастотного нагрева.....	212
3.2.4. Комплекс вакуумной откачки разрядной камеры.....	216
Глава 3.3. СИСТЕМА КРИОВАКУУМНОЙ ОТКАЧКИ ИТЭР.....	218
3.3.1. Общая характеристика вакуумной системы.....	221
3.3.2. Описание системы вакуумной откачки разрядной камеры...	224
3.3.3. Режимы работы криовакуумного насоса.....	226
3.3.4. Сепарация аргона.....	230

3.3.5. Конструкция криовакуумного насоса.....	232
3.3.6. Компоновка вакуумной системы.....	235
РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ КРИОВАКУУМНОГО НАСОСА.....	238
Вопросы для самоконтроля.....	244
Раздел IV. ЯВЛЕНИЕ СВЕРХПРОВОДИМОСТИ.....	246
Глава 4.1. ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ЯВЛЕНИЯ СВЕРХПРОВОДИМОСТИ.....	246
4.1.1. Определения. Историческая справка.....	246
4.1.2. Качественное объяснение физики явления сверхпроводимости.....	256
4.1.3. Феноменологическая теория сверхпроводимости.....	260
Глава 4.2. ТЕХНОЛОГИЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ СВЕРХПРОВОДЯЩИХ КАБЕЛЕЙ.....	262
4.2.1. Области применения сверхпроводимости.....	262
4.2.2. Классификация сверхпроводников.....	264
4.2.3. Прикладные свойства сверхпроводящих материалов.....	268
4.2.4. Экструзия.....	273
4.2.5. «Бронзовая технология».....	274
4.2.6. Сверхпроводящие кабели.....	277
4.2.7. ВТСП-провода 1-го и 2-го поколений.....	281
Вопросы для самоконтроля.....	283
Раздел V. ОСНОВЫ КРИОГЕННОЙ ТЕХНИКИ. МЕТОДЫ ПОЛУЧЕНИЯ НИЗКИХ ТЕМПЕРАТУР.....	284
Глава 5.1. ОСОБЕННОСТИ ОБЛАСТИ КРИОГЕННЫХ ТЕМПЕРАТУР....	284
5.1.1. Общие сведения о криогенной технике.....	284
5.1.2. Некоторые основные термодинамические понятия и определения.....	286
5.1.3. Теплофизические свойства некоторых криоагентов.....	287
Глава 5.2. ОСНОВНЫЕ ПРОЦЕССЫ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ НИЗКИХ ТЕМПЕРАТУР.....	289
5.2.1. Общая характеристика и классификация термомеханических методов внутреннего охлаждения.....	289
5.2.2. Дросселирование ($h = \text{const}$).....	292
5.2.3. Процесс $S = \text{const}$. Расширение газа в детандере.....	298
5.2.4. Процесс $\alpha_s = \text{const}$. Выхлоп или свободный выпуск газа из баллона.....	301
5.2.5. Охлаждение за счет вакуумирования парового пространства....	302
Глава 5.3. МЕТОДИКА РАСЧЕТА И ОПТИМИЗАЦИИ ПАРАМЕТРОВ РАБОЧЕГО ТЕЛА В КРИОГЕННЫХ УСТАНОВКАХ.....	303
5.3.1. Схема расчета гелиевого рефрижератора с параллельным включением детандеров.....	303
Глава 5.4. ОБЩИЕ ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ СХЕМ КРИОГЕННЫХ УСТАНОВОК (КУ).....	309
5.4.1. Идеальные циклы КУ.....	310
5.4.2. Способы понижения давления прямого потока.....	313
5.4.3. Процесс в СПО с расширением потока в детандере.....	318
РАСЧЕТ И ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ РАБОЧЕГО ТЕЛА В КРИОГЕННОЙ УСТАНОВКЕ С ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНЫМ СОЕДИНЕНИЕМ ДЕТАНДЕРОВ.....	320
Вопросы для самоконтроля.....	325

Раздел VI. КРИОГЕННЫЕ СИСТЕМЫ ТЕРМОЯДЕРНЫХ УСТАНОВОК И РЕАКТОРОВ.....	327
Глава 6.1. ТИПОВАЯ СИСТЕМА КРИОГЕННОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ (СКО) ИНЖЕКТОРОВ БЫСТРЫХ НЕЙТРАЛЬНЫХ АТОМОВ.....	327
6.1.1. Основные параметры СКО инжектора.....	327
6.1.2. Описание структуры СКО инжектора.....	328
6.1.3. Режимы работы СКО инжектора.....	332
Глава 6.2. СИСТЕМА КРИОГЕННОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ТЕРМОЯДЕРНЫХ УСТАНОВОК.....	335
6.2.1. СКО больших токамаков.....	335
6.2.2. Описание структуры и режимов работы системы.....	336
6.2.3. Режимы работы системы криогенного обеспечения T-15.....	343
6.2.4. О выборе теплоносителя для охлаждения СОТТ.....	346
Глава 6.3. СИСТЕМА КРИОГЕННОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ МЕЖДУНАРОДНОГО ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ТЕРМОЯДЕРНОГО РЕАКТОРА.....	349
6.3.1. Общее описание системы.....	349
6.3.2. Описание конструкции отдельных систем.....	359
6.3.3. Процедура охлаждения ИТЭР от 300 до 4,5 К.....	366
6.3.4. Перекачка гелия в холодный резервный танк в период разряда.....	368
6.3.5. Охлаждение катушек тороидального поля после быстрого разряда.....	369
Глава 6.4. СВЕРХПРОВОДЯЩИЕ СИСТЕМЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ТЕРМОЯДЕРНЫХ УСТАНОВОК И РЕАКТОРА.....	370
6.4.1. Сверхпроводящие магнитные системы T-7.....	370
6.4.2. Сверхпроводящая магнитная система T-15.....	372
6.4.3. Сверхпроводящая магнитная система Torus-Supra.....	383
6.4.4. Сверхпроводящая магнитная система ИТЭР.....	385
РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ СВЕРХПРОВОДЯЩИХ МАГНИТНЫХ СИСТЕМ.....	395
Вопросы для самоконтроля.....	403
СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ.....	403

Учебное издание

Комов Александр Тимофеевич

ВАКУУМНЫЕ, КРИОГЕННЫЕ И СВЕРХПРОВОДЯЩИЕ СИСТЕМЫ ТОКАМАКОВ

Учебное пособие

Редактор С.В. Казакова
Компьютерная верстка М.К. Петушкевой

Подписано в печать	08.04.22.	Печать офсетная.	Формат 60x84 1/16
Печ. л. 25,25.	Тираж 100 экз.	Изд. № 21у-076	Заказ № 157

Оригинал-макет подготовлен в РИО НИУ «МЭИ».
111250, г. Москва, ул. Красноказарменная, д. 14.
Отпечатано в типографии НИУ «МЭИ».
111250, г. Москва, ул. Красноказарменная, д. 13