

Н.А. Капцов

**Физические явления в вакууме и
разреженных газах**

**Москва
«Книга по Требованию»**

УДК 53
ББК 22.3
Н11

Н11 **Н.А. Капцов**
Физические явления в вакууме и разреженных газах / Н.А. Капцов – М.: Книга по Требованию, 2024. – 441 с.

ISBN 978-5-458-25394-9

Книга содержит изложение физических основ вакуумтехники и описание и теорию прохождения электрического тока через вакуум и газы. По своему объему и изложению она предназначена для инженерно-технических и лабораторных работников электровакуумной промышленности, для работников исследовательских физических лабораторий и для студентов соответствующих специальностей втузов и вузов. Предполагается, что читатель знаком с элементарными главами математического анализа.

ISBN 978-5-458-25394-9

© Издание на русском языке, оформление
«YOYO Media», 2024
© Издание на русском языке, оцифровка,
«Книга по Требованию», 2024

Эта книга является репринтом оригинала, который мы создали специально для Вас, используя запатентованные технологии производства репринтных книг и печати по требованию.

Сначала мы отсканировали каждую страницу оригинала этой редкой книги на профессиональном оборудовании. Затем с помощью специально разработанных программ мы произвели очистку изображения от пятен, клякс, перегибов и попытались отбелить и выровнять каждую страницу книги. К сожалению, некоторые страницы нельзя вернуть в изначальное состояние, и если их было трудно читать в оригинале, то даже при цифровой реставрации их невозможно улучшить.

Разумеется, автоматизированная программная обработка репринтных книг – не самое лучшее решение для восстановления текста в его первоизданном виде, однако, наша цель – вернуть читателю точную копию книги, которой может быть несколько веков.

Поэтому мы предупреждаем о возможных погрешностях восстановленного репринтного издания. В издании могут отсутствовать одна или несколько страниц текста, могут встретиться невыводимые пятна и кляксы, надписи на полях или подчеркивания в тексте, нечитаемые фрагменты текста или загибы страниц. Покупать или не покупать подобные издания – решать Вам, мы же делаем все возможное, чтобы редкие и ценные книги, еще недавно утраченные и несправедливо забытые, вновь стали доступными для всех читателей.

В заключение выражаю мою глубокую благодарность инж. В. И. За-туловскому, который в бытность свою студентом Плехановского инсти-тута записал курс моих лекций по вакуум-технике, сотруднику ВЭИ М. С. Шипалову, оказавшему мне большую помощь в составлении и изготовлении чертежей, и моим сотрудникам по Лаборатории электри-ческих явлений в газах Научно-исследовательского института физики МГУ В. Г. Сливаку, П. В. Тимофееву и С. Д. Гвоздоверу за добрые советы и указания.

Москва, 1 июня 1932 г.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие ко второму изданию	3
Предисловие к первому изданию	4
глава 1. Введение	10
глава 2. Сведения из кинетической теории газов.	
§ 1. Вывод основного уравнения кинетической теории	14
§ 2. Максвелловское распределение скоростей: средняя скорость; наиболее вероятная скорость	19
§ 3. Элементарный подсчет средней длины свободного пути	26
§ 4. Вероятность данной длины свободного пути	34
§ 5. Закон косинуса. Число молекул, ударяющихся об 1 см ² стенки в 1 сек при максвелловском распределении скоростей	35
§ 6. Поведение газов при низких давлениях	38
§ 7. Теплоемкость газов	39
§ 8. Вырожденный газ. Распределение скоростей Ферми	42
глава 3. Теория и практика вакуумных насосов.	
§ 1. Скорость действия насоса	45
§ 2. Классификация насосов	47
§ 3. Масляные поршневые и ротационные насосы	48
§ 4. Молекулярные насосы	55
§ 5. Ртутные диффузионные и конденсационные насосы	59
§ 6. Многоступенчатые насосы	67
§ 7. Ртутные насосы прежних типов	69
§ 8. Конденсационные насосы с применением органических веществ вместо ртути	70
глава 4. Теория и практика манометров.	
§ 1. Ртутные манометры	73
§ 2. Механические вакуумметры	74
§ 3. Манометр Мак-Леода	74
§ 4. Абсолютный манометр Кнудсена; радиометрические манометры	82
§ 5. Манометры, основанные на теплопроводности газа	91
§ 6. Ионизационный манометр	95
§ 7. Манометры, основанные на трении	101
§ 8. Градуировка манометра	102
§ 9. Определение давления в готовых вакуумных приборах, в частности в лампах накаливания	102
§ 10. Применение газового разряда для определения степени разрежения	106
глава 5. Химические, электрохимические и абсорбционные способы получения высокого вакуума. Влияние стеклянных стенок и металлических частей на вакуум.	
§ 1. Поглощение газов твердыми телами	107
§ 2. Улучшение вакуума путем поглощения газов углем	108
§ 3. Обезгаживание стекла и металлов	109
§ 4. Химические способы получения вакуума и процессы „жестчения“ газа	113
§ 5. Изменение вакуума в стеклянных сосудах с течением времени	118

глава 6. Общие принципы и детали устройства насосных установок.	
§ 1.	Законы протекания газа по трубкам 119
§ 2.	Скорость откачки 131
§ 3.	Сопротивление узких отверстий движению газа 134
§ 4.	Зависимость давления от температуры в разных частях вакуум-аппаратуры. Явление термической эффузии. 135
§ 5.	Практическое осуществление вакуум-установок 138
глава 7. Методы откачки некоторых вакуумных изделий.	
§ 1.	Лампы накаливания 149
§ 2.	Откачка катодных ламп и других изделий 153
глава 8. Элементарные процессы на границе между твердыми телами и вакуумом или газом: термоионная и автоэлектронная эмиссия, фотоэффект, вторичная электронная эмиссия.	
§ 1.	Электрические явления в газах 155
§ 2.	Экспериментальная сторона явления термоионной эмиссии 156
§ 3.	Первая формула Ричардсона 159
§ 4.	Формула Ричардсона-Дэшмэна 161
§ 5.	Экспериментальная проверка эмиссионных формул и определение работы выхода ϕ и константы A 171
§ 6.	Соотношение между работой выхода и контактной разностью потенциалов двух металлов 173
§ 7.	Теория эмиссии Шоттки. Зависимость работы выхода от внешнего поля 175
§ 8.	Вырывание электронов из металла сильным полем 179
§ 9.	Распределение скоростей в потоке электронов при термоионной эмиссии 181
§ 10.	Эмиссия мономолекулярных слоев. Торируемые, оксидные и бариевые катоды 182
§ 11.	Оксидные катоды 185
§ 12.	Эмиссия положительных ионов 187
§ 13.	Шрот-эффект 188
§ 14.	Внешний фотоэффект 189
§ 15.	Вторичная электронная эмиссия 194
глава 9. Элементарные процессы, происходящие в объеме газа и при ударе положительных ионов, возбужденных и нейтральных атомов о катод.	
§ 1.	Объемная ионизация газа 197
§ 2.	Ионизация и возбуждение газа ударами электронов. Соударения первого и второго рода 197
§ 3.	Ионизация при столкновении с положительными ионами 211
§ 4.	Термическая ионизация и термическое возбуждение 212
§ 5.	Объемная фотоионизация газа 214
§ 6.	Вторичная эмиссия электронов с катода под действием положительных ионов, возбужденных и нейтральных атомов 214
§ 7.	Образование отрицательных ионов 216
§ 8.	Остаточная ионизация газа 216
глава 10. Движение ионов и электронов в газе. Различные типы газовых ионов.	
§ 1.	Законы образования и рекомбинации ионов 219
§ 2.	Диффузия ионов и электронов 223
§ 3.	Характер движения заряженных частиц в газе. Подвижность ионов и электронов 224
§ 4.	Длина свободного пути электронов и ионов. Эффект Рамзауера. 232
глава 11. Теория пространственных зарядов. Определение потенциала в данной точке ионизированного газа.	
§ 1.	Пространственный заряд. Формулы Ленгмюра 236
§ 2.	Простые холодные зонды 245

§ 3. Накаленные зонды	246
§ 4. Теория зондов Ленгмюра и Мотт-Смита	247
§ 5. Поверхностные заряды на стекле. Явление псевдовакуума	256
глава 12. Классификация и общие свойства электрических разрядов в газах.	
§ 1. Элементарные процессы при газовом разряде	258
§ 2. Различные виды газового разряда	259
§ 3. Характеристика газового разряда	261
§ 4. Внешние условия устойчивости газового разряда	262
глава 13. Таунсендовский разряд и переход разряда из несамостоятельного в самостоятельный.	
§ 1. Теория Таунсенда	268
§ 2. Переходная форма разряда от Таунсендовского к тлеющему	280
§ 3. Коэффициенты α и β Таунсенда. Закон Пашена	281
§ 4. Запаздывание зажигания разряда. Роль пространственных зарядов в процессе зажигания разряда	287
§ 5. Теория разряда Роговского	290
§ 6. Зависимость потенциала зажигания от различных условий	293
глава 14. Тлеющий разряд.	
§ 1. Характерные признаки и составные части тлеющего разряда	299
§ 2. Переход от тихого разряда к тлеющему и от тлеющего к дуговому. Характеристика тлеющего разряда. Распределение потенциала	301
§ 3. Астоново темное пространство. Первое катодное свечение. Круковско темное пространство	303
§ 4. Закон Геля. Нормальное и аномальное катодное падение потенциала	305
§ 5. Распределение поля у катода. Световое излучение катодных частей. Механические силы на катоде	308
§ 6. Катодное распыление	310
§ 7. Элементарные процессы в катодных частях тлеющего разряда	312
§ 8. Каналовые лучи	317
§ 9. Тлеющее свечение и фарадеево темное пространство	318
§ 10. Анодные части разряда	319
§ 11. „Остов“ разряда и „положительный столб“	321
§ 12. Теория положительного столба	326
§ 13. Слоистый разряд	335
глава 15. Дуговой разряд.	
§ 1. Характерные признаки и виды дугового разряда	339
§ 2. Специфические явления в термоионных и автоэлектронных дугах	340
§ 3. Образование дуги	343
§ 4. Катодное пятно. Внешний вид и отдельные части дугового разряда	346
§ 5. Распределение потенциала в дуговом разряде	348
§ 6. Характеристика дугового разряда	349
§ 7. Температура и излучение отдельных частей дугового разряда	354
§ 8. Технические применения дуги в газах при атмосферном давлении	356
глава 16. Искровой разряд.	
§ 1. Общая картина и отдельные виды искрового разряда	360
§ 2. Элементарные процессы в искровом разряде	361
§ 3. Потенциал зажигания искрового разряда	362
§ 4. Скользящий искровой разряд	362
глава 17. Коронный разряд.	
§ 1. Условия возникновения и общая картина коронного разряда	364
§ 2. Корона постоянного тока между двумя концентрическими цилиндрами	366

§ 3. Корона постоянного тока при одном коронирующем проводе и любом сечении второго цилиндрического электрода	375
§ 4. Случай двух коронирующих проводов	378
§ 5. Потери на корону переменного тока	379
глава 18. Разряды с посторонним источником возбуждения.	
§ 1. Разряды с интенсивной фотоэлектрической эмиссией на катоде	381
§ 2. Разряды с раскаленным катодом	384
§ 3. Низковольтная дуга	388
глава 19. Высокочастотные разряды.	
§ 1. Различные виды высокочастотных разрядов	392
§ 2. Высокочастотный разряд с внешними и внутренними электродами	392
§ 3. Безэлектродный кольцевой разряд	396
§ 4. Явление послесвечения	402
глава 20. Применение явлений газового разряда для освещения и других технических целей.	
§ 1. Источники света, использующие катодное свечение	403
§ 2. Лампы для телевидения	404
§ 3. Высоковольтные газосветные трубки	406
§ 4. Трубки интенсивного горения	408
§ 5. „Лампы солнечного света“	415
§ 6. Применение приборов газового разряда для различных целей. Выпрямители; преобразователи тока; тиратроны	415
Указатель имен	418
Предметный указатель	421
Указатель литературы	425

ГЛАВА ПЕРВАЯ

ВВЕДЕНИЕ

Первые главы настоящей книги посвящены детальному ознакомлению с физическими основами вакуум-техники и практическими приемами получения и измерения высокого вакуума. Эта область одинаково нужна физика и инженеру, работающим как в области чисто вакуумных приборов, так и в области источников света и других приборов, основанных на электрических явлениях в газах. В самом деле, для того, чтобы создать хороший наполненный тем или иным газом прибор, надо сперва создать прибор, удовлетворяющий всем условиям высокого вакуума, и лишь затем произвести его наполнение. В истории создания высокого вакуума успехи физики неизменно переплетались и продолжают переплетаться с успехами техники. Усовершенствовать методы откачки начали с тех пор, как появилась лампа накаливания, так как оказалось, что качество этой лампы и ее долговечность зависят от создаваемого в ней вакуума. Внимательное изучение явлений, происходящих в лампе накаливания в сильно разреженном газе, окружающем раскаленную (угольную или металлическую) нить, привело к открытию явлений термоионной эмиссии. Эти явления, в свою очередь, послужили основанием для создания катодной лампы. Хорошая катодная лампа потребовала еще более низкого давления остаточного газа, чем лампа накаливания, и дала новый толчок к изучению физических явлений в высоком вакууме (Кнудсен, Геде, Ленгмюр), приведший к созданию высоковакуумных насосов совершенно новых типов, работающих на основании новых принципов. Таким образом в этой области задачи техники постоянно стимулировали новые научные исследования, а достигнутые этими исследованиями результаты приводили к новым успехам техники. То же самое наблюдается в настоящее время по отношению к изучению явлений электрического разряда в газах. Как и физика вакуума, эти явления находят себе применение, с одной стороны, в развитии осветительной техники, с другой в технике выпрямления и усиления токов. Эти вопросы являются существенными в вопросах связи и в вопросах передачи энергии по проводам, а в будущем и без проводов.

Так как всякий вакуум представляет собой, собственно говоря, лишь очень сильно разреженный газ, то невозможно провести резкую грань между физикой вакуума и физикой газов. Эта грань еще больше стирается благодаря тому обстоятельству, что почти для всех целей, для которых прежде применялись лишь приборы с высоким вакуумом, в настоящее время все более и более входят в употребление приборы, основанные на ионизации газа. В настоящей книге объединены физика

вакуума и физика электрических разрядов в газах. Специальные вопросы, относящиеся к физике и технике вакуума, сконцентрированы в первых семи главах.

Нельзя не остановиться и на том громадном значении, которое имели исследования в области разреженных газов для других областей физики, в частности для теории строения материи. Как раз при прохождении электрического тока через газы мы имеем дело со свечением, обусловленным отдельными атомами и молекулами газа. Можно смело сказать, что все развитие учения о спектрах атомов основано на наблюдениях явлений газового разряда. Но кроме излучения света атомами в явлениях газового разряда происходит много других молекулярных и атомных процессов. Здесь мы имеем дело с постоянными взаимодействиями атомов, ионов и электронов. Явления электрического разряда в газах в своих деталях остаются непонятными без подробного изучения этих элементарных атомных и электронных процессов. Отсюда понятно, какой сильный толчок для изучения этих элементарных явлений, тесно связанных со строением атома, дали работы в области явлений газового разряда.

Попытки получить газы под пониженным давлением берут свое начало с известных из начального курса физики опытов бургомистра города Магдебурга Герике, построившего в XVII столетии первый поршневого насос для откачки воздуха. Высокий вакуум был осуществлен впервые в барометрической трубке опытами Торичелли. Насос Герике основан на принципе механического создания вакуума путем использования свойства любого газа расширяться и занимать весь предоставленный ему объем и механического удаления газа. Принцип получения высокого вакуума в барометрической трубке Торичелли основан на законах сообщающихся сосудов и равенства давления атмосферы давлению столба ртути высотой 760 мм (в среднем на уровне моря). На этих двух принципах основано действие решительно всех насосов, применявшихся для получения вакуума вплоть до первого десятилетия XX века, когда более глубокое изучение явлений в разреженных газах позволило применить для построения современных насосов высокого вакуума совершенно новые принципы (молекулярный, диффузионный, конденсационный насосы).¹ Точно так же и измерение низких давлений перешло теперь от простого применения принципа сообщающихся сосудов к определению давления на основании таких физических явлений, как теплопроводность, внутреннее трение, ионизация газа, или, например, зависимость термоионной эмиссии от окружающего газа.

Наиболее употребительной единицей для измерения давлений служат миллиметры ртутного столба (мм Hg). Единица давления в 1 мм ртутного столба называется в настоящее время „тор“ (по имени Торичелли). Единицей для измерения давлений в системе CGS служит дина на квадратный сантиметр. Эта единица применяется в вакуум-физике американскими, английскими и французскими авторами и называется „бар“ („a bar“, „une baru“).
Простой расчет дает:

$$1 \text{ мм Hg} = 1 \text{ тор} = 0,1356 \text{ г/см}^2 = 981,01356 \text{ дина/см}^2.$$

Отсюда:

$$1 \text{ бар} = 0,745 \cdot 10^{-3} \text{ тор}$$

10^6 бар называется мегабаром и приблизительно равно одной атмосфере.

Современные способы измерения низких давлений дают возможность более или менее надежно определять давления вплоть до 10^{-8} мм Hg. Предельный вакуум, достижимый современными насосами, соответствует более низкому давлению: можно добиться такого разрежения газа, что наиболее чувствительные манометры ничего не показывают. При достижении такого высокого вакуума приходится считаться не только с действием насоса, но и с выделением газа со стенок и металлических частей всей аппаратуры и откачиваемого предмета. Последнее явление играет вообще очень большую роль в вакуум-технике, и потому явления поглощения и выделения газов твердыми телами (адсорбция, абсорбция, окклюзия) составляет существенную главу вакуум-физики.

В настоящее время существует целый ряд иностранных руководств по вакуум-технике, из которых каждое также более или менее затрагивает и физику вакуума. Из них основными можно считать следующие:

L. Dupouet, *La technique du vide*. Paris 1924.

S. Dushman, *Production and Measurement of High Vacuum*. Schenectady N Y. 1922.

A. Goetz, *Physik und Technik des Hochvakuums*, Braunschweig 1926. 2-е издание (дополненное).

Книги Дюнуайе и Дёшмэна переведены на русский язык, равно как и монография Дёшмэна в серии Успехи физики. Полезные практические указания по вакуум-технике можно также найти в книге Ангерер „Техника физического эксперимента“.

Изучение явлений газового разряда началось в XVIII веке с наблюдения электрических разрядов в атмосферном воздухе, получаемых при помощи электростатической машины. Первое техническое применение получил вид разряда называемый теперь „дуговым разрядом“ — вольтова дуга. В конце прошлого столетия главнейшие виды разряда получили более или менее подробное феноменологическое описание и было установлено, что газовый разряд связан с „ионизацией газа“, т. е. с появлением в газе положительно и отрицательно заряженных частиц. Сущность процесса ионизации долгое время оставалась загадочной. Правильные количественные (энергетические) соотношения были установлены в этой области лишь начиная с опытов Франка и Герца (1913 г.). Эти опыты совпали по времени с возникновением теории атома Бора. Лишь с этого момента стало возможным планомерное развитие теории газового разряда, основанное на расшифровании элементарных процессов в разряде — т. е. тех явлений, в которых участвуют отдельные атомы, ионы или электроны. Несколько ранее (1900 г.) возникла, не потерявшая значения в феноменологической своей части, теория электронных лавин Таунсенда. Описанию и изложению законов элементарных процессов в газовом разряде, а также законам движения электронов и ионов в газе посвящены VIII, IX, X и XI главы этой книги. Глава XII занимается классификацией и некоторыми общими свойствами газовых разрядов. Последующие главы содержат описание и теорию отдельных

видов разряда. В главе XX приведены краткие данные о технических приложениях газового разряда. По газовому разряду в настоящее время имеются следующие руководства:

1) А. Энгель и М. Штенбек, *Физика и техника электрического разряда в газах* том I ОНТИ 1935, т. II ОНТИ 1936—перевод с немецкого.

2) R. Seeliger, *Einführung in die Physik der Gasentladungen* 2-ое издание, Лейпциг 1934.

3) J. J. Thomson and G. P. Thomson, *Conduction of Electricity through Gases* 3-е издание, Кембридж, том I, 1928; том II 1933.

4) К. К. Дарроу, *Electrical Phenomena in Gases* Балтимора 1932.

Кроме того статьи в *Handbuch der Physik* Geiger und Scheel том XIV и в *Handbuch der Experimentalphysik* Harms und Wien том XIII, 1-ая, 2-ая и 3-я часть, том XXII, гл. 4 (Ionen in Gasen) и том XXIII, гл. 2 (*Anregung von Quantensprungen durch Stosse*).

Журнальная литература по отдельным вопросам указана по главам в конце этой книги. Там же указаны руководства, подробно трактующие изложенные в отдельных главах вопросы (как то термоионная эмиссия, фотоэффект и т. д.).

СВЕДЕНИЯ ИЗ КИНЕТИЧЕСКОЙ ТЕОРИИ ГАЗОВ

§ 1. Вывод основного уравнения кинетической теории. Согласно представлениям современной физики все материальные тела состоят из очень большого числа весьма малых частиц, называемых молекулами. Все явления, связанные с деформацией тел, переходом тел из одного состояния в другое, с их нагреванием и передачей тепла, физика объясняет, исходя из рассмотрения расположения молекул, их движения и действующих между ними сил.

В газах, согласно кинетической теории материи, молекулы настолько удалены друг от друга, что действующими между ними силами можно пренебречь. Следовательно, можно считать, что молекулы между столкновениями их друг с другом и со стенками сосуда движутся прямолинейно и равномерно.

Уравнение состояния таких идеальных газов, т. е. уравнение, связывающее объем, давление и температуру газа, гласит:

$$pV = RT, \quad (1)$$

где T — температура газа по абсолютной шкале.

Если отнести это уравнение не к какому-либо количеству газа, а к граммолекуле¹⁾, то R оказывается величиной одинаковой для всех газов, численно равной

$$8,315 \cdot 10^7 \text{ эрг/градус};$$

R называется *газовой постоянной*.

Так как в вакуум-технике мы имеем дело с газами в состоянии большого разрежения, когда их свойства чрезвычайно близки к свойствам „идеальных газов“, то мы можем с очень большой степенью точности и для реальных газов пользоваться уравнением состояния (1).

Движение молекул газа, находящегося в целом в покое, совершенно беспорядочное, ни одно направление не преобладает; каждая данная молекула постоянно меняет направление своего движения, сталкиваясь со стенками сосуда или с другими молекулами. Скорости движения отдельных молекул различны.

Давление газа на стенку есть результат быстро следующих друг за другом ударов молекул. Чтобы установить связь между движением молекул и давлением газа, возьмем в сосуде, где помещен газ, какую-нибудь

¹⁾ Грамммолекулой называется количество граммов данного вещества, равное численно его молекулярному весу.