



Р. ФЕЙНМАН



Р. ЛЕЙТОН



М. СЭНДС

Р. ФЕЙНМАН

Р. ЛЕЙТОН

М. СЭНДС

ФЕЙНМАНОВСКИЕ ЛЕКЦИИ ПО ФИЗИКЕ

ЗАДАЧИ И УПРАЖНЕНИЯ



Издательство АСТ
Москва

УДК 53(075)
ББК 22.3я7
Ф36

Серия «Фейнмановские лекции по физике»

Richard P. Feynman, Robert B. Leighton, Matthew Sands
EXERCISES FOR THE FEYNMAN LECTURES
ON PHYSICS

Печатается с разрешения издательства Basic Books,
an imprint of Perseus Books, LLC, a subsidiary of Hachette Books Group,
Inc., New York, New York, USA (США) при содействии
Агентства Александра Корженевского (Россия).

Компьютерный дизайн *В.А. Воронина*

Перевод с английского *С.А. Иванова*

Фейнман, Ричард.

Ф36 Фейнмановские лекции по физике. Задачи и упражнения / Ричард Фейнман, Роберт Лейтон, Мэтью Сэндс ; [перевод с английского С.А. Иванова]. — Москва : Издательство АСТ, 2021. — 400 с. — (Фейнмановские лекции по физике).

ISBN 978-5-17-136615-5

Настоящее издание представляет собой полный сборник задач к «Фейнмановским лекциям по физике». В заключительном разделе книги содержатся ответы и решения.

УДК 53(075)
ББК 22.3я7

Оглавление

Предисловие.	7
----------------------	---

ЗАДАЧИ К ТОМУ I (оригинального издания)

Введение	11
--------------------	----

Том I (выпуск 1–2)

Глава 1. Атомы в движении.	13
Глава 2. Закон сохранения энергии, статика	16
Глава 3. Законы Кеплера и гравитация.	28
Глава 4. Кинематика	32
Глава 5. Законы Ньютона	38
Глава 6. Закон сохранения импульса	44
Глава 7. Векторы	48
Глава 8. Нерелятивистская теория столкновений двух тел в трех измерениях	52
Глава 9. Силы	61
Глава 10. Потенциалы и поля	68
Глава 11. Единицы измерений и размерности	75
Глава 12. Релятивистская кинематика и динамика, эквивалентность массы и энергии покоя.	78
Глава 13. Релятивистские энергия и импульс	80
Глава 14. Вращение в двух измерениях, центр масс	83
Глава 15. Угловой момент (момент импульса), момент инерции	88
Глава 16. Вращение в трех измерениях.	95
Глава 17. Гармонический осциллятор, линейные дифференциальные уравнения	107
Глава 18. Алгебра	117
Глава 19. Вынужденные колебания с затуханием.	120

Том II (выпуск 3–4)

Глава 20. Геометрическая оптика	131
Глава 21. Электромагнитное излучение: интерференция	137
Глава 22. Электромагнитное излучение: дифракция.	141
Глава 23. Электромагнитное излучение: преломление, поглощение	146
Глава 24. Электромагнитное излучение: радиационное затухание, рассеяние	147
Глава 25. Электромагнитное излучение: поляризация.	149
Глава 26. Электромагнитное излучение: релятивистские эффекты	152

Глава 27. Квантовые явления: волны, частицы и фотоны	155
Глава 28. Кинетическая теория газов	159
Глава 29. Принципы статистической механики	163
Глава 30. Применение кинетической теории: равновесное распределение	167
Глава 31. Применение кинетической теории: явления переноса	169
Глава 32. Термодинамика	173
Глава 33. Примеры из термодинамики	178
Глава 34. Волновое уравнение, звук.	182
Глава 35. Линейные волновые системы: биения, собственные колебания	185
Глава 36. Фурье-анализ волн	189

ЗАДАЧИ К ТОМУ II (оригинального издания)

Введение	193
--------------------	-----

Том III (выпуск 5)

Глава 37. Электромагнетизм	195
Глава 38. Дифференциальный расчет векторных полей.	197
Глава 39. Интегральное исчисление векторов.	200
Глава 40. Электростатика	202
Глава 41. Применение закона Гаусса	204
Глава 42. Электрическое поле в различных физических условиях	208
Глава 43. Электрическое поле в различных физических условиях (продолжение)	213
Глава 44. Электростатическая энергия	214
Глава 45. Диэлектрики.	216
Глава 46. Внутренняя структура диэлектриков	219
Глава 47. Электростатические аналогии	221
Глава 48. Магнитостатика.	223
Глава 49. Магнитное поле в различных ситуациях.	226

Том IV (выпуск 6)

Глава 50. Векторный потенциал	229
Глава 51. Законы индукции.	230
Глава 52. Решения уравнений Максвелла в пустом пространстве.	235
Глава 53. Решения уравнений Максвелла с токами и зарядами	236
Глава 54. Цепи переменного тока	240
Глава 55. Объемные резонаторы	248
Глава 56. Волноводы	249
Глава 57. Электродинамика в релятивистском случае	253
Глава 58. Лоренцевы преобразования полей	255
Глава 59. Энергия и импульс поля	258
Глава 60. Электромагнитная масса	261
Глава 61. Движение зарядов в электрическом и магнитном полях	262

Том V (выпуск 7)

Глава 62. Показатель преломления плотных веществ	264
Глава 63. Отражение от поверхностей	265
Глава 64. Магнетизм вещества	266
Глава 65. Парамагнетизм и магнитный резонанс.	267
Глава 66. Ферромагнетизм	268
Глава 67. Упругость	270
Глава 68. Течение «сухой» воды	272
Глава 69. Течение «мокрой» воды	273

ЗАДАЧИ К ТОМУ III (оригинального издания)

Введение	277
--------------------	-----

Том VI (выпуск 8–9)

Глава 70. Амплитуды вероятности.	279
Глава 71. Тожественные частицы	284
Глава 72. Единичный спин	289
Глава 73. Спин одна вторая.	291
Глава 74. Зависимость амплитуд от времени	296
Глава 75. Гамильтонова матрица.	297
Глава 76. Аммиачный мазер	300
Глава 77. Другие системы с двумя состояниями	301
Глава 78. Еще системы с двумя состояниями	302
Глава 79. Сверхтонкое расщепление уровней в водороде	304
Глава 80. Распространение волн в кристаллической решетке	305
Глава 81. Полупроводники	308
Глава 82. Приближение независимых частиц	310
Глава 83. Зависимость амплитуд от положения.	312
Глава 84. Момент импульса.	315
Глава 85. Атом водорода и периодическая таблица	318

Приложения	321
-----------------------------	------------

Приложение А. Единицы измерений и их размерности	323
Приложение Б. Физические постоянные и величины (средние)	325
Приложение В. Ответы к задачам	329

Предисловие

Настоящее издание представляет собой полный сборник задач к «Фейнмановским лекциям по физике». Этот сборник был подготовлен с использованием трех источников: «Задачника к начальной физике» Лейтона и Вогта (Эдисон-Уэсли, 1969) и двух томов «Задачника к Фейнмановским лекциям по физике», предназначенного для Калифорнийского технологического института, сокращенно «Калтех» (Эдисон-Уэсли, 1964–1965). Исходный задачник был значительно модернизирован: формулировки и решения задач были уточнены и исправлены с использованием современных единиц измерения, дополнены аккуратными рисунками и полностью перезагружены в программе «LATEX». Задачи для томов II и III лекций* были дополнены несколькими новыми проблемами и теперь приводятся с ответами/решениями, чего не было в предыдущих изданиях. В этом издании впервые в одной книге представлены задачи ко всем трем томам «Фейнмановских лекций по физике», причем впервые все задачи даны с тщательно подготовленным комплектом ответов.

Публикуемые здесь задачи давались студентам Калтеха в качестве обязательных домашних заданий и контрольных работ в программе двухлетнего вводного курса физики в период, когда Ричард Фейнман преподавал там физику (1961–1964), и позднее — в течение почти двух десятилетий, когда «Фейнмановские лекции по физике» использовались в качестве учебника. Многие люди внесли свой вклад в создание этого сборника задач, их фамилии вы сможете найти в списке благодарностей в разделе «Введение» к задачам для каждого тома. Кроме того, мы хотели бы выразить благодарность:

- факультету физики, математики и астрономии Калифорнийского технологического института, который разрешил нам подготовить эту книгу и включить ее в издание «Фейнмановских лекций по физике нового тысячелетия»;
- Рохусу Фоггу за возможность использования его тетрадей, составленных за многие годы преподавания начального курса физики в Калтехе;
- Юджину Коуэну за предоставление решений задач к томам II и III;
- Аарону Циммерману за проверку правильности вновь добавленного материала из Калтеха;
- Адаму Кокрану за внимательное обсуждение договора на издание этой книги с издательством «Basic Books».

Майкл А. Готтлиб и Рудольф Пфайффер

Издатели «Фейнмановских лекций по физике нового тысячелетия»

Декабрь 2013

* Речь идет об оригинальном издании в трех томах.

Задачи к тому I

оригинального издания в 3-х тт.

том I (выпуски 1–2)

- Современная наука о природе • Законы механики
- Пространство • Время • Движение

том II (выпуски 3–4)

- Излучение • Волны • Кванты
- Кинетика • Теплота • Звук

Введение

Данные задачи предназначались авторами для использования вместе с томом I «Фейнмановских лекций по физике» в течение первого года изучения вводного курса физики в Калифорнийском технологическом институте, поэтому они расположены в том же порядке, что и темы, представленные в Фейнмановских лекциях. По каждой теме (и в соответствующей главе) задачи подразделяются на категории в зависимости от степени их обобщенности или трудности. Сначала даются доказательства или обобщения, затем простые задачи, задачи промежуточной сложности и наконец задачи повышенной сложности. Обычно доказательства и обобщения дополняют дискуссии, даваемые в Фейнмановских лекциях; их результаты студенты должны понимать и использовать в дальнейшем. Средние студенты не должны испытывать каких-либо трудностей при решении простых задач; они также должны в состоянии достаточно быстро справляться с решением большинства задач промежуточной сложности (на решение каждой такой задачи, возможно, потребуется 10–20 мин). Более сложные задачи обычно требуют и более глубокого физического понимания или более широкого осмысления. Их решение будет представлять интерес главным образом для наиболее сильных студентов.

Многие люди внесли свой вклад и критическую оценку в отдельные задачи. Значительное число задач было составлено Р. Б. Лейтоном в соответствии с оригинальным Фейнмановским курсом лекций по физике; некоторые из них взяты из обширного сборника Фостера Стронга с его разрешения; целый ряд задач был адаптирован Р. Е. Фоггом на базе экзаменационного материала, используемого во вводном курсе. Многим авторам задач, как известным, так и неизвестным, мы выражаем свою искреннюю благодарность.

Кроме того, мы считаем, что работа еще далека от завершения. Остается надеяться, что с течением времени авторы или другие преподаватели Калтеха

будут совершенствовать настоящий материал и добавлять новые задачи и объяснения, чтобы в конечном итоге создать всеобъемлющую книгу-самоучитель, полезность которой могла бы выйти далеко за те рамки, в которых она первоначально создавалась.

Роберт Б. Лейтон и Рохус Е. Фогт

Глава 1

Атомы в движении

См. «Фейнмановские лекции по физике»*, т. I, гл. 1–3

При анализе следующих задач читателю следует пользоваться теми идеями, которые описаны в этих главах, а также своим собственным опытом и воображением. В большинстве задач при их решении не ожидается получения точных количественных результатов.

- 1.1. Если тепло является мерой молекулярного движения, то в чем разница между теплым неподвижным бейсбольным мячиком и холодным, но быстро движущимся мячиком?
- 1.2. Если атомы всех объектов находятся в непрерывном движении, то как может сохраняться постоянная форма любых объектов, например, таких как отпечатки на окаменелостях?
- 1.3. Объясните качественно, почему и как трение в движущейся машине вырабатывает тепло. Объясните также, если сможете, почему тепло не может производить движение в обратном процессе.
- 1.4. Химики обнаружили, что молекулы каучука состоят из длинных перекрещивающихся цепочек атомов. Объясните, почему при растяжении резиновая лента нагревается.
- 1.5. Что будет с резиновой лентой, удерживающей данный вес, если ее нагреть? (Чтобы ответить на вопрос, попытайтесь сделать это.)
- 1.6. Можете ли вы объяснить, почему нет кристаллов, имеющих форму правильного пятиугольника? (Треугольники, квадраты и шестиугольники являются распространенными формами в мире кристаллов.)
- 1.7. Вам дано большое количество стальных шариков одинакового диаметра d и контейнер известного объема V . Каждый габарит этого контейнера намного превосходит диаметр шарика. Какое наибольшее количество шариков N может поместиться в контейнере?

* «Фейнмановские лекции по физике» (далее — «Лекции»), на которые даются ссылки в данном задачнике, — трехтомное издание «The Feynman Lectures on Physics», которое в русском переводе было выпущено издательством «АСТ» в шести томах в 2018–2021 гг. Нумерация глав в русском переводе (и в переизданиях) сохранена. — *Примеч. ред.*

- 1.8. Как должно изменяться давление газа P в зависимости от числа атомов n в единице объема и от средней скорости атомов $\langle v \rangle$? (Должно давление P быть пропорциональным n и/или $\langle v \rangle$ либо эта зависимость от n и $\langle v \rangle$ отличается от линейной?)
- 1.9. В обычных условиях воздух имеет плотность около $0,001 \text{ г/см}^3$, в то время как жидкий воздух имеет плотность около $1,0 \text{ г/см}^3$.
- (а) Оцените количество молекул в 1 см^3 обычного воздуха n_G и жидкого воздуха n_L .
- (б) Оцените массу молекулы воздуха m .
- (в) Оцените среднее расстояние l , которое молекула воздуха должна пройти между столкновениями при нормальных температуре и давлении (НТД: 20°C при 1 атм). Это расстояние называется *длиной свободного пробега*.
- (г) До какого остаточного давления P необходимо откачать вакуумную систему для того, чтобы длина свободного пробега молекул в ней составляла 1 м .
- 1.10. Интенсивность коллимированного параллельного пучка атомов калия снижается на $3,0\%$ в слое аргона толщиной $1,0 \text{ мм}$ при давлении $6,0 \cdot 10^{-4} \text{ мм рт. ст.}$ Рассчитайте эффективную площадь мишени A на один атом аргона.
- 1.11. Исследования дифракции рентгеновских лучей показывают, что кристаллы NaCl имеют кубическую решетку с расстоянием $2,820 \text{ \AA}$ между ближайшими соседями. Найдите по таблицам плотность, а также молярную массу NaCl и рассчитайте число Авогадро N_A . (Это один из наиболее точных экспериментальных методов определения числа Авогадро N_A .)
- 1.12. Болтвут и Резерфорд обнаружили, что радий в равновесии с продуктами его распада производит $13,6 \cdot 10^{10}$ атомов гелия в секунду на грамм радия. Они также установили, что распад 192 мг радия производит $0,0824 \text{ мм}^3$ гелия в день при стандартных температуре и давлении (СТД: 0°C при 1 атм). Используйте эти данные для расчета:
- (а) числа атомов гелия N_{He} в 1 см^3 газа при СТД;
- (б) числа Авогадро N_A .
- Ссылка: Boltwood and Rutherford, *Phil. Mag.* **22**, 586 (1911).
- 1.13. Рэлей обнаружил, что $0,81 \text{ мг}$ оливкового масла на поверхности воды образует мономолекулярный слой 84 см в диаметре. Какое в результате получается значение числа Авогадро N_A в предположении, что химическая формула оливкового масла имеет приблизительный вид $\text{H}(\text{CH}_2)_{18}\text{COOH}$ и форму в виде линейной цепочки при плотности $0,8 \text{ г/см}^3$?
- Ссылка: Rayleigh, *Proc. Roy. Soc.* **47**, 364 (1890).

- 1.14.** Примерно в 1860 г. Максвелл показал, что вязкость газа задается формулой

$$\eta = \frac{1}{3} \rho v \ell,$$

где ρ — плотность газа, v — средняя скорость и ℓ — средняя длина свободного пробега молекул газа. Как ранее было показано Максвеллом, средняя длина свободного пробега молекул газа определяется формулой $\ell = 1 / (\sqrt{2} \pi N_g \sigma^2)$, где σ — эффективный диаметр молекулы.

Лошмидт (1865) использовал измеренное значение η , ρ (газа) и ρ (твердого тела) и вместе с Джоулем рассчитал v для определения N_g — количества молекул в 1 см^3 газа при СДТ. Он предположил, что молекулы являются твердыми сферами, плотно упакованными в твердом теле. При условии, что $\eta = 2,0 \cdot 10^{-4} \text{ г см}^{-1} \text{ с}^{-1}$ для воздуха при СДТ, ρ (жидкости) $\approx 1,0 \text{ г/см}^3$, ρ (газа) $\approx 1,0 \cdot 10^{-3} \text{ г/см}^3$ и $v \approx 500 \text{ м/с}$, рассчитайте N_g .

- 1.15.** Полный воды стакан оставили стоять на подоконнике раскрытого окна где-то в Калифорнии.

- (а) Как вы думаете, сколько времени T потребуется для того, чтобы вода полностью испарилась из этого стакана?
- (б) Сколько молекул J с одного квадратного сантиметра поверхности воды в стакане могло покинуть этот стакан воды за секунду при такой скорости испарения?
- (в) Кратко объясните связь, если таковая имеется, между вашим ответом на вопрос (а) данной задачи и средней нормой выпадения осадков по всей Земле.

- 1.16.** В палеозойскую эру капля послеобеденного ливня упала на землю и оставила на ней отпечаток, который позже был в ходе раскопок добыт страдающим от жары и жажды студентом-геологом. Осушая свою флягу, этот студент от нечего делать прикидывает, сколько молекул воды N из этой древней дождевой капли он только что выпил. Оцените N , используя только известные вам данные. (Сделайте разумные предположения относительно необходимости информации, которой вы не обладаете.)