

Д. Джанколи

Физика

Том 1

**Москва
«Книга по Требованию»**

УДК 53
ББК 22.3
Д11

Д11 **Д. Джанколи**
Физика: Том 1 / Д. Джанколи – М.: Книга по Требованию, 2023. – 656 с.

ISBN 978-5-458-37639-6

Написанная в живой и увлекательной форме книга американского ученого охватывает большой материал по всем разделам классической и современной физики. При изложении используются основы дифференциального и интегрального исчисления. Каждая глава снабжена хорошо подобранными задачами и вопросами с указанием категории трудности. В русском переводе выходит в двух томах. В томе 1 рассматриваются кинематика, динамика, гидродинамика, колебания, волны, звук и термодинамика.

ISBN 978-5-458-37639-6

© Издание на русском языке, оформление
«YOYO Media», 2023
© Издание на русском языке, оцифровка,
«Книга по Требованию», 2023

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.

Предисловие

Предлагаемое вниманию читателей учебное пособие по физике (с использованием элементов математического анализа) предназначено в качестве вводного для студентов, специализирующихся в области физики, других естественных, а также технических наук. Я стремился к тому, чтобы книга была легко читаема, доступна и интересна студентам и в то же время охватывала материал достаточно полно. При этом основное внимание уделялось тщательному и детальному изложению физических законов, а также решению задач.

Разумеется, в настоящее время уже существует немало хороших учебников по физике. Зачем понадобился еще один? Основная причина состоит в том, что первоклассные учебники, охватывающие все разделы физики, написаны обычно сухо и формально, а это затрудняет их изучение студентами. Таким учебникам, как правило, недостает легкости и свежести. Обычный подход состоит в том, что все темы сначала излагаются формально и абстрактно и лишь впоследствии (да и то не всегда) авторы возвращаются «на землю» и связывают материал с имеющимся у студентов опытом. По-видимому, такой подход привлекателен благодаря своей элегантности, но это может замедлить процесс познания для студентов (за исключением, быть может, лучших). Мой же подход состоит в признании того, что физика представляет собой описание реально происходящих явлений, и поэтому изложение каждой темы начинается с конкретных опытов и наблюдений, которые, без сомнения, знакомы студенту. Затем читателю предлагается более формальное и абстрактное изложение. Дело не только в том, что благодаря этому материал становится интереснее и проще для восприятия; главное, что такой способ изложения лучше отражает действительный ход развития физики. Например, исторически мы не начинали с общей формулировки второго начала термодинамики и последующего извлечения из него разнообразных следствий; напротив, сам этот закон возник как итог обобщения совокупности наблюдаемых явлений. Тем не менее многим учебникам по физике свойственно излагать материал в обратном порядке. Я постарался избежать подобного догматического подхода, при котором сначала формули-

руются в готовом виде законы физики и лишь затем описываются следствия из них; наоборот, физические законы в книге рассматриваются как обобщения конкретных наблюдений.

Я стремился также избежать излишнего педантизма и строить изложение ясно и лаконично, не допуская пространственной ошибки, состоящей в излишнем акцентировании мелких, подчас несущественных деталей, что сбивает студентов с толку. Однако я следил за тем, чтобы отдельные темы не «повисали в воздухе» и не вызывали недоуменных вопросов о том, для чего их следует изучать. Поэтому всюду объясняется важность и значение каждой темы, и все темы доводятся по возможности до своего логического завершения. Например, мы изучаем статические силы в структурах отчасти и потому, что реальные вещества обладают как упругими свойствами, так и хрупкостью, вследствие чего они могут разрушаться; именно поэтому в главе, посвященной статике, мы рассматриваем как упругие свойства вещества, так и его разрушение. Здесь следует упомянуть о нескольких исключениях: очень небольшое количество тем изложено только весьма кратко и не получило дальнейшего развития (например, уравнения Максвелла в дифференциальной форме). В этих немногих случаях цель состояла лишь в ознакомлении студентов с подобными темами. Если в дальнейшем им придется встретиться с ними, они уже не проявят полного незнания. Более развернутого изложения не могло бы быть дано здесь на соответствующем уровне, так как сделало бы книгу слишком громоздкой.

Я придерживался более или менее традиционного порядка следования тем, хотя и допускал значительную вольность в этом порядке. Книга начинается с изложения механики (гл. 1–14), в том числе механики жидкостей и газов; затем следуют волны (гл. 15–16), кинетическая теория газов и термодинамика (гл. 17–21), электричество и магнетизм (гл. 22–33) и оптика (гл. 34–38). Закljučают книгу пять глав, посвященных современной физике: специальной теории относительности (гл. 39), квантовой теории и атомной физике, в том числе физике лазеров и физике конденсированного состояния (гл. 40–41), ядерной физике (гл. 42) и, наконец, элементарным частицам (гл. 43); в эту последнюю главу вошло краткое обсуждение кварков, чарма, квантовой хромодинамики (КХД), а также «стандартной модели» (эволюции Вселенной) и теории Большого объединения. Вопросы современной физики излагаются на не слишком сложном уровне (в целом соответствующем принятому в книге) и по необходимости кратко. Я надеюсь, что читатель найдет в этих главах достаточно материала для того, чтобы у него «разыгрался аппетит» и он попробовал «на зуб» то, чем занимается современная физика. Разумеется, основное

внимание в этой книге уделено тем 38 главам, в которых излагается классическая физика.

То, что курс по традиции начинается с механики, представляется вполне оправданным, поскольку механика была исторически первым разделом физики и содержит в себе очень много общефизических понятий. Существуют различные способы расположения отдельных тем внутри этого раздела, и мы не настаиваем на обязательном точном следовании порядку глав, принятому в данной книге. Например, статику можно изучать как до, так и после динамики. Одна из причин выбранного здесь расположения состоит в том, что автору из собственного опыта преподавания известно, как трудно дается студентам понятие силы в отсутствие движения. И лишь после того, как они поймут связь между силой и движением, в том числе третий закон Ньютона, им, по видимому, будет проще разобраться и в задачах статики, где имеются силы, а движение отсутствует. Кроме того, более позднее изложение статики обладает еще одним преимуществом: к этому времени студент уже полностью осваивает понятие момента силы, столь важное для задач статики и трудное для понимания, когда движение не рассматривается. Наконец, статика является по существу частным случаем динамики, и мы строим ее изучение на том, что статическая система становится тогда, когда ей что-либо мешает остаться динамической (например, препятствует падению тела). Тем не менее посвященная статике гл. 11 написана так, что при желании ее можно изучить и перед динамикой, а именно сразу после краткого знакомства с векторами.

Еще один пример свободы в выборе порядка изложения представляют собой главы о свете. В нашей книге они, как это стало общепринятым, помещены следом за главами, посвященными электричеству и магнетизму, а также электромагнитным волнам. Однако можно было бы поместить главы о свете сразу за главами, посвященными волнам и звуку (гл. 15 и 16),— тем самым все сведения о волнах различной физической природы были бы собраны в одном месте. Еще одним примером подобного рода служит специальная теория относительности (гл. 39), следующая за электромагнитными волнами и светом. Можно было бы, однако, с меньшим основанием поместить эту главу и в механику (например, после гл. 8), поскольку почти все содержание гл. 39 (за исключением факультативного раздела 39.2) опирается на материал, изложенный в гл. 8.

Много внимания уделяется в данной книге решению задач. В нескольких местах в начале книги, в особенности в разд. 2.7, 4.8 и 4.10, даются развернутые рекомендации по решению задач, помогающие находить «подходы» к ним. Наиболее содержательным из этих разделов является 4.10; к этому времени студент уже приобретает неко-

торый опыт (не всегда вполне успешный) в обращении с задачами и, по нашему мнению, будет заинтересован во внимательном изучении этого раздела. Разумеется, в том случае, если преподаватель сочтет нужным, раздел. 4.10 может быть изучен и значительно ранее.

В книге подобрано значительное число детально разобранных примеров и задач, охватывающих широкий круг вопросов не только из области физики, но также из техники, других наук и повседневной жизни; автор надеется, что они будут более интересны студентам, чем это бывает обычно в подобных курсах. Около 2000 задач распределены по разделам и классифицированы по степени трудности на три группы. Задачи, относящиеся к группе I (низший уровень), являются простыми (как правило, они решаются простой подстановкой в соответствующие формулы) и призваны дать студенту возможность убедиться в своих знаниях, а иногда служат для иллюстрации несложных, но интересных или практически полезных вопросов курса. Задачи, относящиеся к группе II (средний уровень) – это обычные («нормальные») задачи, требующие определенного размышления и, как правило, комбинированного применения двух или более понятий. Наконец, задачи, относящиеся к группе III (высший уровень), являются наиболее трудными. Расположение задач в том или ином разделе означает, что для их решения требуется лишь знание материала вплоть до данного раздела включительно; в этих задачах (особенно в группах II и III) нередко приходится использовать материал предшествующих глав и разделов. Однако следует заметить, что ранжирование задач по степени трудности и их распределение по группам I, II и III являются неизбежно субъективными и должны рассматриваться лишь как условные. Задачи группы II охватывают очень широкий диапазон по степени трудности, тогда как задачи группы III могут представить затруднения даже для наиболее успевающих студентов. Мы рекомендуем внимательно проверить уровень задач этой группы, прежде чем включать их в регулярное домашнее задание. В конце каждого тома приведены ответы к задачам с нечетными номерами. Каждая глава содержит также определенное количество вопросов (общим числом около 1200), требующих устных ответов. Во всей книге систематически используется система единиц СИ; единицы британской системы лишь определены, но нигде не используются. Во многие главы включено ограниченное число задач, требующих программируемого калькулятора (или компьютера); например, к их числу относится обсуждение в разд. 2.10 процедуры численного интегрирования.

Предполагается, что читатели уже освоили математический анализ (или делают это одновременно с чтением этой книги). Понятие производной вводится впервые в конце гл. 2, посвященной кинематике, в качестве факульт-

тативного материала. Его освоение вполне можно отложить, например, до момента ознакомления с понятием интеграла в гл. 6, посвященной работе и энергии. Вообще математический анализ, особенно вначале, используется весьма постепенно и в небольших дозах. Изложение каждой темы во всей книге начинается, как правило, на достаточно элементарном уровне, что доступно для понимания большинству студентов с различным уровнем подготовки. Математическая строгость, соответствующая этому уровню, достигается обычно довольно быстро; для наиболее успевающих студентов введены дополнительные (факультативные) темы и разделы (отмеченные звездочкой), а также некоторое число весьма сложных задач, относящихся к группе III (см. выше). Математические понятия вводятся там, где они впервые применяются: производная и интеграл, как уже отмечалось, — соответственно в гл. 2 и 6, векторное сложение — в гл. 3, скалярное и векторное произведения — соответственно в гл. 6 и 10 и т. д. Я полагаю, что такой подход более предпочтителен, чем, например, насыщение математикой в гл. 1, поскольку он стимулирует студента к изучению данного математического понятия и наглядно поясняет, почему оно определяется именно так, а не как-либо иначе. Несколько тем общего характера (например, анализ размерностей и оценка по порядку величины) приведены в гл. 1 с тем, чтобы привлечь к ним внимание и не «закопать» в какой-либо более или менее произвольной части книги; впрочем, они могут быть изучены и позднее, когда в этом возникнет необходимость.

Эта книга содержит в себе большой материал, который вряд ли можно изучить в нормальном темпе в рамках, например, годового курса; тем не менее его все же нетрудно адаптировать для целей такого курса. Так разделы, обозначенные звездочкой, можно рассматривать как необязательные (факультативные). В этих разделах содержится материал, обычно не излагаемый в курсах подобного уровня и связанный либо с более сложной физикой, либо с интересными приложениями. Эти разделы не содержат материала, необходимого для чтения дальнейших глав (кроме, разумеется, факультативных разделов в них). Отсюда, впрочем, не следует, что строго необходимо изучать все разделы, не отмеченные звездочкой; в выборе материала сохраняется достаточная гибкость, соответствующая интересам студентов и преподавателей. Для сокращенного курса, помимо факультативных разделов, можно опустить значительные части некоторых глав (или целиком главы). К ним относятся гл. 10 (кроме разделов 10.1 и 10.2), 11–13, 23, 31, 32, 39–43, а также отдельные разделы гл. 8, 16, 27, 29, 33, 35–38. Темы, не изучаемые в аудитории, могут быть прочитаны студентами самостоятельно, и потому эта

книга представляет собой ценное справочное пособие благодаря своему широкому охвату материала.

Я убежден, что необходимо уделять значительное внимание деталям, особенно при получении важного результата. Как при качественном обсуждении, так и в ходе математического вывода я стремился к сохранению всех его этапов; при этом, однако, студенту не придется утопать в деталях, рискуя упустить понимание вопроса в целом. Моя цель состояла в том, чтобы указать, какие выражения носят общий характер, а какие таковыми не являются, и четко установить границы применимости важных соотношений, что указывается в квадратных скобках (рядом с самим соотношением), например:

$$x = x_0 + v_0 t + (1/2) a t^2 \quad [\text{постоянное ускорение}].$$

Большинство студентов испытывают трудности при изучении вращательного движения. В качестве примера внимания к деталям (хотя, строго говоря, это отнюдь не «деталь») укажем на то, что автор тщательно проводил различие между радиус-вектором r материальной точки и расстоянием от этой точки до оси (по перпендикуляру к ней), обозначаемым специально прописной буквой R . Это различие (особенно существенное для понятий момента силы и момента импульса) часто недостаточно разъясняется в других книгах; иногда для обеих величин используется одно и то же обозначение r , что может лишь привести к запутыванию студентов. Кроме того, мы начинаем изучение вращательного движения с более простого частного случая вращения вокруг оси (гл. 9); для этого случая вводится момент импульса и кинетическая энергия вращения. Лишь в гл. 10 рассматривается более общее вращение вокруг неподвижной точки, и этот более сложный материал может быть при желании опущен (за исключением разделов 10.1 и 10.2, посвященных векторному произведению и вектору момента силы относительно точки).

Несколько необычно изложение материала в гл. 29, посвященное источникам магнитного поля. Здесь в рамках одной главы рассматриваются магнитные поля, обусловленные электрическими токами (в том числе законы Ампера и Био–Савара), а также магнитные поля в веществе (ферро-, пара- и диамагнетизм). При таком изложении достигается большая ясность, краткость и в то же время полнота изложения темы. Другим примером может служить рассмотрение вопроса о консервативных силах и сохранении энергии в гл. 7 – тщательное, но без обычно присущего изложению этого вопроса затуманивания сути; в частности, явно показано, почему для работы консервативных сил имеет место равенство $W_{1 \rightarrow 2} = -W_{2 \rightarrow 1}$. В гл. 18 приведено описание процесса диффузии; несмотря на важность этого вопроса, он редко рассматривается в книгах подобного уровня. Заметим,

что нам удалось не только найти более простой и ясный подход, чем в книгах более высокого уровня, но и дать описание собственно процесса диффузии, а не самодиффузии.

Я хотел бы поблагодарить многих людей, которые различными способами помогали улучшить эту книгу. Среди тех, кто прочел рукопись и сделал много очень существенных замечаний,—профессора Джеймс Б. Герхарт, Эдвард Ф. Гибсон, Роберт Б. Холлок, Гордон Е. Джонс, Террилл В. Маес, Майкл А. Моррисон, Эдвард Б. Нельсон, Норман Пирлмен, Шеридан Саймон, Гилберт Х. Уорд и Томас Х. Вуд. Особую благодарность я выражаю Джону Хайлбронну, сделавшему ценные замечания по удивительной истории нашей науки. Большой благодарности заслуживают также профессора Ричард Маррус и Говард Шугарт за многочисленные полезные обсуждения, а также за гостеприимство, оказанное ими в Калифорнийском университете (Беркли). В заключение хотелось бы поблагодарить многих сотрудников издательства «Прентис-Холл», принимавших участие в работе над книгой, в особенности Логана Кэмпбелла, Дуга Хэмфри, Линду Михатов, Джанет Шмид, а также терпеливого и четкого в своих требованиях редактора Рэя Маллани. Ответственность за все ошибки лежит, разумеется, полностью на мне; все замечания и поправки будут приняты с благодарностью.

Дуглас К. Джанколи

Указания для студентов и преподавателей

1. Разделы и подразделы, отмеченные звездочкой (*), рассматриваются как факультативные (см. предисловие).
2. Используются обычные соглашения об обозначениях: символы физических величин обозначены латинским курсивом (например, масса m), тогда как символы единиц этих величин – русским прямым шрифтом (например, м – метр); для обозначения векторов применяется полужирный прямой латинский шрифт (например, \mathbf{F} – сила).
3. Важные термины там, где они впервые вводятся, выделены курсивом, а наиболее важные – полужирным прямым шрифтом (например, *коэффициент трения* и *ускорение*).
4. Лишь немногие формулы физики применимы в любых случаях; поэтому там, где это целесообразно, в квадратных скобках после важной формулы указаны условия (или границы) ее применимости.
5. Детально разработанные примеры и решения к ним выделены в основном тексте отбивкой.
6. Каждая глава заканчивается «Заключением», дающим краткий обзор важных понятий и терминов (наиболее важные выделены здесь курсивом). Заключения не предназначены для усвоения материала, который можно понять, только изучив содержание данной главы.
7. В каждой главе за «Заключением» следуют «Вопросы», на которые студент должен пытаться ответить (по крайней мере себе самому), а также «Задачи», расположенные в соответствии с порядком следования излагаемого материала и степенью трудности (см. предисловие). Вопросы и задачи, относящиеся к факультативным разделам, также отмечены звездочкой.
8. В приложениях содержатся полезные математические формулы (в том числе производные и интегралы), рассматриваются полярные координаты и приводятся таблицы изотопов с их атомными массами, а также другие данные. На форзацах помещены наиболее часто используемые таблицы.
9. Книга снабжена подробным предметным указателем (см. Т.2). Его можно, например, использовать, чтобы вспомнить смысл какого-либо понятия или термина.

1

Введение

Первые научные представления возникли очень давно – по-видимому, на самых ранних этапах истории человечества, отраженной в письменных источниках. Однако физика как наука в своем современном виде берет начало со времён Галилео Галилея (1564–1642). Действительно, Галилей и его последователь Исаак Ньютон (1643–1727) совершили революцию в научном познании. Физика, которая развивалась в течение трех столетий и достигла своей кульминации во второй половине 19 в. созданием электромагнитной теории света, называется теперь *классической физикой*. На рубеже 19 и 20 вв. казалось, что достигнуто полное понимание физического мира. Однако уже в самом начале 20 в. новые эксперименты и новые идеи в физике стали указывать на то, что некоторые аспекты классической физики неприменимы к крошечному миру атома, а также к объектам, движущимся с очень высокой скоростью. Следствием всего этого явилась очередная великая революция в физике, которая привела к рождению того, что мы называем теперь *современной физикой*.

1.1. Наука и творческая деятельность

Главная цель любой науки, в том числе и физики, рассматривается обычно как приведение в систему сложных явлений, регистрируемых нашими органами чувств, т. е. упорядочение того, что мы часто называем «окружающим нас миром». Многие представляют себе научное познание в виде механического процесса накопления фактов и «измышления» теорий. Однако в действительности это не так. Научное познание представляет собой творческую деятельность, которая во многом напоминает другие виды деятельности человека, традиционно считающиеся творческими.

Приведем несколько подтверждающих примеров. Одним из важных неотъемлемых признаков науки является *наблюдение* событий. Но любое наблюдение требует наличия воображения, поскольку ученый не может включить в описание все, что он наблюдает. Поэтому приходится решать, что из наблюдений действительно существенно.

Рассмотрим, например, как два великих мыслителя – Аристотель (384–322 до н.э.) и Галилей (1564–1642) – истолковывали движение по горизонтальной поверхности. Аристотель заметил, что находящееся на земле (или на поверхности стола) тело, получившее начальный толчок, всегда замедляется и останавливается. Отсюда Аристотель предположил, что естественным состоянием тела является покой. Галилей, повторивший в начале 1600 г. опыты Аристотеля по изучению горизонтального движения, обратился, по существу, к идеализированному случаю движения без сопротивления. В самом деле, Галилей мысленно представил себе, что если бы можно было устранить трение, то тело, получившее начальный толчок на горизонтальной поверхности, продолжало бы двигаться безостановочно в течение неопределенно долгого времени. Галилей сделал вывод о том, что для тела состояние движения столь же естественно, как и состояние покоя. Ему удалось увидеть в тех же самых «фактах» нечто новое, и именно поэтому принято считать Галилея основоположником современного представления о движении (более подробно об этом см. в гл. 2). Очевидно, что подобное «видение» могло возникнуть лишь вследствие тщательного обдумывания опыта.

Теории никогда не выводят непосредственно из наблюдений; напротив, их создают для объяснения полученных из опыта фактов в результате осмысления этих фактов разумом человека. Например, к атомистической теории, согласно которой вещество состоит из атомов, ученые пришли вовсе не потому, что кто-то реально наблюдал атомы¹⁾. Представление об этом было создано творческим разумом человека. Аналогичным образом возникли и такие фундаментальные теории, как специальная теория относительности, электромагнитная теория света и закон всемирного тяготения Ньютона.

Великие научные теории как творческие достижения можно сравнить с великими творениями литературы или искусства. Однако наука все же существенно отличается от других видов творческой деятельности; основное отличие состоит в том, что наука требует *проверки* своих понятий или теорий: ее предсказания должны подтверждаться экспериментом. Действительно, тщательная постановка эксперимента представляет собой важнейшую (если не решающую) часть всей физики.

Однако не следует все же считать, что научную теорию можно «доказать» посредством эксперимента. Прежде всего потому, что мы не располагаем идеальными измерительными инструментами (или приборами), т. е. аб-

¹⁾ Заметим, что последние достижения в области электронной микроскопии, отмеченные Нобелевской премией по физике за 1986 г., позволили осуществить прямое визуальное наблюдение атомов. – *Прим. ред.*