

**Сквайрс Дж.**

# **Практическая физика**

**Москва  
«Книга по Требованию»**

УДК 53  
ББК 22.3  
С42

С42 **Сквайрс Дж.**  
Практическая физика / Сквайрс Дж. – М.: Книга по Требованию, 2012. – 248 с.

**ISBN 978-5-458-34864-5**

**ISBN 978-5-458-34864-5**

© Издание на русском языке, оформление  
«YOYO Media», 2012  
© Издание на русском языке, оцифровка,  
«Книга по Требованию», 2012

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 редактора перевода

---

Практическая физика. Что скрывается за таким названием? Может быть, перечень «научных» способов лужения кастрюль, приготовления жаркого или придания ткани водоотталкивающих свойств? Нет, эта книга совсем о другом. Ее автор руководствовался желанием содействовать изучению общего курса физики в высшей школе (обычно на 1—2 курсах). Главная цель книги — привить студентам вкус к экспериментальным исследованиям. Задача не из простых, ибо на младших курсах практическая работа студентов сводится к выполнению традиционных лабораторных работ. В этих условиях творческие возможности строго регламентированы, а рутинный характер задач вряд ли может вызвать большой энтузиазм. Судите сами, нынешние молодые люди, подготовленные куда глубже и разностороннее, нежели их сверстники 30—40 лет назад, по существу вынуждены начинать все от той же печки, что и их отцы и деды. Практикум по физике, к сожалению, больше похож на игру в эксперимент или муштру по азбуке эксперимента, хотя по идее он должен был бы служить выработке у будущих специалистов важных и необходимых для самостоятельной работы качеств.

Но книга Дж. Сквайрса не является простым дополнением к старым руководствам. Напротив, автор стремится выделить те факторы обучения, которые лучше всего отвечали бы эволюции, происходящей в современной науке и технике. Научно-технический прогресс сопровождается глубокими переменами как в самой науке, так и в ее влиянии на различные области техники. Для проведения нынешних экспериментов уже не хватает готовых приборов. Специалисты конструируют и строят сложные уникальные установки, целые комплексы, требующие от своих создателей знаний по самым различным областям науки и техники. Так возникает одна из самых насущных проблем модернизации образования — более разносторонняя подготовка, более широкий кругозор будущих специалистов. Между тем инженерная подготовка прежде, как правило, ориентировалась на узкую специализацию. В этом имелись и бесспорные достоинства и очевидные недостатки. Главный недостаток — узость взглядов, мало способствующая пробуждению творческой инициативы. Однако становится все более ясно, что если в инженерном образовании увеличить удельный вес фундаментальных дисциплин, т. е. дать будущему специалисту хорошую подготовку по физике и математике, то это не только облегчит в дальнейшем усвоение инженерных дисциплин, но и создаст прочный фундамент для дальнейшей самостоятельной работы.

Изменение объема направленности подготовки специалистов — важное, но далеко не единственное нововведение. Не менее важной является потребность изменения и самой системы обучения. На смену жесткой деловой лабораторной практике приходит тенденция к обучению в процессе работы. Учебные лаборатории все больше вытесняются лабораториями исследовательскими. Ничто не может лучше научить студентов творческому подходу к работе, чем участие в настоящем научном исследовании. Но оно требует определенной творческой зрелости, культуры обращения с приборами и аппаратурой, часто уникальной и дорогостоящей. Именно настоящая работа выковывает нужные качества будущих специалистов, ибо выведенный из строя прибор обрекает здесь на бездействие, а неверный результат не может не повлиять на престиж будущего научного работника.

Обучение в процессе участия в исследовательской работе вырабатывает еще одно важное качество — рационализм. Нынешние опыты недешево обходятся как по затратам времени, так и по материальным вложениям. Поэтому, приступая к исследованию, специалист должен знать наперед, даст ли планируемый эксперимент ответ на поставленный вопрос, обеспечит ли точность проводимых измерений получение надежных окончательных выводов.

Но рано или поздно наступает время, когда, закончив эксперимент, исследователь садится за письменный стол, чтобы подготовить отчет или статью о проделанной работе для одного из научных журналов. Время неторопливых размышлений на бумаге уходит в прошлое. Если специалист искренне заинтересован в том, чтобы его статью читали, чтобы его труд был правильно понят и по достоинству оценен, он должен уметь ясно и кратко выражать свои мысли. Никто не может лучше автора выделить главное в работе, более веско аргументировать сделанные выводы. Книга Дж. Сквайрса прививает читателю вкус к поиску наиболее полного и наглядного отражения результатов работы в отчете о ней, приучает пользоваться при описании научных фактов правильным литературным языком. Здесь уместно отметить, что в английском оригинале есть ссылки на литературу, которая представляет собой руководства по написанию научных статей на английском языке. В нашей литературе подобные руководства, к сожалению, отсутствуют.

Резюмируя, можно сказать, что книга Дж. Сквайрса, будучи внешне похожей на простое дополнение к «Руководству к лабораторным работам по физике», представляет собой по существу первый, но очень важный шаг в направлении модернизации системы обучения, причем в наиболее сложном ее разделе практических работ.

Перевод книги на русский язык выполнен В. Ф. Групиным.

*Е. Лейкин*

# Из предисловия автора

---

Экспериментальная физика занимала самые тонкие умы в истории человечества. Однако в учебных курсах лабораторных работ, к сожалению, не всегда обнаруживаются все привлекательные стороны данного предмета. Моя книга посвящена экспериментальной физике и предназначена для студентов, но в ней нет систематического изложения физических опытов и она не может служить справочником по экспериментальным методам. Цель книги — указать на необходимость осмысленного подхода к экспериментальной работе. Она задумана как дополнительное пособие к общему курсу лабораторных работ. Я старался добиться того, чтобы студенты более критически относились к тому, что они делают, лучше представляли себе, что можно сделать, и чтобы благодаря этому курс лабораторных работ был более интересным и более содержательным.

В книге три части. Первая посвящена вопросам статистической обработки экспериментальных данных. В ней я попытался преподнести статистику не как ряд упражнений по математике, а как одно из орудий экспериментатора. Это, вероятно, самая трудная часть книги, и тем, кому не удастся сразу усвоить подробные математические выводы, не стоит огорчаться. Им следует прочесть все главы, чтобы получить общее представление, а затем идти дальше и пользоваться результатами выводов. Позднее всегда можно вернуться к доказательствам и осилить их.

Вторая часть посвящена экспериментальным методам. Здесь я подробно разбираю ряд приборов, методов и опытов с целью показать те средства, которыми располагает экспериментатор. Конечно, я выбирал их по своему усмотрению, но старался выбирать для иллюстрации такие методы, которые полезны и сами по себе.

В третьей части книги говорится о том, как лучше всего записывать данные, как правильно проводить вычисления и как научиться писать статьи хорошим языком.

Все примеры, которые приводятся в книге, чрезвычайно просты. Всюду, кроме одного места, где речь идет об измерении магнитного момента электрона, материал изложен приблизительно на уровне знаний студентов первого курса. Но я думаю, что практические сведения, почерпнутые из моей книги, будут полезны более широкому кругу учащихся — от смышленных старшеклас-сников до аспирантов.

Эксперимент по определению магнитного момента электрона требует более высокого уровня знаний и основан на представлениях, выходящих за рамки курса физики на первом году обучения. Я постарался объяснить его так, чтобы это было понятно студентам, знакомым с основами квантовой механики. Этот эксперимент, несомненно, заслуживает внимательного изучения, но при первом чтении весь раздел можно без ущерба для дальнейшего опустить.

*Дж. Сквайрс*

# Предмет практической физики

---

Цель данной книги — помочь студентам в выполнении лабораторных работ по физике, повысить эффективность и содержательность работ. Мы можем спросить себя — какова цель лабораторной практики в высшем учебном заведении? Таких целей несколько. Лабораторные работы позволяют:

а) проиллюстрировать *теоретические* положения физики,

б) познакомиться с *приборами*,

в) приобрести опыт в проведении *экспериментов*.

Рассмотрим все по порядку.

Демонстрация опыта часто весьма способствует пониманию физического явления. Например, наша интуиция не подсказывает нам, что возможна интерференция света. Утверждение о том, что два пучка света могут погасить друг друга и дать темноту, с трудом принимается на веру, и для многих необходима наглядная демонстрация такого явления. Демонстрация опытов полезна и в другом отношении — она дает представление о порядках величин. Тот факт, что интерференционные полосы, вообще говоря, расположены очень близко друг к другу, свидетельствует о том, что длина световой волны крайне мала по сравнению с привычными размерами. Но демонстрация не может заменить объяснения, которое основано на геометрических и фазовых соотношениях. Таким образом, первая задача практикума — иллюстрация теоретических положений — хотя и важная, но довольно ограниченная.

Вторая задача, по-видимому, важнее, но здесь следует сразу же четко выяснить, что мы понимаем под прибором. В любом курсе практических работ вы столкнетесь с такими простыми приборами, как потенциометры, микрометры, электронные осциллографы и т. п., и опыт работы с ними будет, несомненно, полезен. Но

когда вы займетесь самостоятельными научными исследованиями, обилие приборов, с которыми придется работать, покажется невероятным. И ни один курс практических работ, по-видимому, не сможет научить вас пользоваться каждым из них. В ходе же лабораторных работ перед вами ставится задача приобрести опыт работы с приборами вообще. У экспериментатора, имеющего дело с приборами, должна быть особая психология, и курс лабораторных работ должен помочь вам выработать такую психологию. Правда, здесь мы соприкасаемся уже с третьей задачей, наиболее важной из всех.

Слова «опыт в проведении экспериментов» могут показаться не совсем ясными, так что нам нужно разобраться в этом подробнее. Главная задача практической физики состоит в том, чтобы научить вас

- а) планировать эксперимент так, чтобы точность измерений соответствовала поставленной цели;
- б) учитывать возможность систематических ошибок и принимать меры для их устранения;
- в) анализировать результаты эксперимента и делать правильные выводы;
- г) оценивать точность окончательного результата;
- д) вести запись измерений и расчетов аккуратно, ясно и кратко.

Все это вместе взятое и означает подготовить квалифицированного экспериментатора. Но этот курс может дать и нечто большее. Он может дать представление о том, каков общий метод физики.

Физика — это одна из наук, цель которых — познание природы. Когда физик сталкивается с каким-либо явлением природы, он старается выделить те особенности явления, которые ему кажутся самыми важными. Так, древние греки, заметив, что движущееся тело в конце концов останавливается, заключили, что для поддержания движения необходима сила. Галилей же и Ньютон, наблюдая то же самое явление, пришли к выводу, что замедление движения здесь вовсе не самое главное. Оно вызывается трением, а в отсутствие трения движение не прекращается. Если бы мы решили проверить это на опыте, то увидели бы, что полностью устранить трение или другие тормозящие силы невозможно. Но их можно

уменьшить, и чем меньше они, тем дольше будет двигаться тело. Таким образом, логично предположить, что в предельном случае, когда трения нет, движение будет оставаться неизменным, о чем и говорит первый закон Ньютона.

Таков общий метод физики. Мы выделяем в данном физическом явлении то, что считаем самым существенным. Затем, обобщая то, что выделили, строим теорию, из которой следуют те или иные выводы. Выводы же проверяем путем эксперимента. Но теоретические выводы обычно относятся к идеализированной или упрощенной ситуации. Чтобы их проверить, нужно создать такую упрощенную ситуацию в сложном, полном хаоса окружающем мире, что не всегда легко сделать.

На лекциях вам преподносят теорию. При этом рассматриваются те стороны реального мира, которые существующая теория считает самыми важными. Может получиться так, что ваше знакомство с миром природы ограничится только этими сторонами и вы будете уверены, что это и есть весь реальный мир, а не отдельные его стороны. К тому же в такой картине мира все столь хорошо увязано, что легко утратить представление о том, каких усилий потребовалось человеческому гению для ее создания. Самое лучшее лекарство от подобной болезни — идти в лабораторию и там убедиться в сложности реального мира.

Занимаясь экспериментальной физикой, вы прежде всего узнаете, как трудно бывает проверить теорию, измерить именно то, что хотите, а не что-то иное, и научитесь преодолевать такие трудности. Но кроме всего прочего у вас появится взгляд на физику в целом, на взаимоотношение между теорией и экспериментом, которое составляет главное содержание предмета.

# Часть I

## Статистическая обработка результатов измерения

---

### ГЛАВА 1

#### ВВЕДЕНИЕ В ТЕОРИЮ ОШИБОК

##### § 1. Почему так важно оценить ошибку

Измеряя какую-нибудь физическую величину, мы не рассчитываем получить ее истинное значение. Поэтому необходимо как-то указать, насколько полученный результат может быть близким к истинному значению, иными словами, указать, какова точность измерения. Для этого вместе с полученным результатом указывают приближенную ошибку измерения. Например, мы измерили фокусное расстояние линзы  $f$  и написали, что

$$f = 256 \pm 2 \text{ мм.} \quad (1.1)$$

Это означает, что фокусное расстояние лежит в пределах от 254 до 258 мм. Но на самом деле равенство (1.1) имеет вероятностный смысл. Мы не можем с *полной уверенностью* сказать, что величина лежит в указанных пределах, но наши измерения показывают, что имеется некоторая *вероятность* этого. В гл. 2 данное утверждение будет сформулировано точнее.

Оценивать ошибки необходимо потому, что, не зная, каковы они, нельзя сделать определенных выводов из эксперимента. Допустим, например, что мы хотим установить, зависит ли сопротивление катушки провода от температуры. Измеренное нами сопротивление катушки оказалось равным <sup>1)</sup>

---

<sup>1)</sup> В книге используется система единиц СИ в соответствии с проектом ГОСТа «Единицы физических величин», М., 1970 г. С системой СИ читатель может познакомиться, посмотрев приложение 6.— *Прим. ред.*

200,025 Ом при 10° С,  
200,034 Ом при 20° С.

Следует ли придавать значение разнице этих величин, или, как говорят в статистике, *значима* ли она? На этот вопрос нельзя ответить, не зная ошибок измерения. Если ошибка составляет 0,001 Ом, то разница значима, а если ошибка равна 0,010 Ом, то — незначима.

Когда получен какой-то экспериментальный результат, он публикуется и становится общим достоянием. Каждый может пользоваться им, как ему угодно. Одни могут применять его в расчетах для каких-либо практических целей, другие — для проверки теоретических выводов. Скажем, инженеру-электрику необходимо знать удельное сопротивление медного провода для расчета трансформатора, а специалисту по физике твердого тела та же самая величина может понадобиться для проверки электронной теории металлов. И в том и другом случае необходимо знать, достаточно ли точен экспериментальный результат. Если на основании результата делают какие-нибудь выводы, то важно знать, в какой мере можно на них полагаться. Чтобы можно было ответить на подобные вопросы, экспериментатор и обязан указывать величину ошибки измерения.

Конечно, экспериментатор не может предвидеть все возможные применения своего результата, но некоторые применения он должен представлять себе. Он ведь находится не в вакууме — во всяком случае не в интеллектуальном вакууме. Если опыт ставится для проверки теории, то экспериментатор должен представить себе, какова должна быть точность, чтобы имело смысл сравнивать результаты с теоретическими выводами. Таким образом, не только знание ошибки позволяет делать определенные выводы на основании экспериментальных данных, но и, наоборот, задачами эксперимента часто определяется максимальная допустимая ошибка, что в свою очередь может оказать влияние на выбор методики.

Некоторые могут подумать, что всякий эксперимент следует проводить как можно более точно, но такой подход был бы нереальным. Человеческая жизнь ограничена, так же как и возможности экспериментатора, если

только он не гениален. Поэтому важно планировать и проводить эксперимент так, чтобы точность окончательного результата соответствовала его цели. Допустим, что в приведенном примере нам нужно знать сопротивление катушки лишь для того, чтобы использовать ее в качестве эталона в интервале температур от 10 до 20° С, и пусть требуемая точность измерения составляет 1 : 10 000. В таком случае нас будет устраивать, если мы измерим сопротивление с ошибкой 0,010 Ом, а попытка снизить эту ошибку до 0,001 Ом будет лишь ненужной тратой времени. В то же время измерять сопротивление с ошибкой 0,05 Ом просто недопустимо, поскольку тогда результат измерения будет бесполезен с точки зрения поставленной задачи.

Требование соответствующей точности относится не только к окончательному результату опыта, но и к различным величинам, измеряемым в ходе всего эксперимента. Ведь редко бывают такие простые эксперименты, в которых окончательная величина измерялась бы непосредственно. Обычно же приходится измерять целый ряд первоначальных величин, которые лишь в комбинации дают требуемый результат. При этом ошибка окончательного результата определяется ошибками первоначальных величин. Вообще говоря, эти ошибки по-разному влияют на окончательную ошибку. Последняя будет минимальной, если распределить имеющиеся ресурсы времени, приборов и терпения так, чтобы уменьшить те ошибки, которые дают наибольший вклад в окончательную ошибку.

Итак, мы видим, что понятие ошибки измерения играет далеко не второстепенную роль в эксперименте. Наоборот, оно имеет прямое отношение к таким вопросам, как цель эксперимента, его метод и значимость его результатов.

## **§ 2. Систематические и случайные ошибки**

Ошибки можно разделить на два типа — систематические и случайные. Систематической называется ошибка, которая остается постоянной на протяжении всей серии