

Горная
книга

РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ

Председатель

Л.А. ПУЧКОВ

Зам. председателя

Л.Х. ГИТИС

Члены редсовета

И.В. ДЕМЕНТЬЕВ

А.П. ДМИТРИЕВ

Б.А. КАРТОЗИЯ

М.В. КУРЛЕНЯ

В.И. ОСИПОВ

Э.М. СОКОЛОВ

К.Н. ТРУБЕЦКОЙ

В.В. ХРОНИН

В.А. ЧАНТУРИЯ

Е.И. ШЕМЯКИН

*директор МГГУ,
чл.-корр. РАН*

*директор
Издательства МГТУ.*

академик РАЕН

академик РАЕН

академик РАЕН

академик РАН

академик РАН

академик МАН ВШ

академик РАН

профессор

академик РАН

академик РАН

В.Л. Шкуратник

ИЗМЕРЕНИЯ В ФИЗИЧЕСКОМ ЭКСПЕРИМЕНТЕ

*Издание второе,
дополненное и исправленное*

*Рекомендовано
Учебно-методическим объединением
вузов Российской Федерации по образованию
в области горного дела в качестве учебника
для студентов, обучающихся по специальности
«Физические процессы горного или нефтегазового
производства» направления подготовки
«Горное дело»*

**Высшее
горное
образование**



МОСКВА
ИЗДАТЕЛЬСТВО «ГОРНАЯ КНИГА»
2006

УДК 53.08.088:622

ББК 33.1

Ш 66

Федеральная целевая программа «Культура России», подпрограмма «Поддержка полиграфии и книгоиздания России»

Книга соответствует «Гигиеническим требованиям к изданиям книжным для взрослых. СанПиН 1.2.1253-03», утвержденным Главным государственным санитарным врачом России 30 марта 2003 г.

Экспертиза проведена Учебно-методическим объединением вузов Российской Федерации по образованию в области горного дела (письмо № 51–21/6 от 26.02.2006 г.)

Рецензенты:

- кафедра «Информационные системы и измерительные технологии» Московского государственного открытого университета (зав. кафедрой д-р техн. наук, проф. Г.Г. Раннее);
- чл.-корр. РАН, д-р физ.-мат. наук, проф. В.Н. Опарин (ИГД Сибирского отделения РАН)

Книга выпущена по заказу Издательства МГТУ

Шкуратник В.Л.

Ш 66 Измерения в физическом эксперименте: Учебник для вузов. — 2-е изд., доп. и испр. — М.: Издательство «Горная книга», 2006. — 335 с.: ил.

ISBN 5-98672-032-6 (в пер.)

Приведена обобщенная характеристика физического эксперимента как метода научного познания. Рассмотрены основные фундаментальные понятия в области измерений и измерительной техники. Подробно изложены положения теории вероятностей и математической статистики, используемые в задачах обработки результатов измерений и планирования эксперимента. Рассмотрены методические вопросы подготовки и проведения измерений. Даны практические рекомендации по обработке и представлению их результатов. Изложены основы оптимального планирования измерительных экспериментов.

Для студентов вузов, обучающихся по специальности «Физические процессы горного или нефтегазового производства» направления подготовки «Горное дело». Учебник призван подготовить их к практической деятельности в области измерений, а также осмысленному использованию рекомендаций рецептурного характера, содержащихся в соответствующей справочной литературе. Может быть использован как метрологическое пособие для специалистов, аспирантов и магистров при проведении измерительных экспериментов и использовании их результатов.

УДК 53.08.088:622

ББК 33.1

ISBN 5-98672-032-6

© В.Л. Шкуратник, 2000, 2006

© Издательство «Горная книга», 2006

© Дизайн книги. Издательство МГТУ, 2006

Существует лишь то, что можно измерить.

Макс Планк

Прогресс в области фундаментальных и прикладных исследований, создание, эффективная и безопасная эксплуатация новых материалов, техники и технологий, управление любыми синтезированными и природными объектами и контроль их качественных показателей тесно связаны с необходимостью получения измерительной информации. Основным источником такой информации — экспериментальная деятельность научного и производственного характера, составляющая важнейшую и неотъемлемую часть инженерного труда абсолютного большинства выпускников технических вузов. Однако, как показывает опыт, лишь немногие из них в достаточной степени владеют хотя бы основами измерений. И это, несмотря на то, что студенты сталкиваются с ними при проведении лабораторных работ по различным дисциплинам уже на первом курсе и далее в течение всего срока обучения. В связи с этим, видимо, правы те, кто считает, что независимо от специальности, каждый соискатель инженерного диплома обязан обладать необходимым минимумом знаний и навыков в области измерений, а соответствующая подготовка в вузах должна быть усилена.

Однако, если, например, для электротехнических специальностей такая постановка представляется очевидной, то для горных специальностей вузов она только сейчас начинает завоевывать своих активных сторонников, понимающих, что для современного горного производства со всеми свойственными ему сложностями и проблемами высокий уровень информационного обеспечения является жизненной необходимостью.

Имеющаяся в настоящее время учебная, научная и справочная литература в области измерений либо слишком объемна, либо специализирована на каких-то отдельных видах или конкретных вопросах измерений, либо не соответствует уровню подготовки студентов горных специальностей вузов. Это и предопределило целесообразность написания настоящего учебника, содержание которого отражает программу одноименной учебной дисциплины. В то же время он может быть рекомендован для студентов и магистров не только горных, но и других специальностей, а также аспирантов и инженерно-технических работников, практическая деятельность которых связана с проведением измерений.

Существующие в настоящее время методы и средства позволяют измерять порядка восьмисот различных физических величин. Понятно, что настоящий учебник ни в коей мере не может претендовать на полноту охвата всех вопросов, которые необходимо знать экспериментатору при измерении каждой из этих величин. Он лишь призван помочь читателю разобраться в содержании основных фундаментальных понятий в области измерений и ознакомиться с принципами планирования, подготовки и проведения последних. Кроме того, в учебнике излагаются элементы теории вероятностей и математической статистики, используемые в задачах обработки результатов измерений, и даются практические рекомендации по решению указанных задач.

Истолкователем природы является опыт. Он не обманывает никогда...
Надо производить опыты, изменяя обстоятельства, пока не извлечем из них общих правил, потому что опыт доставляет истинные правила...

Леонардо да Винчи

В большей своей части физика посвящена измерениям различных физических величин...

Дж. Орир

ФИЗИЧЕСКИЙ ЭКСПЕРИМЕНТ КАК МЕТОД НАУЧНОГО ПОЗНАНИЯ

В философском понимании эксперимент (от латинского *experimentum* — проба, опыт) — метод познания, при помощи которого в контролируемых и управляемых условиях исследуются явления действительности. В повседневной практике эксперимент обычно определяют как систему операций, воздействий и (или) наблюдений, направленных на получение информации об объекте при исследовательских испытаниях. Очевидно, что в приведенных двух определениях нет противоречий, они лишь взаимно дополняют друг друга.

Эксперимент играет исключительную роль в производственной и научной деятельности общества. По некоторым оценкам в развитых странах доля затрат на экспериментальные исследования достигает 15 % затрат общественного труда.

Простейшим типом эксперимента является *качественный эксперимент*, т.е. такой, который направлен на установление тех или иных предполагаемых теорией свойств или явлений. Более сложный — *количественный эксперимент*. Он предназначен для выявления количественной определенности какого-либо

свойства объекта исследований или происходящих в нем явлений. Часто качественный и количественный эксперименты представляют собой последовательные этапы исследования. При этом качественный эксперимент носит характер предварительного поиска, по результатам которого принимают решение о целесообразности проведения количественного эксперимента, требующего, как правило, больших материальных и трудовых затрат. Поскольку количественный эксперимент предполагает обязательное проведение измерений, то его иногда называют *измерительным экспериментом*.

Если в процессе эксперимента осуществляется материальное, физическое взаимодействие с объектом исследования, то говорят о *прямом (натурном) эксперименте*. Если же исследуется физическая модель, т.е. другой материальный объект, способный в той или иной мере заменить исследуемый объект в процессе познания последнего, то эксперимент называют *модельным*.

Различают эксперименты, целью которых является проверка теорий или гипотез, и эксперименты, направленные на выявление эмпирических зависимостей, используемых затем для решения различных практических и познавательных задач. В последнем случае в результате измерительного эксперимента получают *математическую модель* исследуемой зависимости. Эта модель представляет собой функцию, связывающую независимые переменные x_i , которые принято называть *факторами*, и зависимую переменную y , называемую *откликом*. Если отклик является функцией одной независимой переменной $y = f(x)$, то эксперимент по определению этой функции принято называть *однофакторным*. Эксперимент по определению функций вида $y = f(x_1, x_2, \dots, x_n)$, т.е. зависящий от многих переменных, называют *многофакторным*.

Как правило, исследователь стремится уменьшить число переменных в многофакторном эксперименте, так как это существенно ускоряет его работу. Для этого влияние одних переменных, рассматриваемых как помехи, стараются исключить, а влияние других стремятся контролировать для последующего их учета. Исключению подлежат прежде всего так называемые *внеш-*

ние переменные, представляющие собой физические величины, изменяющиеся случайным образом и оказывающие помеховое влияние на эксперимент, так как они не могут быть проконтролированы. Например, если в ходе экспериментального определения скорости распространения упругих колебаний в воздухе его температура и влажность будут изменяться, то последние должны рассматриваться как внешние переменные. В то же время, если задачей эксперимента является установление зависимости указанной скорости от температуры и влажности, то последние должны закономерно изменяться и контролироваться.

Эксперимент, в котором влияние внешних переменных исключено, а независимые переменные можно изменять по заранее заданной программе, называют *контролируемым экспериментом*.

Следует учитывать, что на практике экспериментатору часто приходится иметь дело с чрезвычайно сложными объектами исследования, находящимися под воздействием множества факторов, значительная часть которых не поддается однозначному учету и контролю. Создание экспериментальных установок, в которых подобный объект мог бы быть поставлен в условия «чистого», полностью контролируемого эксперимента, может оказаться принципиально невозможным или потребовать значительных затрат времени и средств. Кроме того, большой объем экспериментальных исследований, особенно в области технических наук, проводят в естественных полевых условиях и на действующих или строящихся промышленных объектах, на которых не допускается или ограничивается вмешательство в естественный ход технологических процессов. В этих случаях «чистоты» эксперимента добиваются не столько устранением помеховых факторов, сколько применением специальных методов планирования эксперимента и обработки полученных данных, которые позволяют, если не исключить влияние указанных факторов, то, по крайней мере, существенно их уменьшить или учесть.

Если эксперимент осуществляется без вмешательства в естественные условия функционирования исследуемого объекта и сводится к регистрации самопроизвольно меняющихся контролируемых факторов, а также соответствующих значений откликов, то такой эксперимент называют *пассивным*.

Пассивный эксперимент в определенном смысле является наиболее объективным, поскольку в процессе его проведения структура, свойства и состояние объекта изменяются спонтанно, независимо от воли экспериментатора. В то же время очевидны и недостатки пассивного эксперимента, связанные прежде всего с невозможностью его многократного проведения в относительно идентичных условиях и оптимизации выбора факторов, действующих на объект.

Активный эксперимент предполагает осуществляемое по определенному плану целенаправленное варьирование всех управляемых факторов. По сравнению с пассивным активный эксперимент требует более высоких материальных и трудовых затрат. Тем не менее в настоящее время именно эта разновидность эксперимента находит преимущественное использование, особенно при исследовании сложных объектов.

В отличие от пассивного эксперимента активный эксперимент позволяет:

а) продублировать опыты и, как следствие, создать необходимые условия для применения методов математической статистики с целью уменьшения погрешностей измерения и проверки соответствующих гипотез;

б) оптимизировать общее число опытов, количество, уровни и интервалы варьирования управляемых факторов для минимизации затрат на эксперимент, получения наиболее точных и компактных математических моделей объекта, а также оценок влияния отдельных факторов или их сочетаний на отклик.

В ряде случаев для извлечения более полной информации об исследуемом объекте используют так называемый **активно-пассивный эксперимент**, в котором одной частью факторов управляют по заранее намеченному плану, а вторую, объединяющую неуправляемые факторы, только контролируют.

В зависимости от характера результатов, которые стремится получить экспериментатор, различают:

• **факторные («отсеивающие»)** эксперименты, направленные на выделение существенных факторов и отсеивание несущественных;

- *экстремальные (оптимизационные) эксперименты*, принимаемые для определения оптимальных значений параметров исследуемого объекта или процесса;

- *интерполяционные (регрессионные) эксперименты*, связанные с выявлением механизма явлений и позволяющие найти функциональные или статистические зависимости между физическими величинами, которые характеризуют процесс;

- *решающие эксперименты*, задачей которых является проверка гипотез и предсказание теорий, имеющих принципиальное значение.

Кроме упомянутой ранее контролируемости эксперимента, важнейшим принципом при его реализации является использование так называемого «*системного подхода*». В соответствии с этим подходом эксперимент рассматривается как единая система, состоящая из совокупности взаимосвязанных организационно и аппаратурно разнородных элементов, которые совместно выполняют общую измерительную задачу в условиях взаимодействия с внешней средой и с учетом развития протекающих в системе процессов и возникающих противоречий. Входящие в указанную систему элементы (части, подсистемы) более низкого иерархического уровня включают в себя сам объект исследования, экспериментатора, технические средства, участвующие в эксперименте, в том числе измерительные, и другие элементы.

Системный подход предполагает квалифицированное выделение в системе наиболее существенных для ее функционирования подсистем и взаимосвязей и «отбрасывание» тех из них, которые могут быть оценены как менее значимые с точки зрения поставленной в эксперименте задачи.

Системный подход позволяет создать математическую модель эксперимента, на базе которой и должно строиться его оптимальное планирование, проведение, а также обработка полученных результатов измерений.

Однако, даже в тех случаях, когда построение математической модели эксперимента по тем или иным причинам оказывается невозможным, системный подход сохраняет свою важность как метод мышления и получения правильных качественных представлений, как методологическая основа экспериментальных исследований.

Хотя эксперимент относится к эмпирическому уровню научного познания, он не может осуществляться в отрыве от теории. Прежде всего выбор того или иного типа эксперимента и конкретный способ его осуществления вытекает из сути проблемы, решением которой занят исследователь. А научная проблема возникает именно там, где обнаруживается разрыв между существующей теорией и имеющимися фактическими данными. Действительно, любая даже самая совершенная теория лишь эпизод на пути нескончаемого движения человеческой мысли к истине. Причем побудительным мотивом к такому движению очень часто становятся экспериментальные результаты, противоречащие общепринятой теории и содержащие в себе ростки новых идей. Как в шутку заметил выдающийся французский физик Ф. Жолио-Кюри, чем дальше эксперимент от теории, тем он ближе к Нобелевской премии.

Далее постановка эксперимента требует выделения факторов, оказывающих существенное влияние на исследуемый объект. Эта задача решается сравнительно просто там, где исследователь располагает соответствующей достаточно развитой теорией, и встречается значительные затруднения, если такая теория отсутствует.

Подготавливая эксперимент, исследователь должен хотя бы мысленно построить некоторую модель изучаемого объекта, стремясь отразить в этой модели всю известную ему априорную информацию, и прежде всего информацию, содержащуюся в существующих теориях. Именно от того, насколько полно использована априорная информация, как правило, зависит успех эксперимента и во всяком случае затраты на его выполнение.

В эксперименте часто используют косвенные наблюдения и измерения, когда наблюдают и измеряют не саму исследуемую физическую величину, а связанные с ней другие величины. Достоверный результат при этом можно получить лишь исходя из теории или гипотезы, устанавливающей связь между искомой и измеренными величинами.

Наконец, ведущая роль принадлежит теории в планировании эксперимента, контроле за его ходом, обработке и интерпретации полученных результатов.

Не останавливаясь более на соотношении теории и эксперимента, следует еще раз предупредить начинающего экспериментатора от пренебрежения теорией в расчете на то, что эксперимент все покажет. Не случайно еще Леонардо да Винчи — один из основоположников экспериментального метода в науке, которому принадлежат первые исследования коэффициентов трения, явления удара, траекторий горизонтально брошенного тела, центров тяжести тел и фигур, говорил, что «теория — полководец, а практика — солдаты».

Важнейшим звеном, связывающим теоретические и экспериментальные методы исследования, являются измерения, представляющие собой основной процесс получения объективной количественной информации о свойствах природных и связанных с практической деятельностью человека материальных объектов.

Для количественного эксперимента процесс измерения представляет собой необходимую и органичную его часть. Именно благодаря проводимым в рамках эксперимента измерениям удается выявить количественную определенность того или иного свойства объекта. А без такой определенности невозможно теоретическое осмысление экспериментальных данных и установление законов изучаемых явлений, что и является главной целью естествознания.

С другой стороны, суть измерения составляет осуществляемое *путем физического эксперимента* сравнение данной величины с некоторым ее значением, принятым за единицу. Таким образом, физический эксперимент может рассматриваться как неотъемлемая составная часть измерения.

Становление экспериментального метода исследования в естествознании нового времени связано, в частности, с именем Галилео Галилея. Характерно, что уже тогда, почти 400 лет назад, первые проводимые им опыты сопровождалось измерениями. Так, один из этих опытов заключался в том, что по наклонной доске пускался шар и измеряли расстояния, проходимые им за равные промежутки времени. Поскольку достаточно точного способа измерения коротких временных интервалов тогда еще

не существовало, Галилей использовал для отсчета времени собственный пульс. В результате этого эксперимента было впервые установлено, что расстояние, проходимое шаром, пропорционально квадрату времени.

В истории физики можно найти также немало примеров, когда получение принципиально новых экспериментальных данных и даже научные открытия были сделаны благодаря высокой точности измерений. Так, например, в 1892 г. Дж. Рэлей, используя высокоточные измерения плотности азота, установил, что, если последний выделен из воздуха, то он на 0,0016 г/л (при температуре 0 °С и давлении 101 325 Па) больше плотности азота, полученного из его соединений. Это послужило основанием для предположения о наличии примеси к атмосферному азоту в виде более тяжелого газа. А уже в 1894 г. такой газ был выделен из азота воздуха и назван аргоном (от греческого *argos* — бездеятельный), поскольку обладал химической инертностью.

Роль эксперимента и измерений во всех областях человеческой деятельности трудно переоценить. Прежде всего это относится к деятельности научной, которая, по мнению В.И. Вернадского «в своей основе состоит из получения научных фактов и их эмпирических обобщений», а измерительный эксперимент и является основным источником указанных фактов. Более того, именно благодаря использованию полученных с помощью измерений точных количественных соотношений физико-математические науки стали относить к разряду точных, отражающих действительно объективные законы природы. «Измерить все, что измеримо, и сделать измеримым все, что таковым не является». Эти слова Г. Галилея, сказанные им еще в 17 в., и сейчас можно рассматривать как блестящую формулировку основной задачи, стоящей перед точным естествознанием.

Достаточно очевидно, что без развернутой системы измерений был бы невозможен прогресс в производственно-технической сфере человеческой деятельности, так как именно на такой системе базируется управление технологическими процессами и качеством выпускаемой продукции, а также решаются проблемы повышения эффективности и безопасности общественного труда.

ОСНОВНЫЕ
ПОНЯТИЯ
И ОБЛАСТИ
ИЗМЕРЕНИЙ

Глава

1

В любом случае есть только один способ правильно вести спор: надо сначала хорошо понять, о чем идет речь.

Платон

1.1. ФИЗИЧЕСКИЕ ВЕЛИЧИНЫ И ИХ ЕДИНИЦЫ

Прежде всего, называется величиной все то, что способно увеличиваться или уменьшаться, или то, к чему можно нечто прибавить или от чего можно нечто отнять.

Леонард Эйлер

В рамках законодательной метрологии для всех объектов измерений установлено единое обобщенное понятие — *физическая величина*, под которой понимается свойство, общее в качественном отношении для многих физических объектов (физические системы, их состояния и происходящие в них процессы), но в количественном отношении индивидуальное для каждого объекта.

В соответствии с этим определением в каждой физической величине могут быть выделены две стороны — *качественная* и *количественная*. Если первая из них определяет «вид» величины (например, температура, масса и т.д.), то вторая — ее «размер».

Размер физической величины — это ее количественная определенность, присущая конкретному предмету, системе, явлению или процессу. Благодаря индивидуальности размеров физической величины для конкретных физических объектов возникает принципиальная возможность различать эти объекты и сравнивать их между собой (по массе, длине, температуре и другим свойствам).

В зависимости от того, меняется ли размер физической величины в процессе ее измерения, различают *переменные* и *постоянные величины*.

Различают также *истинное* и *действительное* значения физической величины. Первое представляет собой значение, идеальным образом отражающее в качественном и количественном отношениях соответствующие свойства объекта, а второе — значение, найденное экспериментально и достаточно (с точки зрения поставленной измерительной задачи) близкое к истинному значению, хотя и отличающееся от него.

Физическую величину, которую в рамках соответствующей измерительной задачи надлежит измерить, называют *измеряемой физической величиной*. Если же физическая величина не измеряется, но оказывает влияние на средство и объект измерений, искажая их результат, то такая физическая величина называется *влияющей*.

Для характеристики частных особенностей измеряемой физической величины используют понятие *физический параметр*. Например, амплитуда и частота являются параметрами напряжения переменного тока. В зависимости от конкретной измерительной задачи тот или иной физический параметр может измеряться, и тогда его называют *измеряемым параметром*, либо не измеряться (*неизмеряемый параметр*).

Бесконечному разнообразию свойств окружающего нас мира соответствует бесконечное множество физических величин. Однако для описания важнейших свойств и явлений в определенной области науки можно ограничиться минимально необходимым числом физических величин, называемых *основными*. Например, для механики основными физическими величинами являются длина, время и масса. Через основные величины, используя соответствующие уравнения связи, можно получить ряд *производных* физических величин. Примером таких величин может служить скорость равномерного прямолинейного движения, определяемая как частное от деления длины пройденного пути на время движения.

Важной качественной характеристикой физической величины является ее размерность, дающая представление о виде величины, ее природе и соотношении с другими физическими величинами.

Размерность физической величины представляет собой произведение обобщенных символов основных величин, возведен-

ных в различные степени. Определение размерностей осуществляют на основе соответствующих физических уравнений. Так, например, размерность (*dim* — от латинского *dimension*) скорости V прямолинейного равномерного движения определяется как путь L , деленный на время T , или $dim V = LT^{-1}$.

Часть физических величин являются относительными и поэтому *безразмерными*. Например, коэффициент полезного действия, относительная диэлектрическая проницаемость и другие.

Значение физической величины представляет собой оценку физической величины в виде некоторого числа принятых для нее единиц.

Единица физической величины — физическая величина фиксированного размера, условно принятая для сравнения с ней однородных величин, ей по определению присваивается числовое значение, равное единице. Например, 1 м — единица длины, 1 Па — единица давления.

Следует понимать, что единицы физических величин — это лишь специально созданный вспомогательный аппарат, используемый для изучения объектов действительности, сами же они таковыми объектами не являются.

Как и физические величины, их единицы делятся на *основные и производные*. Совокупность указанных единиц, выбранная в соответствии с определенными принципами, образует *систему единиц*.

Основная единица — это единица величины, выбранная произвольно при построении системы единиц и условно принимаемая независимой от других единиц этой системы.

Производная единица — единица производной физической величины, образованная в соответствии с уравнением, связывающим ее с основными единицами или же с основными и имеющимися производными или дополнительными единицами.

Если производная единица связана с другими единицами системы уравнением, в котором числовой коэффициент равен 1, то такая единица физической величины называется *когерентной*.

Принципы построения системы единиц как совокупности основных и производных были впервые обоснованы в 1832 г.

К. Гауссом. В предложенной им системе за основу были приняты три произвольные, независимые основные единицы длины (миллиметр), массы (миллиграмм) и времени (секунда). Из этих трех определяли все остальные (производные единицы). В дальнейшем появились базирующиеся на тех же принципах многочисленные системы единиц для различных областей измерений СГС, СГСЭ, СГСМ, МКС и др.

Проблема унификации единиц и их систем была окончательно решена только в 1960 г., когда Одиннадцатая Генеральная конференция по мерам и весам утвердила Международную систему единиц СИ (*Systeme International d'Unites — SI*). Эту систему отличают универсальность, унифицированность по отношению ко всем областям измерений, удобные для практики размеры единиц, возможность воспроизведения основных единиц с большой точностью, когерентность производных единиц. Вот почему в настоящее время ее применение стало практически повсеместным.

Единицы физических величин, входящие в систему СИ, приведены в табл. П1.

Единицы физических величин, не входящие ни в одну из принятых систем единиц, называются *внесистемными*. По отношению к единицам СИ эти единицы подразделяют следующим образом:

- допускаемые к применению во всех областях без ограничения срока (например, тонна — единица массы);
- допускаемые к применению в специальных областях без ограничения срока (например, парсек в астрономии);
- временно допускаемые к применению (например, карат в качестве единицы массы);
- подлежащие изъятию из употребления (например, единица длины — ангстрем, единица магнитного потока — максвелл и др.).

Объективные потребности науки и производства обуславливают постоянное возрастание диапазона размеров измеряемых физических величин. Так, например, достигнутый на сегодняшний день диапазон измерений температуры составляет от ~ 0,3

до $\sim 9 \cdot 10^7$ К, статического давления — от $\sim 10^{11}$ до $\sim 3 \cdot 10^{11}$ Па, электрического сопротивления — от $\sim 10^{-6}$ до $\sim 10^{17}$ Ом, длины (земных объектов) — от $\sim 10^{-9}$ до $\sim 4 \cdot 10^7$ м. В результате единицы СИ при практическом использовании часто оказываются слишком большими или слишком малыми, это вынуждает применять так называемые *кратные* или *дольные* единицы. К первым относят единицы физических величин в целом, кратное десяти число раз бóльшие, а ко вторым — меньшие соответствующих системных или внесистемных единиц. Кратные и дольные единицы получают посредством умножения исходной единицы на число 10, возведенное в положительную или отрицательную степень соответственно. Наименование этих единиц образуется путем прибавления специальных приставок к исходным единицам (см. табл. П2).

1.2. ИЗМЕРЕНИЕ ФИЗИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН

Невозможно определить или измерить одну величину, иначе как приняв в качестве известной другую величину этого же рода и указав соотношение, в котором они находятся.

Леонард Эйлер

Понятие физической величины неразрывно связано с понятием измерения, поскольку те из свойств объекта, которые не могут быть измерены (например, его форма или запах), не рассматриваются как физические величины.

Измерение физической величины представляет собой процесс нахождения ее значения экспериментальным путем с помощью специальных технических средств — средств измерений. Суть измерения сводится к сравнению измеряемой величины с физически однородной ей величиной известного размера (мерой) и выражается общим *уравнением измерений*:

$$A = x[a], \tag{1.1}$$

где A — измеряемая величина; $[a]$ — единица измерения; x — числовое значение измеряемой величины в принятых единицах измерения.

Из (1.1) следует, что для реализации измерений необходимо выполнение двух условий. Во-первых, это однозначная определенность единицы для измерения величины и возможность ее хранения и воспроизведения. Во-вторых, это однозначная определенность самой измеряемой физической величины. Например, бессмысленно говорить об измерении высоты земной атмосферы H_a до тех пор, пока не будет условлено, что понимается под указанной высотой, поскольку резкой границы, до которой простирается воздушная оболочка, не существует. И только, приняв, что граница атмосферы проходит там, где давление воздуха составляет некоторую заданную величину $P_{гр}$ можно приступить к измерениям. Так, если $P_{гр} = 79,8$ Па, то измеренное значение H_a составит 50 км, если же $P_{гр} = 12112$ Па, то это значение будет равно 15 км. Очевидно, что бессмысленно также говорить об измерении объектов, процессов или зависимостей, поскольку измерять можно только конкретные физические величины, их характеризующие.

Если же целью эксперимента является измерение не самой физической величины, а ее зависимости, характеризующей свойства изучаемого объекта или процесса, то для этого получают совокупность результатов измерения, соответствующих ряду фиксированных значений аргумента, и по указанной совокупности, используя приемы аппроксимации, устанавливают вид искомой зависимости. Действующая в настоящее время Государственная система обеспечения единства измерений предполагает именно такой путь измерения зависимостей. Однако следует понимать, что при наличии меры, формирующей образцовую зависимость в принципе можно измерить непосредственно функцию, а не только отдельные ее значения.

Очевидно, что измерения, например, теплопроводности мрамора и удельного электрического сопротивления воздуха, скорости света и частоты вращения ротора гидрогенератора, модуля упругости стекла и артериального давления человека представляют собой совокупность довольно разнородных операций.

Тогда, что дает основание для объединения этих операций единым понятием «измерение»?

Во-первых, все они направлены на достижение единой цели — получения объективного отражения реального свойства объекта измерений в виде именованного или неименованного числа.

Во-вторых, в рамках этих операций обязательно применение технического средства, хранящего единицу измеряемой физической величины и обеспечивающего получение измерительной информации в результате взаимодействия (возможно и бесконтактного) с объектом измерений (*технический аспект измерений*).

В-третьих, среди этих операций в том или ином виде обязательно присутствует операция сравнения измеряемой физической величины с ее узаконенной единицей (*метрологический аспект измерений*).

И, наконец, в-четвертых, в результате реализации этих операций получают значения измеряемой физической величины с известной погрешностью и в форме, удобной для дальнейшего использования (*гносеологический аспект измерений*).

Измеренное значение физической величины неизбежно отличается от ее истинного значения, которое могло бы быть получено в результате мысленного эксперимента, свободного от каких-либо погрешностей. Погрешности, которые будут подробно рассмотрены в подразд. 1.6, определяют следующие основные свойства измерений, характеризующие их качество:

- *точность* — качество измерений, отражающее близость их результатов к истинному значению измеряемой величины;
- *правильность* — качество измерений, отражающее близость к нулю систематических погрешностей в их результатах;
- *сходимость* — качество измерений, отражающее близость друг к другу результатов измерений, выполняемых в одинаковых условиях;
- *воспроизводимость* — качество измерений, отражающее близость друг к другу результатов измерений, выполняемых в различных условиях (в различное время, в различных местах, разными методами и средствами);

- **единство** — состояние измерений, при котором их результаты выражены в узаконенных единицах и получены с помощью единообразных средств измерений, а погрешности измерений известны с заданной вероятностью;

- **достоверность** — степень доверия к результатам измерений, определяемая уровнем информации о вероятностных характеристиках отклонения результатов от истинного значения.

Кроме упомянутых ранее свойств, при оценке качества измерений необходимо учитывать быстроту, трудоемкость и безопасность получения их результатов, а также экономические, эргономические и экологические показатели, характеризующие измерительный процесс.

1.3. КОЛИЧЕСТВЕННОЕ ОЦЕНЕВАНИЕ ФИЗИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЭМПИРИЧЕСКИХ ШКАЛ

Основная задача измерения — формирование некоторого объективного заключения о свойствах и состоянии наблюдаемого фрагмента действительности. В какой степени выполнима эта задача, если вытекающие из уравнения (1.1) условия измеримости физических величин не выполняются или выполняются неполностью?

Для ответа на этот вопрос рассмотрим соотношение между измерением и наблюдением.

Как известно, **наблюдение** представляет собой наиболее элементарный метод эмпирического познания, позволяющий получить некоторую первичную информацию об объектах окружающей действительности и являющийся необходимым элементом измерения и эксперимента. Результатом наблюдения являются оценки, выражаемые с помощью **качественных** и **сравнительных понятий**, в то время как результаты измерений — это

всегда *числовые величины*, отражающие свойства реальных объектов.

Опираясь на наблюдение и используя только качественные оценки, такие как «большой», «теплый», «светлый», «легкий» и т.д., очевидно представляется возможным расклассифицировать изучаемые свойства, т.е. включить каждое из них в определенный класс. Далее, используя сравнительные оценки типа «больше», «меньше», «равные» и т.д., можно упорядочить полученные классы и тем самым изучаемые свойства (характеристики, объекты и явления).

Каждый последующий класс в полученной упорядоченной последовательности будет отличаться степенью интенсивности интересующего нас свойства, которой можно приписать определенное число. Таким образом, будет получена некоторая *эмпирическая шкала* и тем самым завершён переход от чисто качественных к количественным оценкам.

Эмпирические шкалы, полученные описанным ранее способом, называют *порядковыми* и используют, например, для измерения твердости минералов и крепости горных пород.

Относительная эмпирическая шкала твердости минералов (табл. 1.1) была предложена немецким ученым Ф. Моосом в 1811 г. В соответствии с этой шкалой минералы располагаются в последовательность, в которой последующий является более твердым, чем предшествующий. Причем, один минерал считается более твердым, чем другой, если он может оставить царапину на этом минерале. Наиболее твердому минералу — алмазу — соответствует балл 10. Балл остальных минералов тем меньше, чем дальше они отстоят от алмаза в разработанной Ф. Моосом шкале. Последняя, конечно, позволяет оценивать твердость и тех минералов, которые не входят в число эталонных. Например, если топаз оставляет царапины на поверхности исследуемого минерала, а кварц нет, то искомая твердость составляет 7,5.

Шкала относительной крепости горных пород (табл. 1.2) была предложена в 1911 г. известным российским ученым-горняком профессором М.М. Протоdjаконовым (старшим). Обоснованная им классификация базировалась на следующих положениях: разрушение горных пород происходит, в основном,

Таблица 1.1

Десятибалльная шкала относительной твердости минералов Мооса

Балл	Минерал-эталон	Балл	Минерал-эталон
1	Тальк	6	Ортоклаз
2	Гипс	7	Кварц
3	Кальцит	8	Топаз
4	Флюорит	9	Корунд
5	Апатит	10	Алмаз

Таблица 1.2

Шкала относительной крепости пород М.М. Протодряконова

Категория пород		Коэффициент крепости	Категория пород		Коэффициент крепости
Высшей категории крепости	I	16—20	Довольно мягкие	VI	2
				VIa	1,5
Очень крепкие	II	11—15	Мягкие	VII	1,0
				VIIa	0,8
Крепкие	III	10	Землистые	VIII	0,6
	IIIa	8			
Довольно крепкие	IV	6	Сыпучие	IX	0,5
	IVa	5			
Средней крепости	V	4	Плывучие	X	0,3
	Va	3			

путем преодоления их прочности на сжатие $\sigma_{сж}$, если одна горная порода больше, чем другая сопротивляется одноосному сжатию, то она также будет больше сопротивляться растяжению, сдвигу, изгибу и т.д. Шкала М.М. Протодряконова подразделяется на 10 категорий, каждой из которых соответствует определенное значение коэффициента крепости $f \approx 10^{-7} \sigma_{сж}$ ($\sigma_{сж}$ измеряется в Па). Породы высшей степени крепости имеют категорию I и $f = 16 \div 20$. Наименее крепкие породы — категорию X и $f = 0,3$.

И шкала Мооса, и шкала Протодряконова являются эмпирическими шкалами. Однако, если первая из них еще не содержит собственно количественных понятий, и числа, приписываемые твердости минералов выбраны достаточно произвольно, то в ос-

нове второй шкалы лежат оценки, хотя и очень приблизительные, но полученные на основе достаточно точных количественных методов исследования. Таким образом, каждая эмпирическая шкала отражает уровень знаний, соответствующий моменту своего создания, и предназначена для удовлетворения конкретных практических нужд.

Ценность эмпирических шкал заключается в том, что они позволяют получить некоторый объективный, выраженный числом образ действительности в тех случаях, когда уровень познания явления не достаточен для установления точного соотношения между однородными физическими величинами.

В ряде случаев применение эмпирических шкал продиктовано не отсутствием необходимых знаний, а соображениями удобства, экономичности и достаточной для практических целей точности и информативности. Например, для измерения цвета до настоящего времени используют так называемую номинальную эмпирическую шкалу, представляющую собой сборник цветных образцов, обозначенных соответствующими номерами. При этом процесс измерения сводится к чувственному сравнению цвета исследуемого объекта с образцами и установлению их соответствия или несоответствия друг другу.

В настоящее время физические и психофизические аспекты формирования впечатления о цвете изучены достаточно полно. В результате разработана трехцветная колористическая шкала, в соответствии с которой свойством объекта считается хроматический цвет, составленный из красного, зеленого и голубого цветов с определенными спектральными характеристиками. Применение этой шкалы в принципе позволяет объективно измерять цвета, однако, требует слишком сложных преобразований и колориметрических расчетов для получения числовых показателей, однозначно характеризующих цвет с учетом его чувственного восприятия. В связи с этим измерение цвета с использованием трехцветной колористической шкалы практически не проводят.

Итак, в процессе познания действительности мы сталкиваемся с двумя группами величин. *Первая* из них объединяет метрические физические величины, образами которых являются действительные числа и единицы которых входят в состав системы единиц СИ. *Вторую* группу образуют величины, не входящие в

эту систему и измеряемые посредством эмпирических шкал, т.е. путем отнесения к некоторым эталонным состояниям.

Известный английский физик В. Томсон (Кельвин) отмечал, что «каждая вещь известна лишь в той степени, в какой ее можно измерить». То, что физические величины, входящие в первую из указанных групп, характеризуются большей степенью измеримости, чем входящие во вторую группу, говорит об их большей изученности и более высоком уровне развития наук, в рамках которых эти физические величины рассматривают.

Данное в начале предыдущего подраздела определение понятия «измерение» справедливо применить к физическим величинам первой группы, и именно это определение мы будем иметь в виду далее, рассматривая различные стороны измерительного процесса. Что касается установления числового соотношения между свойствами объектов с помощью эмпирических шкал, то этот процесс не отражает технических, метрологических и гносеологических аспектов измерений, потому должен быть отнесен к *количественному оцениванию*.

Очевидно, что по мере развития науки и техники, физические величины могут переходить из разряда оцениваемых в разряд измеряемых. Наглядным примером здесь может служить все та же твердость минералов, которую с 40-х годов нашего столетия стали измерять методом статического вдавливания алмазной пирамиды Виккерса. В рамках этого метода за величину твердости принимают отношение нагрузки к площади поверхности отпечатка, измеряемой с помощью микроскопа.

Существуют и другие методы определения твердости (Бринелля, Роквелла и Шора). Однако необходимо отметить, что значение твердости вследствие ее недостаточной изученности все еще остается условным числом, не связанным однозначной зависимостью с основными механическими свойствами материалов. Другими словами, под твердостью по-прежнему подразумевают не физическую постоянную, характеризующую материал, а условную величину, зависящую, кроме свойств последнего, еще и от способа определения. Действительно, твердость, измеренная разными методами и в различных условиях, имеет существенно отличающиеся друг от друга значения. Самой раз-

нообразной (в зависимости от метода измерений) может быть и размерность твердости.

1.4. КЛАССИФИКАЦИЯ ИЗМЕРЕНИЙ

Сущность основных понятий, использованных в классификации измерений (табл. 1.3), заключается в следующем.

Равноточные измерения — ряд измерений какой-либо физической величины, выполненных одинаковыми по точности средствами в одних и тех же условиях.

Неравноточные измерения — ряд измерений какой-либо физической величины, выполненных различными по точности средствами измерений и (или) в разных условиях.

Однократное измерение — измерение, выполненное один раз.

Однократное измерение иногда еще называют *измерительным наблюдением*. При этом предполагается, что в результате такого наблюдения получают одно значение из возможной группы значений исследуемой физической величины.

Многократное измерение — измерение одной и той же физической величины, состоящее из ряда n однократных измерений. Обычно многократным считают измерение, если $n > 4$, так как в этом случае результат многократного измерения может быть получен на основе статистической обработки ряда однократных измерений.

Статическое измерение — измерение физической величины, которая в процессе измерения остается постоянной во времени.

Динамическое измерение — измерение, в процессе которого размер измеряемой физической величины изменяется с течением времени. Примером динамического измерения может служить локационное измерение расстояния до быстро приближающейся цели или измерение температуры воды в процессе ее интенсивного нагревания.

Технические измерения — измерения, проводимые в заданных условиях по определенной методике, которая разработана и исследована заранее, до проведения измерений. Технические из-

Классификация измерений

Классификационный признак	Измерения
Характеристика точности	Равноточные Неравноточные
Число измерений в серии	Однократные Многократные
Характер зависимости измеряемой величины от времени измерения	Статические Динамические
Метрологическое назначение	Технические Исследовательские Метрологические
Выражение результата измерений	Абсолютные Относительные
Общие приемы получения результатов измерений	Прямые Косвенные Совокупные Совместные

мерения осуществляют для решения практических задач контроля и управления в различных областях хозяйства страны. Эти измерения носят, как правило, массовый характер. При их реализации нет необходимости определять и анализировать погрешности получаемых результатов измерения, поскольку эти погрешности заранее регламентированы соответствующими нормативными и методическими документами.

К техническим измерениям относят, например, измерения напряжений в массиве горных пород, проводимые для оценки их устойчивости, или необходимые для управления процессом проветривания измерения скорости воздушных потоков в выработках.

Исследовательские измерения — измерения, при которых погрешность их результата оценивают по данным, полученным в процессе самого измерения или аналогичного измерения, проведенного точно в таких же условиях. Эти измерения проводят, в основном, при различных научных исследованиях, когда на первый план выступают требования высокой точности. Исследовательские измерения часто называют *лабораторными*, что не исключает проведение их в полевых или цеховых условиях.

Метрологические измерения — измерения, осуществляемые с целью воспроизведения единиц физических величин или передачи их размера рабочим средствам измерения. Их осуществляют при помощи эталонов и образцовых средств измерений, подробнее о которых см. в подразд. 1.8.

Абсолютное измерение — измерение, обеспечивающее получение измеряемой величины, которая выражена в ее единицах. Примером абсолютных измерений может служить измерение длины какого-либо объекта с помощью линейки, отградуированной в миллиметрах.

Относительное измерение — измерение отношения (или изменения) величин к одноименной величине, играющей роль единицы (или принимаемой за исходную).

Прямое измерение — измерение, при котором искомое значение физической величины находят непосредственно из опытных данных. Например, измерение силы электрического тока посредством амперметра, временного интервала с помощью секундомера и т.п.

Косвенное измерение характеризуется тем, что значение искомой величины A определяют на основе известной математической зависимости F , связывающей эту величину с другими физическими величинами, значения a , которых находят чаще всего путем прямых измерений, т.е.

$$A = F(a_1, a_2, \dots, a_m). \quad (1.2)$$

Аргументы в формуле (1.2) иногда получают также совокупными, совместными или косвенными измерениями. Пример косвенных измерений: нахождение скорости C распространения упругих колебаний на основе прямых измерений времени t их прохождения от излучателя к приемнику и расстояния L между последними (уравнение связи $C = L/t$).

К косвенным измерениям обычно прибегают в тех случаях, когда прямые измерения провести невозможно или слишком сложно либо когда косвенные измерения обеспечивают более точный результат, чем прямые.

Совокупные измерения представляют собой неоднократные, обычно прямые измерения одной или нескольких одно-

именных величин с получением искомого результата путем решения системы уравнений, составляемых по частным результатам измерений.

Примером совокупных измерений может служить определение взаимной индуктивности M между двумя катушками с индуктивностями L_1 и L_2 соответственно. Если сначала соединить катушки таким образом, чтобы их магнитные поля складывались, то общую индуктивность определим по формуле

$$L_{01} = L_1 + L_2 + 2M. \quad (1.3)$$

Соединив катушки так, чтобы их магнитные поля вычитались, для общей индуктивности будем иметь

$$L_{02} = L_1 + L_2 - 2M. \quad (1.4)$$

Определив путем прямых измерений значения L_{01} и L_{02} , из выражений (1.3) и (1.4), получим

$$M = (L_{01} - L_{02})/4. \quad (1.5)$$

Совместные измерения — это проводимые одновременно измерения двух или нескольких неоднородных величин с последующим вычислением искомого результата на основе зависимостей, связывающих его с указанными величинами.

Например, требуется определить зависимость сопротивления R от температуры T , если известно уравнение связи между этими величинами

$$R = R_0(1 + \alpha T), \quad (1.6)$$

где R_0 — сопротивление резистора при 0°C ; α — температурный коэффициент сопротивления.

Нахождение значений R_0 и α сводится к измерению сопротивлений резистора R_1 и R_2 при двух произвольных значениях температуры T_1 и T_2 , соответственно и решению системы уравнений

$$\left. \begin{aligned} R_1 &= R_0(1 + \alpha T_1) \\ R_2 &= R_0(1 + \alpha T_2) \end{aligned} \right\}. \quad (1.7)$$

1.5. ПРИНЦИП, МЕТОД, АЛГОРИТМ И МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЙ

Существо эффективного правила игры или полезного закона физики состоит в том, что правило можно установить заранее и применять во многих случаях.

Норберт Винер

В основе измерительного эксперимента лежат определенные принципы, а его реализация предполагает использование тех или иных методов, алгоритмов и методик.

Под *принципами измерений* понимают совокупность физических явлений, на которых эти измерения основаны.

Измерение одних и тех же физических величин может быть реализовано с использованием самых различных принципов, которые во многом определяют выбор средств измерений и потенциальные показатели качества последних. Изложенное наглядно иллюстрируется данными табл. 1.4, где в качестве примера представлены некоторые принципы, лежащие в основе измерения температур.

Метод измерения отражает путь, способ экспериментального нахождения физической величины и представляет собой совокупность приемов использования принципов и средств измерений.

С точки зрения организации сравнения измеряемой величины с единицей измерения все методы измерения подразделяют на две группы: методы непосредственной оценки и методы сравнения.

Метод непосредственной оценки предполагает определение измеряемой величины непосредственно по отсчетному устройству измерительного прибора прямого действия, который предварительно градуируют с помощью образцовых измерительных приборов или мер. Под последними понимают средства, воспроизводящие физическую величину данного значения.

На этом методе основаны все показывающие измерительные приборы: вольтметры, амперметры, ваттметры, манометры, динамометры, термометры, тахометры и т.д.