

*Министерство науки и высшего образования
Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
Владимирский государственный университет имени А.Г и Н.Г. Столетовых
Институт «Архитектура, Строительство, Энергетика»
Кафедра «Теплогазоснабжение, вентиляция и гидравлика»*

***Основы теории эксперимента
Курс лекции (ЛикБез)***

*Направление подготовки 08.04.01 – Строительство
Программа подготовки «Микроклимат»
Квалификация (степень) выпускника: магистр*

Стариков А.Н.



Владимир-2016

Рецензент

к.т.н., доцент _____

«Владимирский государственный университет
имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых»

.....

Печатается по решению редакционно-издательского совета ВлГУ

Основы теории эксперимента: курс лекций для магистрантов дневного, заочного и дистанционного отделения по направлению «Строительство» 270800, профиль «Микроклимат» / Владим. гос. ун-т; сост.: А.Н. Стариков, Владимир: Издательство ВлГУ, 2015.

Изложены базовые теоретические и методические основы проведения экспериментальных исследований в технической физике. Приведены основные этапы и классификация экспериментов. Представлены основные методы обработки и представления результатов экспериментальных измерений. Предназначено для студентов высших учебных заведений, обучающихся по направлению подготовки 08.04.01 – Строительство, по дисциплинам «Научный эксперимент», Пособие может быть также использовано при обучении студентов других направлений подготовки как базовое руководство по основам проведения экспериментальных исследований.

Рекомендовано для формирования профессиональных компетенций в соответствии с ФГОС ВО

Табл.....Ил.....Библиогр.:.... назв.

УДК 621.9.06 (075)

ББК _____

Оглавление

Введение.....	5
1. Роль эксперимента в физике и истории науки.....	6
1.1. Экспериментальные исследования как метод познания. Наблюдение, научное наблюдение, эксперимент. Гипотеза и верификация.....	8
1.2. Экспериментальный метод в истории науки	9
1.3. Современные физические исследования. Электроника.....	17
2. Классификация, принципы и определения. Экспериментальных методов исследований	30
2.1. Виды экспериментов.....	30
2.2. Цель, задачи и основные понятия экспериментальных исследований ...	34
2.3. Физические величины и системы единиц измерения	37
2.4. Основные этапы планирования и проведения эксперимента.....	48
3. ОСНОВЫ АНАЛИЗА ДАННЫХ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ.....	49
3.1. Ошибки измерений	49
3.2. Основы статистической обработки результатов измерений	53
3.3. Основы представления результатов измерений	57
3.4. Запись и округление результата измерения	62
3.5. Регрессионный анализ	63
3.6. Автоматизация статистической обработки	63
4. ОФОРМЛЕНИЕ НАУЧНЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ. СОВРЕМЕННЫЕ ИНСТРУМЕНТЫ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ ДАННЫХ	65

Список сокращений

ВПЭ – вакуумная и плазменная электроника;
ИС – интегральная микросхема;
ПЭ – полупроводниковая электроника;
СИ – международная система единиц;
СМ – стандартная модель;
LHC (Large Hadron Collider) – Большой адронный коллайдер;
LEP (Large Electron-Positron Collider) – Большой электрон-позитронный коллайдер

Целью данного пособия является начальное ознакомление студентов с исходными, базовыми принципами проведения экспериментальных исследований в технической физике, основами их анализа и представления полученных данных.

Пособие предназначено студентам, изучающим дисциплины «Методы исследований в технической физике», «Планирование научного эксперимента», и «Экспериментальные методы исследований», преподаваемые на первых курсах магистратуры. Целью изучения данных дисциплин является формирование специалистов, понимающих основные принципы построения физического эксперимента и способных использовать полученные знания для выбора, обоснования, освоения, планирования и реализации экспериментальных физических исследований, а также последующей грамотной обработки и представления научных результатов.

В первом разделе пособия приведены важнейшие понятия экспериментальных исследований, кратко рассмотрены примеры экспериментов, сыгравших существенную роль в становлении современных представлений физики. Изучение исторической эволюции и ряда примеров постановки экспериментов позволяет овладеть основными подходами к построению современного эксперимента.

Во втором разделе изложены теоретические и методические основы экспериментальных исследований, приведены основные этапы и классификация экспериментов, рассмотрены метрологическое обеспечение исследований и размерности физических величин.

Третий раздел книги знакомит читателей с основами обработки и анализа и принципами представления экспериментальных данных. Кратко рассмотрены методы математической статистики и обработки опытных данных, оценок погрешностей.

В четвертом разделе рассказано о научной издательской системе LaTeX и описаны примеры ее использования для оформления академических результатов в виде профессионально сверстаных публикаций и слайдов презентаций.

Введение

Одна из важнейших функций человеческого общества состоит в производстве знаний об окружающем мире. Эти знания позволяют человечеству осознать себя, строить и осуществлять стратегию и тактику своего выживания и развития. Активное научное познание оперирует инструментами, в которые входят теория, наблюдение, научное наблюдение и эксперимент. Эксперимент занимает особое, центральное место в научных исследованиях, доставляя более полные, сложные и точные данные, чем наблюдение и научное наблюдение. Экспериментальная наука питает теорию опытными данными, а также пользуется теоретическими достижениями. Эксперимент является важнейшей составной частью современных научных исследований, в которых теория выступает совместно с ним. Эксперимент позволяет опровергнуть или не опровергнуть теоретическую гипотезу, подготовить платформу для новых идей. Однако приходится признать, что эксперимент не всесилен. Строго говоря, с помощью эксперимента гипотеза не может быть верифицирована, она может быть лишь не опровергнута!

В современной физике существует множество экспериментальных методов исследований, которые постоянно развиваются. Некоторые из них настолько сложны, трудоемки и дорогостоящи, что сами становятся предметом исследования отдельного научного направления - теории эксперимента.

Методика эксперимента должна быть точно обоснована и тщательно реализована. Необходимо обеспечить точность, повторяемость, достоверность исследования, применить эффективные методы математической статистики и обработки экспериментальных данных. История науки знает немало примеров, когда хорошие научные идеи в течение длительного времени не имели практического применения потому, что подтверждающие их эксперименты были поставлены недостаточно грамотно или недостаточно убедительно.

В настоящее время достижения математической составляющей теории эксперимента представлены в виде прикладных компьютерных программ, открывающих для экспериментаторов возможности различного анализа и представления данных. Требуется умение работать в современных пакетах программ по обработке данных и представлению научных публикаций. Однако использование этих программ без понимания логических основ экспериментальных исследований также может привести к ошибкам и неверным выводам.

Завершающая стадия этапа исследовательской работы включает в себя формулировку выводов и рекомендаций по использованию данных; оформление научных результатов в виде отчетов, патентов, публикаций в научной периодике, обзорах и монографиях.

1. Роль эксперимента в физике и истории науки.

Процесс познания мира – важнейшая и наиболее ценная часть жизнедеятельности человека. Фундаментальные знания обладают абсолютной ценностью, из которых следуют все практические, так называемые прикладные, знания. Новые фундаментальные знания человек создает путем исследовательских экспериментов. Эксперименту принадлежит ключевая роль в процессе научного познания окружающего мира. Эксперимент позволяет находить решения во всех областях деятельности, например, в производстве необходимых предметов, создании новых технологий, поиске лекарств и способов лечения и т. д. Это способ создания новых практических знаний, когда оказывается недостаточно имеющихся теоретических знаний или опыта. Эксперимент, как правило, соотносится с теорией, которую он может опровергать или давать основания для создания новых теоретических положений. В эксперименте проверяется не теория в целом, а ее наблюдаемые следствия. Здесь проявляются две функции эксперимента:

- исследовательская, источник теории;
- проверочная, критерий «истинности», непротиворечивости теории.

Выдающийся исследователь П. Л. Капица говорил: «Теория – это хорошая вещь, но правильный эксперимент остается навсегда». Тем самым утверждают, во-первых, главенствующая роль эксперимента в познании мира и, во-вторых, его фундаментальная ценность.

Что служит ответом на вопрос: откуда мы знаем и почему уверены в том, что все действительно так в окружающем нас мире? Что Земля имеет форму шара? Что в ядре гелия два протона и два нейтрона? Что сила притяжения между двумя телами прямо пропорциональна их массам и обратно пропорциональна квадрату расстояний? Что уравнения Максвелла правильно описывают электромагнитные явления? Мы знаем это из физических экспериментов. Только с помощью эксперимента можно проверить физическую модель. Так, в начале XIX в. в «Кратком руководстве к физике» говорится: «Физика есть сколько приятная, столько и полезная наука, толкующая свойства тел или предметов, нас окружающих. Свойства тел познаются или через наблюдения, когда тело рассматривается в естественном состоянии, т. е. так, как оно есть, или через опыты, когда тело приводят в такое состояние, до которого оно само дойти никогда не сможет» [8].

Физика – наука экспериментальная, основанная на опыте, количественных измерениях и построении математических зависимостей. Универсальность физики, ее полезность, а часто и необходимость для других сфер знания связаны с тем, что физика исследует наиболее фундаментальные, глубинные процессы и структуры материи, создает фундамент практически во всех областях

естествознания. Благодаря этому физический эксперимент открывает путь к пониманию мироздания.

Принципы измерения таких базовых величин, как длина, время и масса, известны людям с древних времен. Тогда люди от простого созерцания природных явлений начали постепенно переходить к их изучению с помощью осознанно поставленных экспериментов, результаты которых выражаются числами. Примерно к XVI–XVII вв. сложился принцип физического познания природы, который до сих пор состоит на вооружении у науки и который можно схематически проиллюстрировать следующим образом:

Явление – Гипотеза – Предсказание – Эксперимент – Теория

Для объяснения какого-либо явления сначала формулируют гипотезу, которая могла бы раскрыть его сущность. На основании гипотезы делают предсказание, которое, например, можно представить как некоторое число или набор чисел. Эти числа проверяют экспериментально, производя измерения. Если числа, полученные в результате эксперимента, согласуются с предсказанным, гипотеза получает ранг физической теории. В противном случае формулируют новую гипотезу, делают новое предсказание и ставят новый эксперимент.

Важно, что результаты эксперимента, также как и предсказания физической модели, не качественные, а количественные, т. е. представляют собой набор чисел. Поэтому сравнение вычисленных и измеренных результатов может стать убедительной однозначной процедурой. В экспериментах используется все многообразие доступных предметов, которые становятся средствами проведения исследования. Из них формируется аппаратура, которая включает в себя как самые простые предметы, так и наиболее сложные. Например, Броун в 1827 г. открыл тепловое движение частиц, наблюдая крупинцы торфа в воде. С тех пор хаотическое броуновское движение наблюдают у других частиц вещества, атомов, электронов и т. д. Первую фотографию обратной стороны Луны получили, послав 7 октября 1959 г. с космодрома Байконур ракету – советскую автоматическую межпланетную станцию «Луна-3» со сложнейшей аппаратурой на борту. Большая часть современных исследовательских экспериментов осуществляется с помощью компьютеров методом так называемого компьютерного моделирования. При этом используют как планшеты, так и суперкомпьютеры. У каждого времени, каждого этапа развития человечества были и есть свои различные средства исследования.

1.1. Экспериментальные исследования как метод познания. Наблюдение, научное наблюдение, эксперимент. Гипотеза и верификация.

Наблюдение есть преднамеренное планомерное восприятие объекта или явления, проводимое с целью выявления его существенных свойств или особенностей. Это активная форма познания мира, форма деятельности, требующая уяснения задачи и разработки методики. Наблюдение может производиться по определенному плану, с определенной целью. В процессе наблюдения формируется чувственное восприятие объекта, это исследование объекта в его естественном состоянии, без воздействия со стороны наблюдателя.

Научное наблюдение характеризуется тем, что в процесс наблюдения добавляется измерение параметров объекта, результаты записываются и обрабатываются.

В процессе наблюдения или научного наблюдения исследователь не вмешивается в природу наблюдаемого процесса, не может изучать его «в чистом виде», отделив от среды существования объекта, не может воспроизводить явление столько раз, сколько потребуется, исследовать явление в различных условиях. Изменение процесса исследования требует перехода к эксперименту.

Эксперимент (лат. experimentum - опыт, проба, испытание) как общенаучный способ познания занимает важнейшее место в методологии современной науки. В эксперименте, в отличие от наблюдения, создаются условия для более интенсивного анализа, для активного и сознательного воздействия на исследуемые объекты, часто с глубоким вмешательством в те или иные процессы. Основная характеристика эксперимента состоит в том, что *экспериментатор (Э) активно воздействует на объект исследования (О) и изучает реакцию объекта на это воздействие:*

$$\text{Э} \Leftrightarrow \text{О},$$

Экспериментальные исследования основаны на управлении объектом и измерениях эффектов управления, т. е. отклика объекта. Другими словами, эксперимент – это метод исследования, базирующийся на управлении объектом с помощью ряда воздействующих на него факторов, контроль за действием которых осуществляет исследователь.

Таким образом, *эксперимент* представляет собой процедуру изучения явления в специально создаваемых, контролируемых условиях, позволяющих активно управлять ходом данного процесса, т. е. вмешиваться в него и видоизменять его в соответствии с исследовательскими задачами, а также воспроизводить изучаемое явление при воспроизведении данных условий.

Основой эксперимента является измерение параметров объекта исследований и характеристик воздействия на него. Под *измерением* понимают

получение количественной информации в виде зависимостей измеряемой величины от процедуры измерения в задаваемых условиях.

Научный эксперимент ставится с определенной целью, проводится по подготовленному плану, подразумевает измерения. В научном эксперименте заранее разрабатывают программу исследования, формулируют цели, задачи, предмет и объект исследования, выдвигают гипотезы и разрабатывают методические приемы проверки гипотезы.

Гипотеза представляет собой теоретическое представление о возможном результате будущего эксперимента, построенное на основании предыдущего опыта, а также идей, предположений, вносимых исследователем.

Гипотеза не может быть верифицирована, она может быть лишь не опровергнута. Абсолютного знания не существует, есть только расширение познаний.

Эксперимент обычно проводится с определенной целью и строится на основе некоторой системы научных знаний. В эксперименте исследователь формирует из эмпирической предметности собственный объект исследования и теоретическое знание об этом объекте.

Исследовательский эксперимент строится на основе связи с теорией. Эксперимент и теория – две взаимодополняющие формы познания, две стороны единого процесса познания, но требования к теории и эксперименту неодинаковы. Значение эксперимента часто проистекает из его соотношения с теорией, но эксперимент может иметь и свое собственное значение, не зависящее от теории. В эксперименте проверяется не теория в целом, а ее наблюдаемые следствия. Эксперимент проверяет специфическую интерпретацию данной теории.

Философия дает такое общее определение:

эксперимент есть преобразование чувственно-данного предмета с целью его объективного (теоретического) понимания и воплощения в наблюдаемых процессах теоретического конструкта с целью его предметной проверки.

1.2. Экспериментальный метод в истории науки

В древней науке основой научного познания являлось наблюдение. Многие авторы придерживаются мнения, что наука в полном смысле слова сформировалась в XVI–XVII вв., а в древности можно говорить об аспектах, элементах научности [1]. В XVII в. появляются трактаты, обобщающие тысячелетний опыт развития древней науки. Назовем некоторые из них:

1600 г. – Гилберт «О магните»;

1620 г. – Кеплер «Новая астрономия»;

1632 г. – Галилей «Диалог о двух системах мира»;

1644 г. – Декарт «Начала философии»;

1672 г. – Герики «Новые опыты»;

1686 г. – Ньютон «Математические начала натуральной философии»;

1690 г. – Гюйгенс «Трактат о свете».

Основанием новой науки стал исследовательский эксперимент. Внедрение теории в опыт и опыта в теорию, т. е. формирование исследовательского эксперимента, принципиально отличает новую науку от древней.

С Ньютоном в физику входят строгость и точность. Ньютон дает науке метод принципов, определяет роль математики в исследовании природы.

Рассмотрим несколько примеров ключевых экспериментов в истории физики.

Один из известных древних физических опытов, который по современной терминологии можно назвать научным наблюдением, задуман и осуществлен Эратосфеном Киренским в 276-194 гг., до н. э. Киренский - греческий математик и астроном, возглавлявший знаменитую Александрийскую библиотеку, впервые доказал, что Земля имеет форму шара. Выполнение опыта состояло в следующем.

В полдень, в день летнего солнцестояния, в г. Сиене (ныне Асуан) Солнце находилось в зените, и предметы не отбрасывали тени. В тот же день и в то же время в городе Александрия, находившемся в 800 километрах от Сиена, Солнце отклонялось от зенита примерно на 7° . Это составляет около $1/50$ полного круга (360°), откуда получается, что окружность Земли равна 40 000 километрам, а радиус - 6300 километрам. Почти невероятным представляется то, что измеренный столь простым методом радиус Земли оказался всего на 5 % меньше значения, полученного точными современными методами!

В XVв. Леонардо да Винчи представил схему визуализации природного объекта в виде последовательности возникновения и превращения образа: объект – физическая или визуальная модель – перспективный визуальный образ – геометрическая фигура, В XVI в. Уильям Гильберт, - придворный врач английской королевы Елизаветы, – провозгласил важное условие научного эксперимента – его воспроизводимость другими [16].

Значение опытного знания и опытной науки подчеркивалось и в позднем средневековье. Но и в эпоху Возрождения опыт все еще трактовали как наблюдение явлений природы.

В истории науки основоположником экспериментального метода исследования природы считается Галилей, поскольку именно в его работах этот метод обрел наиболее заверченный вид. Галилей положил начало практике экспериментального исследования природы, в которой опыт планируется как особая познавательная ситуация: исследователь задает вопросы природе и получает ответы. Благодаря Гильберту и Галилею в практику научного познания входит не только мысленный (Аристотель), но и материальный эксперимент.

Рассмотрим эксперимент Галилея как иллюстрацию перехода от научного наблюдения к эксперименту в механике XVI–XVII вв.

В XVII в. господствовала точка зрения Аристотеля, который учил, что движение сохраняется до тех пор, пока есть усилие, а скорость падения тела зависит от его массы. При этом Аристотель отвергал значение исследовательского эксперимента как частного случая практики, а признавал лишь мысленный эксперимент как чистый и общий. Тем не менее именно наблюдения определяли ход мыслей ученого. Чем тяжелее тело, тем быстрее оно падает. Наблюдения в повседневной жизни, казалось бы, подтверждают это. Если одновременно выпустить из руки легкий волан для бадминтона и более массивный мяч для гольфа, то мяч быстрее коснется земли. Так происходит потому, что на скорость падения влияет не только сила притяжения, но и сила сопротивления воздуха. Соотношение этих сил для легких и для тяжелых предметов различно, что и приводит к наблюдаемому эффекту.

Галилей усомнился в правильности выводов Аристотеля и нашел способ их проверить. Для этого он сбрасывал (не с Пизанской башни, как часто пишут, а с обрыва у реки с высоты 60 м) одновременно пушечное ядро массой 200 кг и значительно более легкую мушкетную пулю массой 200 г. Оба тела имели примерно одинаковую обтекаемую форму, и для ядра, и для пули силы сопротивления воздуха были пренебрежимо малы по сравнению с силами притяжения. Галилей выяснил, что оба предмета достигают земли в один и тот же момент, т. е. скорость их падения одинакова.

Результаты, полученные Галилеем, - следствие закона всемирного тяготения и закона, в соответствии с которым ускорение, испытываемое телом, прямо пропорционально силе, действующей на него, и обратно пропорционально массе.

В другом эксперименте Галилей измерял расстояние, которое шары, катящиеся по наклонной доске, преодолевали за равные промежутки времени, измеряемые автором опыта по водяным часам.

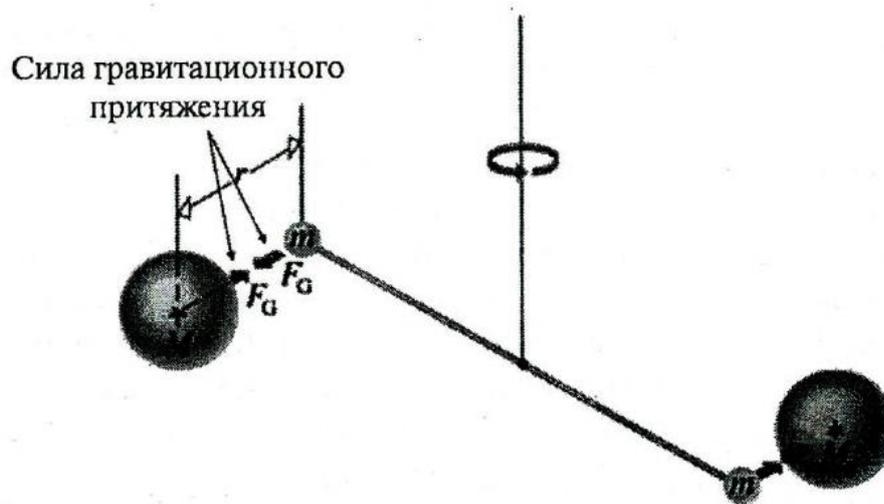
Ученый выяснил, что если время увеличить в два раза, то шары прокатятся в четыре раза дальше. Эта квадратичная зависимость означала, что шары под действием силы тяжести движутся ускоренно, что противоречило принятому на веру в течение 2000 лет утверждению Аристотеля о том, что тела, на которые действует сила, движутся с постоянной скоростью, а если сила не приложена к телу, то оно покоится. Результаты этого эксперимента Галилея, как и результаты его первого эксперимента, в дальнейшем послужили основой для формулирования законов классической механики.

В начале нашей эры утвердилась геоцентрическая модель Птолемея, согласно которой в центре мира располагалась Земля, а вокруг нее вращались Солнце, Луна и планеты. Эта модель была общепризнанной в течение 1500 лет, но сталкивалась со все более серьезными сложностями. Наблюдаемое положение на небе Солнца, Луны и планет не соответствовало предсказаниям геоцентрической модели, и такое противоречие становилось непреодолимым по мере того, как росла точность наблюдений. Это позволило Николаю Копернику предложить в середине XVI в. гелиоцентрическую модель, согласно которой в центре находится не Земля, а Солнце. Гелиоцентрическая гипотеза получила блестящее подтверждение благодаря беспрецедентным по точности (для того времени) наблюдениям Тихо Браге, результаты которых совпали с предсказаниями гелиоцентрической модели. Последняя стала общепринятой, получив, таким образом, статус теории.

В 1642 г., в год смерти Галилея, родился гениальный Исаак Ньютон. Наблюдая падение тел (легенда о падении яблока!), Ньютон в 1666 г. пришел к выводу о том, что тяготение действует через пространство. Ньютон сформулировал закон всемирного тяготения: сила притяжения между двумя телами с массами M и m , удаленными друг от друга на расстояние r , равно $F = \gamma(m \cdot M/r^2)$. Потребовалось определить значение гравитационной постоянной γ . Для этого нужно было измерить силу притяжения между двумя телами с известными массами.

Эксперимент придумал и осуществил в 1798 г. соотечественник Ньютона Генри Кавендиш. Он использовал крутильные весы – коромысло с двумя шариками, подвешенное на очень тонком шнурке (рис. 1.1).

Кавендиш измерял смещение коромысла (поворот) при приближении к шарикам весов других шаров большей массы. Для увеличения чувствительности смещение определялось по световым «зайчикам», отраженным от зеркал, закрепленных на шарах коромысла. В результате этого эксперимента Кавендишу удалось довольно точно определить значение гравитационной константы и впервые вычислить массу Земли.



*Рис. 1.1. Схема опыта Г. Кавендиша
(прибор для определения гравитационной постоянной)*

Французский физик Жан Бернар Леон Фуко в 1851 г. экспериментально доказал вращение Земли вокруг своей оси с помощью 67-метрового маятника, подвешенного к вершине купола парижского Пантеона. В точке подвеса нити маятника шарнир предотвращает ее скручивание, и поэтому на плоскость качания маятника через нить не действуют механические силы. В результате плоскость качания сохраняет неизменное положение по отношению к звездам. А наблюдатель, находящийся на Земле и вращающийся вместе с ней, видит, что плоскость вращения медленно поворачивается в сторону, противоположную направлению вращения Земли. Сегодня этот опыт Фуко любой посетитель может увидеть в Планетарии в Санкт-Петербурге.

Природа света

В 1672 г. Исаак Ньютон осуществил простой эксперимент – затворив оконные ставни, он проделал в них небольшое отверстие, сквозь которое проходил солнечный луч. На пути луча была поставлена призма, а за призмой – экран. На экране Ньютон наблюдал «радугу»: белый солнечный луч, пройдя через призму, превратился в несколько цветных лучей – от фиолетового до красного (дисперсия света). Он показал, что белый свет нужно рассматривать как составной. Основными же являются цвета от фиолетового до красного.

Исаак Ньютон был не первым, наблюдавшим это явление. Уже в начале нашей эры было известно, что большие монокристаллы природного происхождения обладают свойством разлагать свет на цвета. Первые исследования дисперсии света в опытах со стеклянной треугольной призмой выполнили англичанин Хариот и чешский естествоиспытатель Марци. Однако сделанные на их основе выводы не перепроверялись дополнительными экспериментами. И Хариот, и Марци оставались последователями Аристотеля, который утверждал, что

различие в цвете определяется различием в количестве темноты, «примешиваемой» к белому свету. Фиолетовый цвет, по мнению Аристотеля, возникал при наибольшем добавлении темноты к свету, а красный – при наименьшем. Ньютон же провел дополнительные опыты со скрещенными призмами, когда свет, пропущенный через одну призму, проходит затем через другую. На основании совокупности этих опытов он сделал вывод о том, что «никакого цвета не возникает из белизны и черноты, смешанных вместе, кроме промежуточных темных; количество света не меняет вида цвета».

Этот эксперимент Ньютона служит примером того, как разные люди, наблюдая одно и то же явление, интерпретируют его по-разному, и только постановка дополнительных экспериментов позволяет сделать правильные выводы.

Хотя Ньютон в своих опытах показал явления дифракции и интерференции света, до начала XIX в. в науке преобладали представления о корпускулярной природе света. Свет считали состоящим из отдельных частиц – корпускул.

Рассматривая взаимодействие волн на поверхности воды, например, порожденных двумя брошенными камнями, можно заметить, как, накладываясь друг на друга, эти волны подавляют или усиливают друг друга, т. е. интерферируют. Основываясь на этом, английский физик и врач Томас Юнг осуществил в 1801 г. опыты с лучом света, который проходил через два отверстия в непрозрачном экране, образуя, таким образом, два независимых источника света, аналогичных двум брошенным в воду камням. В результате он наблюдал интерференционную картину, состоящую из чередующихся темных и светлых полос. Темные полосы соответствовали зонам, где световые волны от двух щелей гасят друг друга. Светлые полосы возникали там, где световые волны взаимно усиливались. Полосы не могут возникать, если свет состоял бы из корпускул, и этим была доказана волновая природа света.

Природа электричества и магнетизма

Представление о том, что электрический заряд любого тела дискретен (т. е. состоит из большего или меньшего набора элементарных зарядов, которые уже не подвержены дроблению), возникло еще в начале XIX в. и поддерживалось такими известными физиками, как М. Фарадей и Г. Гельмгольц. В теорию был введен термин «электрон», обозначающий некую частицу – носитель элементарного электрического заряда. Этот термин, однако, был в то время чисто формальным, поскольку ни сама частица, ни связанный с ней элементарный электрический заряд не были обнаружены экспериментально. К началу XIX в. состоялось открытие широко известного теперь закона Кулона.

Компас с магнитной стрелкой был хорошо известен уже в XII в., а в древнем Китае, возможно, и раньше. В 1600 г. Гильберт обобщил и систематизировал

экспериментальные факты, относящиеся к исследованиям электричества и магнетизма, и пришел к выводу о том, что Земля обладает свойствами гигантского магнита.

В 1820 г. Эрстед открыл магнитное действие электрического тока, а Фарадей издал трехтомный труд «Экспериментальные исследования по электричеству». Ампер написал знаменитый трактат «Теория электродинамических явлений, выведенная исключительно из опыта». За этот труд Ампера стали называть «Ньютоном электричества».

В 1895 г. немецкий физик Вильгельм Конрад Рентген во время экспериментов с разрядной трубкой обнаружил, что ее анод под действием выходящих из катода лучей способен излучать иные лучи. Их назвали X-лучами или лучами Рентгена. В том же году французский физик Жан Батист Перрен экспериментально доказал, что катодные лучи – это поток отрицательно заряженных частиц. Но несмотря на колоссальный экспериментальный материал, электрон оставался гипотетической частицей, поскольку не было ни одного опыта, в котором участвовали бы отдельные электроны.

В 1897 г. состоялось историческое экспериментальное открытие электрона. Дж. Дж. Томсон поставил свой знаменитый эксперимент, в котором стеклянная трубка содержит фокусирующее луч устройство и электромагнит; луч оставляет след на люминофоре, покрывающем стекло напротив катода. Определив в результате экспериментов отношение заряда к массе предполагаемой частицы, он обнаружил, что для катодных лучей это отношение в 1836 раз больше, чем отношение для водорода. Никакой известной частице такое отношение заряда к массе не подходило. Сопоставляя длину свободного пробега атомов и молекул в таких же условиях, Томсон сделал вывод о том, что катодные лучи представляют собой поток мельчайших частиц, которые в 1836 раз легче водорода, несут отрицательный заряд e , равный заряду электролитических ионов, и являются частицами, входящими в состав всех атомов [16].

Американский физик Роберт Милликен разработал метод, ставший классическим примером изящного физического эксперимента. Милликену удалось изолировать в пространстве несколько заряженных капелек воды (или масла) между пластинами конденсатора. Освещая их рентгеновскими лучами, можно было ионизировать воздух между пластинами и изменять заряд капелек. При включенном поле между пластинами капелька медленно двигалась вверх под действием силы электрического поля. При выключенном поле она опускалась под действием гравитации. Включая и выключая поле, можно было изучать каждую капельку из взвешенных между пластинами капелек. Время существования капли воды было ограничено приблизительно 45 с из-за испарения. К 1909 г. удалось определить, что заряд любой капли всегда был целым и кратным фундаментальной величине e (заряд электрона). Появилось убедительное доказательство

того, что электроны представляют собой частицы с одинаковыми зарядом и массой.

Заменив капельки воды капельками масла, Милликен получил возможность увеличить продолжительность наблюдений до 4,5 ч и в 1913 г., исключив один из возможных источников погрешностей, опубликовал первое измеренное значение заряда электрона: $e = (4,774 + 0,009) \cdot 10^{-10}$ электростатических единиц.

К началу XX в. стало понятно, что атомы состоят из отрицательно заряженных электронов и какого-то положительного заряда, благодаря которому атом остается в целом нейтральным. Однако предположений о том, как выглядит эта «положительно-отрицательная» система, было слишком много, в то время как экспериментальных данных, которые позволили бы сделать выбор в пользу той или иной модели, явно не хватало. Большинство физиков приняли модель Томсона: атом как равномерно заряженный положительный шар диаметром примерно 10^{-8} см с плавающими внутри отрицательными электронами.

В 1909 г. Эрнст Резерфорд (ему помогали Ганс Гейгер и Эрнст Марсден) поставил эксперимент, чтобы понять действительную структуру атома. В этом эксперименте тяжелые положительно заряженные α -частицы, движущиеся со скоростью 20 км/с, проходили через тонкую золотую фольгу и рассеивались на атомах золота, отклоняясь от первоначального направления движения. Чтобы определить степень отклонения, Гейгер и Марсден должны были с помощью микроскопа наблюдать вспышки на пластине сцинтиллятора, возникавшие там, где в пластину попадала α -частица. За два года было сосчитано около миллиона вспышек и доказано, что примерно одна частица на 8000 в результате рассеяния изменяет направление движения более чем на 90° (т. е. поворачивает назад). Такое никак не могло происходить в «рыхлом» атоме Томсона. Результаты однозначно свидетельствовали в пользу так называемой планетарной модели атома – массивное крохотное ядро размером примерно 10^{-13} см и электроны, вращающиеся вокруг этого ядра на расстоянии около 10^{-8} см.

Опыт Франка–Герца, ставший экспериментальным доказательством дискретности внутренней энергии атома, был поставлен в 1913 г. Джеймсом Франком и Густавом Герцем. Ученые показали, что спектр поглощаемой атомом энергии не непрерывен, а дискретен, минимальная порция (квант электромагнитного поля), которую может поглотить атом Hg, равна 4,9 эВ. Значение длины волны $\lambda = 253,7$ нм свечения паров Hg, возникавшего при $V > 4,9$ В, оказалось в соответствии со вторым постулатом Бора:

$$E_1 - E_0 = \frac{hc}{\lambda},$$

где E_0 и E_1 – энергии основного и возбужденного уровней энергии; в опыте Франка–Герца $E_1 - E_0 = 4,9$ эВ.

Артур Комптон, повторив в 1922–1923 гг. опыт Франка–Герца, обнаружил, что при $V > 4,9$ В пары Hg начинают испускать свет с частотой $n = DE/h$, где $DE = 4,9$ эВ (h - постоянная Планка). Таким образом, возбужденные электронным ударом атомы Hg испускают фотон с энергией 4,9 эВ и возвращаются в основное состояние.

В 1925 г. Герцу и Франку была присуждена Нобелевская премия за открытие законов соударения электрона с атомом.

1.3. Современные физические исследования. Электроника

В формирование современных экспериментов определяющий вклад внесли открытия в области электроники.

Основы современной электронной науки и техники – электроники – начали ускоренно формироваться на рубеже XIX XX вв. из накопленного к тому времени комплекса знаний и ряда новых открытий, прежде всего в физике и электротехнике [9, 14, 15]. Со времени первого экспериментального наблюдения электрона (Томсон, 1897 г.) электроника быстро и непрерывно прогрессирует, выполняя универсальную, важнейшую и все более возрастающую функцию во всех областях деятельности человека.

На протяжении своего исторического пути электроника последовательно осваивала несколько материальных платформ, из которых строится ее элементная база: вакуумную и плазменную, полупроводниковую, молекулярную.

Вакуумная и плазменная электроника

Вакуумная и плазменная электроника (ВПЭ) основана на движении электронов и ионов в вакууме, газе и плазме. Со времени изобретения первых вакуумных ламп (вакуумный диод и триод, 1904–1917 гг.) на основе ВПЭ было создано широкомасштабное поколение научной и технологической аппаратуры, например, приемно-усилительные и генераторные приборы, в том числе для телекоммуникации, радиолокаторов, технологических устройств, медицинской техники, компьютеров.

Общая схема устройств ВПЭ состоит в том, что осуществляют инжекцию заряженных частиц в вакуумный или плазменный объем и целенаправленное управление их движением в этом объеме с помощью электромагнитного поля, а управляемое смещение зарядов приводит к появлению электромагнитного поля и электрического тока в специфической системе электродов, ограничивающих данный вакуумный объем. Принцип управления движением заряженных частиц в вакуумном или плазменном объеме и использования ответной реакции зарядов

позволил создать устройства, выполняющие огромное количество разнообразных функций, представляющих собой целенаправленное преобразование энергии и информации.

Например, первой электронной вычислительной машиной (ЭВМ) является ENIAC (Electronic Numerical Integrator and Computer), который был построен в 1946 г. в США. ENIAC позволял складывать до 5000 чисел в секунду, состоял из 17 000 электронных вакуумных ламп, весил 27 т и занимал объем порядка 500 м³, потребляя 174 кВт мощности электропитания и охлаждения. В дальнейшем ЭВМ на основе электронных вакуумных приборов за короткий период совершили значительный прогресс, однако впоследствии полностью уступили полупроводниковым компьютерам.

Ограничения устройств ВПЭ, такие, как относительно большие габаритные размеры, масса и энергопотребление, инерционность включения, недостаточные механическая прочность и срок службы, наиболее контрастно проявились в 1950-е гг. при изобретении и последующем промышленном освоении транзисторов.

В современной ВПЭ активно используются приборы большой мощности, высокой энергии, надежности и радиационной стойкости, в том числе радиочастотные и сверхвысокочастотные генераторы и усилители; например, лампы бегущей и обратной волны, магнетроны, гиротроны, мазеры, лазеры на свободных электронах, ускорители заряженных частиц, исследовательские и технологические установки и устройства, а также приборы в микроэлектронном исполнении, ионные масс-спектрометры, некоторые измерительные преобразователи, плазменные переключатели, гибриды с твердотельными и т. п. Тематика ВПЭ представлена в современных образовательных программах российских и зарубежных университетов [3].

*Полупроводниковая электроника
и перспективы создания новой элементной базы*

Транзисторы вошли в число величайших изобретений XX в. Начиная с 1950-х гг. ВПЭ уступает первенство полупроводниковой электронике (ПЭ). Вторая половина века стала временем появления и практически неограниченного распространения устройств ПЭ, быстро прошедших этап развития от дискретных приборов (биполярных на основе германия, сначала точечных, затем плоскостных) к интегральным, основанным на групповых технологиях производства.

Интегральная полупроводниковая электроника на кремнии, арсениде галлия и других полупроводниках позволила создать многофункциональные микроприборы с малым энергопотреблением. Полупроводниковая электроника интегральных микросхем стала основой современной электроники, областью

концентрации основных усилий разработчиков и объемов промышленного производства [3].

Первый биполярный точечный транзистор был создан в 1947 г. (Д. Бардин, У. Шокли, У. Браттейн), плоскостной – в 1951 г. Эти приборы были созданы как отдельные самостоятельные «дискретные» устройства. Признание создания биполярного $n-p-n$ и $p-n-p$ транзистора как одного из величайших изобретений отмечено Нобелевской премией за 1956 г. Дискретный полевой транзистор создан в 1960 г., хотя его принципы были запатентованы значительно раньше. Полупроводниковые дискретные приборы основаны на использовании германия, кремния, арсенида галлия и других подобных веществ и материалов. Выпускаются современные дискретные транзисторы с выдающимися предельными параметрами, в том числе большой мощности, сверхвысоких частот, а также малошумящие на сверхчистых полупроводниках.

Производство полупроводниковых интегральных микросхем (ИС) было начато в 1961 г. ИС состоит из большого количества интегральных элементов и соединений на поверхности полупроводника. Если изготавливать каждый элемент из этого количества независимо и затем соединять последовательно каждый в схему, то надежность прибора получится низкой, а время наработки схемы на отказ будет неприемлемо малым. Принципиальный прорыв состоит в том, что ИС изготавливается в едином технологическом цикле по групповой технологии и поэтому представляет собой единый функциональный прибор. В результате достигается его требуемая надежность.

Нобелевская премия по физике в 2000 г. была присуждена Ж.И. Алферову и Г. Кремеру за разработки в полупроводниковой технике и Д. Килби за исследования в области интегральных схем.

При изготовлении ИС основные технологические процессы осуществляются послойно на поверхности полупроводника, и в рабочих условиях электромагнитное поле и движение зарядов реализуются в этой слоистой структуре. Уменьшение толщины слоев и расстояний между элементами (литографическая «толщина рисунка»), обеспечение эффективных соединений между элементами в микронном и субмикронном диапазонах размеров было и остается основной задачей разработчиков ИС. Так называемая «тирания соединений» является одним из первостепенных ограничений в технологии. Внутрисхемные соединения и изоляция элементов от взаимного влияния ограничивают скорость передачи сигналов, занимают наибольшую часть полезной площади микросхемы, оставляя только часть, иногда в пределах 10–30 %, активным компонентам.

В начальный период основными элементами ИС служили интегральные $n-p-n$ и $p-n-p$ транзисторы на кремнии. Первый микропроцессор, выпущенный в 1971 г. компанией Intel, имел ширину линии литографического рисунка 10 мкм, тактовую частоту – 108 кГц и состоял из 2300 транзисторов. Затем были

разработаны интегральные полевые металл-оксид-полупроводник транзисторы на кремнии, и с 1990-х гг. этот прибор стал основным элементом ИС, более распространенным, чем интегральные биполярные транзисторы. Большие и сверхбольшие ИС (середина 1970-х гг.), в которых объединены арифметические и логические операции, – основа современных мощных быстродействующих микропроцессоров.

Плотность интегральных элементов нарастала в период 2000– 2010 гг. приблизительно от $5 \cdot 10^6$ до 10^8 см⁻² в микропроцессорах и от $5 \cdot 10^9$ до 10^{10} см⁻² в устройствах оперативной памяти. В микропроцессоре Pentium 4 (2005 г.) было $169 \cdot 10^6$ транзисторов, он был изготовлен с использованием 90-нанометровых технологий и работал на частоте 3,73 ГГц. В настоящее время в основном используется технология с шириной линии литографического рисунка 38–32 нм.

Новейшим достижением (2011 г.) является изготовленный фирмой Intel по 22-нанометровой технологии процессор Ivy Bridge, в котором интегральные элементы представлены трехмерными транзисторами 3D Tri-Gate. Производители материнских плат уже активно готовятся к выводу этих процессоров в исполнении LGA 1155 на рынок в 2012 г. По сравнению с прототипом процессор имеет увеличенную на 37 % производительность и пониженное в два раза выделение тепла (четырёхъядерные модели требуют мощность охлаждения (TDP – Thermal Design Power) не более 77 Вт, двухъядерные – 35–55 Вт).

В качестве предельно достижимых параметров для микропроцессоров и устройств оперативной памяти предсказывают минимальный размер литографического рисунка 13 нм и плотности элементов $4 \cdot 10^{10}$ см⁻².

Одной из важных задач является снижение негативной роли дефектов элементов ИС. При уменьшении размеров вычислительных устройств повышаются требования к обеспечению бесперебойной работы независимо от дефекта отдельного элемента. Даже при редко встречающихся дефектах, например, одном дефекте на 10^9 компонентов, что является лучшим результатом при производстве самых надежных микросхем, это приведет к 10^6 дефектам в одной микросхеме, содержащей 10^{15} компонентов.

Технико-экономические факторы ПЭ формально оценивают эмпирическим «законом Мура». Гордон Мур – основатель компании Intel – первым отметил, что технологически достижимое число элементов, размещаемых в микрочипе, удается быстро увеличивать (удваивать за два года), и значение этого числа с течением времени растет почти экспоненциально. С тех пор данная зависимость служила индикатором темпов развития полупроводниковой электроники. Падение индикатора должно показать, что наступает завершающий этап развития, требуется поиск новых решений. Рассмотрим возможное развитие новой электроники.

Некоторые эксперты полагают, что закон Мура будет действовать до 2020 г., но не менее распространенным является также утверждение о том, что без новых революционных научно-технических открытий развитие полупроводниковой электроники (ПЭ) затормозится раньше. Значительную роль в торможении играют фундаментальные физические и технологические ограничения, а также экономический фактор, который состоит, в частности, в стремительном росте стоимости новых технологий производства микропроцессоров. Стоимость производства возрастает вдвое приблизительно за каждые четыре года. Новейшие разработки и промышленность потребуют экстраординарных инвестиционных вложений, которые необязательно смогут окупиться.

Для преодоления грядущего кризиса в современной ПЭ разрабатывается несколько направлений, представляющихся перспективными: трехмерная технология, фотоника, одноэлектроника, спинтроника, молекулярная электроника (молетроника) и др. [3]. Ряд направлений является выходом ПЭ в область квантовых принципов и наноразмерную технологию с сохранением применения кремния, а также с использованием и некоторых иных неорганических материалов. Большое внимание уделяется созданию наноструктур, например графитов и графенов. За открытие графенов и технологий их получения А. Гейм и К. Новоселов удостоены Нобелевской премии в 2010 г. Дальнейшие перспективы развития ПЭ связывают с созданием устройств, использующих квантовые явления, в которых счет уже идет на единицы электронов. В последнее время широко ведутся теоретические и экспериментальные исследования искусственно создаваемых низкоразмерных структур: квантовых слоев, проволок и точек. Ожидается, что специфические квантовые явления, реализуемые в этих системах, могут создать основу принципиально нового типа электронных приборов.

Переход на квантовый уровень, несомненно, является новым и важным этапом в развитии ПЭ, так как позволяет перейти на работу практически с единичными электронами и создать элементы памяти, в которых один электрон может соответствовать одному биту информации. Однако создание искусственных квантовых структур представляет собой сложнейшую технологическую задачу. В последнее время стало очевидным, что реализация таких структур сопряжена с большими технологическими сложностями даже при создании единичных элементов, и возникают пока непреодолимые трудности при создании чипов с многомиллионными элементами. Неорганические материалы, такие, как оксид олова и оксид цинка, традиционно используются как чувствительные элементы в биохимических сенсорах. Одним из недостатков датчиков на основе оксидов металлов является то, что они должны работать при высоких температурах, что ограничивает область их применения. В качестве альтернативы рассматривается возможность применения органических молекулярных материалов. Газовые

сенсоры с применением молекулярных систем (в том числе фталоцианины металлов, например меди) – хемирезисторы – работают при комнатной температуре.

Важнейшим результатом 2011 г. является создание трехмерной архитектуры и технологии кремниевых микросхем, что должно существенно повысить значение индикатора. Однако даже достигнув предельных значений быстродействия и степени интеграции в изделиях схемотехнической полупроводниковой микроэлектроники, трудно будет на их основе создать устройства, способные решать многие перспективные задачи. Уже сейчас существует целый ряд научных, управленческих и вычислительных задач, для решения которых нет подходящей высокоэффективной технической базы.

Капитальные инвестиции в нанотехнологии электроники в последние годы в мировой практике беспрецедентно велики, однако пока не дали существенных результатов, показывающих надежные перспективы ПЭ. Трехмерная технология ИС пока не реализована промышленностью.

Ориентировочно к 2016–2020 гг. или ранее, когда, по оценкам, прекратится развитие подхода «сверху вниз», используемого в литографических технологиях ПЭ, увеличится потенциал развития технологий «снизу вверх», используемых в нанoeлектронике. Технологии «снизу вверх» основаны на построении органических и неорганических структур последовательным добавлением частиц на атомном и молекулярном уровнях: атом за атомом или молекула за молекулой. Искусственное изготовление многоатомных структур требует отыскания устойчивых и функционально эффективных в электронике молекулярных конфигураций, что в целом представляет собой нерешенную задачу. Подобный синтез осуществлен в сравнительно немногочисленных искусственных молекулярных материалах, и на их основе строится молекулярная электроника. Наряду с этим эффективные специфические конфигурации, сложившиеся за время эволюции, представлены в бесчисленном разнообразии внутреннего устройства природных молекулярных структур. Анализируя конфигурацию, изучая динамику и функцию различных биомолекул как в биологической, так и в приборной среде, можно подойти к выбору биомолекул, подходящих в качестве функциональных элементов, и к проектированию устройств био- молекулярной электроники (БМЭ). Электроника, прошедшая путь от электровакуумных ламп к полупроводниковым транзисторам и микросхемам, подошла к области молекулярных и биомолекулярных знаний, материалов, принципов и технологий.

Наиболее исчерпывающий анализ проблем и перспектив развития современной мировой ПЭ представлен в документах международной комиссии: «The International Technology Roadmap for Semiconductors: 2010 Update» [25]. В документе подчеркивается, что рост производства микроэлектроники в последние 40 лет был чрезвычайно быстрым. Такой график роста будет трудно или

невозможно удержать в ближайшие годы. Актуальной становится задача выбора пути, по которому следует продолжить развитие микроэлектроники. В связи с обозначившимися пределами и поставленными актуальными задачами в современной электронике требуется вести активный поиск новых принципов, веществ и материалов, базовых элементов, конфигурации устройств, находить и исследовать новые научно-технические решения (например, такие, как параллельная архитектура процессоров, гетеропереходы и сверхрешетки, приборы на квантовых принципах и одноэлектроника, спинтроника, функциональные устройства на динамических неоднородностях) и материалы для элементной базы, например, графиты, графены, дисульфид молибдена, органические синтетические полимеры, биомолекулы и биомолекулярные комплексы.

В разделах указанного документа, посвященных появляющимся новым устройствам и материалам (Emerging Research Devices, Emerging Research Materials), с позиций развития полупроводниковой электроники поставлены актуальные задачи исследований, которые выходят за рамки «классической» кремниевой электроники и все больше приближаются к новой материальной, функциональной и методической базе, в том числе:

- поиск новых материалов, процессов и структур для замены кремния и кремниевых металл-оксид-полупроводник приборов;
- реализация методов диагностики процессов самоорганизации молекулярных систем, исследование геометрических, конформационных и пограничных неоднородностей, квантового транспорта, включая перенос электронов и дырок, плазмонов, спинов, анализ химического состояния и связей в молекулярных структурах, особенно в самоорганизованных;
- получение знаний о связях структуры и свойств новых материалов, о процессах самоорганизации, особенно для органических материалов;
- исследование электрических контактов элементов полупроводниковых структур с встроенными молекулами.

Поставленные таким образом задачи показывают настоятельную необходимость поиска новой материальной, функциональной и методической базы, которой, по современным представлениям, может стать молекулярная платформа.

В своем научно-техническом базисе молекулярная электроника наследует многие основные законы и идеологию предыдущих платформ, пытаясь преодолеть присущие им ограничения и пределы применимости. Появляется принципиально новое направление на основе биомолекул – биомолекулярная электроника. Используются биомолекулярные объекты и их принципы. Показано, что биомолекулы могут эффективно выступать в роли проводников электрического тока, молекулярных переключателей, нанотранзисторов, нанодиодов, логических элементов, нанобиочипов, нанодвигателей, преобразователей энергии,

биосенсоров и т. д. Имеются лабораторные и опытно-промышленные образцы устройств на базе принципов и технологий БМЭ, а также некоторые коммерческие приборы.

Основу БМЭ составляют два методических подхода: реализация функциональных элементов в виде единичных биомолекул и их комплексов, природных или синтетических; проектирование устройств с использованием принципов функционирования биомолекул в природных биологических системах.

Направление БМЭ по ряду признаков выделяется как важнейшее в области новой, появляющейся (emerging) электронной науки и техники, однако является принципиально более сложным, чем предыдущие направления электроники. Важнейшей основой парадигмы БМЭ является не альтернатива высокоразвитой современной электронике, а ее логическое продолжение, интеграция в общую научно-техническую базу и совместное продвижение на новой основе.

Квантовая электроника и физика

В 1960 г. были продемонстрированы первые оптические квантовые генераторы – лазеры (аббревиатура от начальных букв английских слов Light Amplification by Stimulated Emission Radiation – «усиление света в результате стимулирования излучением»), В настоящее время полупроводниковые лазеры и светодиоды можно считать одним из самых распространенных видов используемых технических средств. Из более поздних открытий можно назвать два, удостоенных Нобелевской премии по физике: 1) гигантское магнитное сопротивление – резкое уменьшение электрического сопротивления в некоторых тонких пленках в присутствии внешнего магнитного поля (премия 2007 г.); 2) механизм спонтанного нарушения симметрии в физике элементарных частиц, т. е. появления массы у бозонов, ранее считавшихся безмассовыми наподобие фотона – светового кванта (премия 2008 г.).

В исследовании механизма внутриядерных взаимодействий физика продвинулась достаточно далеко. В 1950-х гг. в физических экспериментах обнаруживалось все больше адронов – тяжелых элементарных частиц (к адронам относятся, в частности, протоны и нейтроны, из которых состоит атомное ядро). Для лучшего понимания общих закономерностей адроны были объединены в группы по сходным свойствам. Около 1963 г. М. Гелл-Манн и Дж. Цвейг независимо друг от друга высказали предположение о том, что структуру этих групп можно объяснить существованием внутри адронов более элементарных частиц. Гелл-Манн назвал эти субчастицы кварками. Согласно упоминавшейся ранее стандартной модели, все многообразие адронов строится из шести типов кварков, каждый из которых имеет электромагнитный заряд, кратный $1/3$ заряда электрона, и обладает определенным свойством, получившим название «аромат»; для каждого типа кварка существует свой аромат – b, d, s, c, t, u.

В первоначальной кварковой модели имелись противоречия, и чтобы их устранить, в 1965 г. была предложена еще одна квантовая характеристика, позже названная цветом. Кварк каждого аромата может находиться в трех цветовых состояниях. Адроны по кварковому составу делятся на две основные группы: 1) мезоны, состоящие из четного числа кварков и антикварков; 2) барионы, состоящие из трех кварков трех цветов, образующих бесцветную комбинацию. Процессы, связанные с «цветностью», рассматривает возникшая в 1970-х гг. теория, по аналогии с квантовой электродинамикой названная квантовой хромодинамикой.

Взаимодействие кварков получило название сильного. Еще в 1965 г. было высказано предположение, что осуществляется оно путем обмена глюонами (*от англ. glue – клей*) – квантами, аналогичными кванту электромагнитного заряда (фотону). Глюоны представляют собой комбинацию цвет–антицвет, не являющуюся инвариантной относительно вращений в «цветовом пространстве»; таких комбинаций (иными словами, типов глюонов) оказалось восемь. Например, «синий» кварк, испустив «синий-антизеленый» глюон, превращается в «зеленый» кварк.

Как и фотон, глюон не имеет массы и обладает спином (собственным моментом импульса), равным единице. Однако в отличие от электрически нейтральных фотонов глюоны сами несут цветовой заряд; они не только являются переносчиками сильных взаимодействий, но и участвуют в них.

Кварки существуют лишь в составе адронов и не встречаются в свободном состоянии, поэтому их долгое время рассматривали как математические конструкции, а не реальные частицы. Однако эксперименты показали, что в области больших энергий пучок электронов рассеивается на каких-то элементах внутренней структуры нуклонов (протонов и нейтронов). Эти результаты были окончательно проверены в 1969 г. в Стэмфордском центре линейного ускорителя SLAC (Stanford Linear Accelerator Center) в США. Дальнейшие исследования показали, что обнаруженные внутренние элементы нуклонов следует отождествить с кварками и глюонами.

Теория конфайнмента (*англ. confinement – удержание*) объясняет отсутствие свободных кварков наличием так называемого антиэкранирования: глюоны, удерживающие кварки в адроне, в процессе движения порождают новые глюоны из вакуума, в результате чем дальше кварки друг от друга, тем сильнее они друг к другу притягиваются. Этот аспект теории подтвержден расчетами, но математически не доказан. Поиск такого доказательства – одна из семи «задач тысячелетия», объявленных Математическим институтом Клэя в Кембридже (штат Массачусетс, США). Первое прямое экспериментальное доказательство существования глюонов получено в 1979 г. В экспериментах на электронно-позитронном коллайдере PETRA в исследовательском центре DESY (Гамбург,

ФРГ) были зафиксированы события с тремя адронными струями, две из которых порождались кварками, а третья – глюоном.

Свободные глюоны также никогда не наблюдались. Однако в 1995 г. в Фермилабе (Национальная ускорительная лаборатория им. Энрико Ферми в Батавии, штат Иллинойс, США) на коллайдере «Теватрон» было статистически обнаружено одиночное рождение \bar{c} -кварка (его время жизни слишком мало, чтобы образовывать связанные состояния). Существуют некоторые указания на существование так называемых экзотических адронов, имеющих число валентных кварков больше трех [9].

Из недавних проектов, оказавших сильное влияние на представления современной физики, следует отметить создание Большого адронного коллайдера (Large Hadron Collider – LHC) в Европейском центре ядерных исследований (Centre Europeen de Recherche Nucleaire), являющегося ускорителем, предназначенным для ускорения протонов и тяжелых ионов. Идея проекта LHC родилась в 1984 г. и была официально одобрена десятью годами позже. Строительство LHC началось в 2001 г. На LHC сталкивают протоны с суммарной энергией 14 ТэВ ($14 \cdot 10^{12}$ эВ) в системе центра масс налетающих частиц, а также ядра свинца с энергией 5,5 ТэВ на каждую пару сталкивающихся нуклонов.

Большой адронный коллайдер построен в туннеле, который прежде занимал Большой электрон-позитронный коллайдер (Large Electron-Positron Collider - LEP). Туннель с периметром 26,7 км проложен на глубине около 100 м на территории Франции и Швейцарии. Для удержания и коррекции протонных пучков используются 1624 сверхпроводящих магнита, общая длина которых превышает 22 км. Энергия сталкивающихся пучков во время Commission Run будет в два раза ниже, чем энергия в системе центра масс на коллайдере Tevatron. Величайшим открытием проекта LHC стало открытие бозона Хиггса – частицы, благодаря которой остальные элементарные частицы обретают массу. За теоретическое предсказание этой частицы присуждена Нобелевская премия по физике 2013 г. британскому ученому Питеру Хиггсу и бельгийцу Франсуа Энглеру.

Условия космического полета на околоземной орбите представляют в настоящее время экспериментальную среду, освоение которой ведет к появлению новых технологий.

Условия постоянной невесомости, достигаемые на борту космических станций, открыли новые возможности для производства материалов с уникальными свойствами. Так, например, можно получать сплавы металлов с равномерным распределением упрочняющей фазы по объему образца; стекла с заданным распределением показателя преломления (так называемые граданы); пеноматериалы с увеличенными и примерно одинаковыми по объему размерами ячеек (по сравнению с наземными аналогами материалы будут обладать меньшим удельным весом при улучшенной однородности строения и почти одинаковых

прочностных характеристиках); кристаллы белков увеличенных размеров (что облегчает исследование их строения и свойств); сверхбольшие кристаллы фуллеренов (это важно для упрощения методик изучения свойств фуллеренов); обладающие хорошими электрофизическими свойствами объемные монокристаллы полупроводников с равномерным распределением по объему примесей.

К настоящему времени получены многие практически важные результаты:

- отработана технология получения монокристаллов твердого раствора германий–кремний в виде игл с улучшенными свойствами, которые пригодны для изготовления микродатчиков физических величин;
- получены легированные монокристаллы германия и антимонида галлия, микро-неоднородность которых существенно ниже, чем у земных аналогов; полученные образцы использованы для изготовления элементов электронных приборов;
- из эпитаксиального кремния получены образцы применяемых в сверхбыстрых интегральных схемах транзисторов «компенсационный металл-оксид–полупроводник», производство которых в наземных условиях пока имеет очень высокий процент брака;
- получены монокристаллы (до 50 мм) окиси цинка, использованные для разработки опытного образца ультрафиолетового лазера, который может найти применение как в процессе так называемой субмикронной литографии при производстве изделий микроэлектроники, так и при регистрации быстро протекающих процессов в системах диагностики;
- из образцов теллурида кадмия разработан опытный образец детектора ионизирующего излучения, не требующий охлаждения; выращивание теллурида кадмия в космосе может изменить структуру существующего рынка сбыта таких детекторов;
- разработаны рекомендации по улучшению земной технологии производства монокристаллов арсенида галлия GaAs; выращены в космических условиях монокристаллы арсенида галлия с электрофизическими свойствами и структурными параметрами, трудно достижимыми в земных условиях; этот материал необходим для сверхскоростных и радиационно-стойких интегральных схем; технология приборов на базе арсенида галлия нужна для приборов, работающих в космосе, а также для использования в атомной энергетике и для исследований в области физики высоких энергий;
- разработана технология эпитаксиального роста монокристаллических слоев кремния на диэлектрической подложке с параметрами на порядок лучше, чем у земных аналогов; материал необходим для многоуровневых интегральных схем;
- получены на порядок больше по диаметру, чем на Земле, граданы – стекла с практически параболическим профилем распределения показателя преломления по радиусу; использование этого материала

позволит увеличить в несколько раз эксплуатационные показатели оптических систем.

В настоящее время в оптике, оптоэлектронике, квантовой электронике, фотонике и смежных с ними областях все более широкое применение находят диэлектрические монокристаллы, а также кристаллы с особыми электрическими, оптическими и магнитными свойствами:

- исследование влияния факторов космического полета на биологические объекты (морфологию, физиологию, генетические свойства, скорость роста, гибель микроорганизмов и клеток эукариотов в ходе культивирования);
- получение биологических объектов с новыми свойствами, селекция микроорганизмов, в том числе рекомбинантных штаммов- продуцентов биологически активных веществ (БАВ), с использованием воздействия факторов космического полета на штаммы микроорганизмов, растительных и эукариотических клеток, и получение гибридов, продуцирующих моно клональные антитела и биологически активные вещества для нужд медицинской, микробиологической, пищевой промышленности и сельского хозяйства;
- проведение исследований в области биотехнологических и других физико-химических процессов в условиях микро гравитации;
- разработка научных основ космического и наземного биотехнологического производства и их оптимального взаимодействия;
- поиск и экспериментальная отработка базовых технологий получения перспективных биопродуктов в условиях микро гравитации;
- наработка в требуемых количествах ценных особо чистых лекарственных, профилактических и диагностических препаратов, производство которых в земных условиях дорого или трудоемко;
- получение в условиях микро гравитации крупных биологических кристаллов с более совершенной внутренней структурной для рентгеноструктурного анализа и последующего создания нового поколения высокоэффективных лечебно-профилактических препаратов;
- технико-экономическое обоснование целесообразности массового производства конкретной биотехнологической продукции в космосе.

Технико-экономическая и социальная эффективность, достигаемая в работах по получению особо чистых однородных биопрепаратов и штаммов – супер продуцентов БАВ - определяется сложностью их получения в наземных условиях, а также необходимостью обеспечения потребностей медицины, промышленности, сельского хозяйства, экологии и т. п.

Проведение программы экспериментов по космической биотехнологии позволит расширить спектр исследуемых биообъектов и препаратов, разработать, изготовить и опробовать новое поколение бортовой аппаратуры и приборов.

Важнейшими особенностями современных экспериментальных исследований являются:

- высокая востребованность экспериментов для создания новейших знаний, инновационных технологий и практических устройств;
- постоянное возрастание сложности экспериментальной аппаратуры и методов исследования;
- увеличение значения компьютерного моделирования научных результатов, повышение степени доверия к ним;
- интеграция различных, ранее отдельных научных направлений в кросс-научные комплексы;
- возрастание роли биологических наук в таких комплексах, в том числе физических, химических, электронных.

Вопросы для самопроверки

1. Что такое наблюдение и научное наблюдение как метод познания? Приведите краткое описание.
2. Что такое научный эксперимент как метод познания? Приведите краткое описание.
3. В чем состоят сходство и различия наблюдения, научного наблюдения, эксперимента?
4. Как соотносятся между собой теория и эксперимент?
5. Может ли быть доказана гипотеза?
6. Приведите примеры основополагающих экспериментов в истории науки.
7. Опишите эксперименты Ньютона по дифракции и интерференции света.
8. В чем состоит опыт Милликена?
9. Опишите опыт Франка–Герца.
10. Приведите примеры достижений в современной экспериментальной физике.

2. Классификация, принципы и определения. Экспериментальных методов исследований

2.1. Виды экспериментов

В литературе можно найти достаточно много подходов к классификации экспериментов. Из основных разновидностей экспериментов можно отметить:

- по условиям проведения – естественные и искусственные;
- по форме представления результатов – качественные и количественные;
- по целям исследования – преобразующие, модельные, экстремальные, контролирующие, констатирующие, поисковые, сравнительные, решающие и др.;
- по количеству факторов – однофакторные и многофакторные;
- по степени контролируемости факторов – активные и пассивные (регистрирующие).

Рассмотрим некоторые виды классификации экспериментов подробнее.

По условиям проведения.

Естественный эксперимент предполагает изучение объекта в реальных условиях его существования и чаще применяется в биологических науках (например, исследование люминесцентных излучений живых клеток). В физике это может быть, например, исследование излучения Вселенной, падающего на поверхность Земли, разряда молний, полярного сияния и других плазменных явлений в атмосфере. В технических науках такой эксперимент используется, например, для испытания изготовленных объектов, в этом случае его называют натурным.

Искусственный эксперимент требует для своего проведения специально создаваемой обстановки и чаще используется в физике, позволяя достичь заданных параметров (например, энергия частиц), обеспечить достаточные условия для устранения побочных факторов, эффективно использовать время и ресурсы. Такие исследования выполняются, например, на ускорителях ионов и электронов.

По форме представления результатов.

Качественный эксперимент дает общее представление о действии тех или иных факторов на исследуемый процесс и обычно используется на этапе поиска, для предварительной оценки. При проведении качественных экспериментов устанавливается факт существования каких-либо явлений, но количественные характеристики при этом не даются. Любой эксперимент заканчивается представлением результатов, формулировкой выводов, выдачей рекомендаций. Эта информация может быть представлена в виде графиков, чертежей, таблиц, формул, статистических данных или словесных описаний. Качественный

эксперимент, как правило, предусматривает именно словесное описание. Однако только словесное описание не позволяет дать количественные рекомендации, анализировать свойства объекта в иных условиях, решать задачи его управления.

Количественный эксперимент подразумевает достаточно точное измерение всех существенных факторов, подробное и точное изучение эффектов. Позволяет не только фиксировать существование того или иного явления, но и устанавливать количественные взаимосвязи между факторами, определяющими протекание процесса, а также устанавливать математическую модель влияния этих факторов на то или иное явление.

Часто качественные и количественные эксперименты являются этапами одного общего исследования.

Но целям исследования.

Преобразующий эксперимент предполагает активное изменение структуры и функций изучаемого объекта, преднамеренное создание условий, которые должны способствовать появлению его новых качеств.

Модельный эксперимент проводится с целью построения теоретической (лабораторной) модели изучаемого объекта.

Экстремальный эксперимент направлен на решение задач оптимизации. Его целью является нахождение таких сочетаний факторов, которые соответствуют оптимальным значениям целевой функции (например, выявление оптимальных режимов, оптимальных составов или конструктивных параметров).

Контролирующий эксперимент решает задачу обеспечения контроля над изучаемым объектом, управления объектом с помощью воздействующих факторов с одновременным изучением изменений его состояния в зависимости от воздействия.

Констатирующий эксперимент представляет собой процедуру проверки какого-либо исходного предположения; целью данного эксперимента является фиксация наличия или отсутствия определенных свойств, отношений, эффектов, состояний и т. п.

Поисковый эксперимент не имеет систематического характера; часто он является лишь начальной стадией в серии экспериментальных исследований. Проводится в тех ситуациях, когда недостаточно известен комплекс факторов, влияющих на изучаемый объект. Такой эксперимент носит поисковый, предварительный характер.

Сравнительный эксперимент преследует обычно весьма простую цель: произвести оценку наличия различий между двумя исследуемыми группами. Также сравнительный эксперимент может проводиться с целью оценки влияния различных факторов на процесс ранжирования их по степени влияния на интересующий показатель процесса.

Важным видом эксперимента является *решающий, или критический, эксперимент* – эксперимент, исход которого однозначно определяет, является ли конкретная теория или гипотеза непротиворечивой. Этот эксперимент должен дать предсказанный результат, который не может быть выведен из других, общепринятых гипотез и теорий. Для его проведения характерна ситуация, когда две или несколько гипотез примерно в равной степени согласуются с имеющимся эмпирическим базисом и конкурируют друг с другом, претендуя на роль ведущей. В этом случае решающим экспериментом становится такой, результаты которого однозначно свидетельствуют в пользу одной теоретической системы и опровергают альтернативную ей систему. Для этого, конечно, сам эксперимент должен быть спланирован так, чтобы основной вопрос, решаемый в ходе экспериментального исследования, был сформулирован дихотомически, т. е. чтобы он допускал только два возможных ответа: да или нет.

Примерами решающих экспериментов могут служить: знаменитый маятник Фуко, благодаря которому Ж. Б. Л. Фуко продемонстрировал вращение Земли, доказав справедливость теории Коперника и опровергнув теорию Птолемея; эксперимент И. Ньютона по интерференции света; опыт О. Ж. Френеля с открытием белого пятна в тени диска, благодаря которому была открыта дифракция света и поддержана волновая теория света в противовес корпускулярной. При этом следует заметить, что вопрос о действительной роли решающих экспериментов в развитии научного знания весьма непрост. Далекое не всегда решающий эксперимент расценивается современниками как именно решающий; часто это удается понять лишь намного позже.

По количеству факторов.

Однофакторный, или классический, эксперимент – это эксперимент с одной независимой и одной зависимой переменными. Это понятие базируется на допущении, что исследователь имеет возможность варьировать факторы в исследовательской ситуации и способен выделить изучаемую зависимость в чистом виде.

Однофакторный пассивный эксперимент проводится путем выполнения определенного количества измерений единственного входного параметра и соответствующих значений выходного параметра в дискретные моменты времени. Аналитическая зависимость между этими параметрами вследствие случайного характера возмущающих воздействий рассматривается в виде зависимости математического ожидания \hat{y} от значения x , носящей название регрессионной. Целью однофакторного пассивного эксперимента является построение регрессионной модели – установление зависимости $y = f(x)$. Доля однофакторных экспериментов в современной экспериментальной физике невелика и составляет около 2 %.

Многофакторный эксперимент – это эксперимент с несколькими независимыми и обычно одной зависимой переменными. Многофакторный пассивный эксперимент проводится при контроле значений нескольких входных параметров, и его целью является установление зависимости выходного параметра от двух или более переменных: $y = F(x_1, x_2, \dots)$. К его преимуществам относятся эффективность использования времени и средств (что может выражаться в сокращении числа опытов, необходимых для решения исследовательской задачи), а также значительная информативность эксперимента (так как получаемый результат показывает удельный вес каждого фактора в их совокупном действии).

По степени контролируемости факторов.

Активный эксперимент – это такой эксперимент, когда уровень (значение) фактора для каждого опыта задает исследователь. Он целенаправленно изменяет условия функционирования процесса и наблюдает результаты. Такой эксперимент можно планировать.

Активный эксперимент предполагает возможность существенного управления независимыми переменными в соответствии с планом, отвечающим определенным требованиям. К активному планируемому эксперименту относят исследования, которые состоят из нескольких этапов, связанных между собой таким образом, что результаты обработки эксперимента, выполненного на предыдущем этапе, используются для разработки стратегии опытов последующего этапа.

Но не всегда независимая переменная хорошо контролируема. Иногда исследователь может лишь констатировать изменение переменной, не имея возможности целенаправленно воздействовать на нее. В этом случае имеет место ситуация пассивного, или регистрирующего, эксперимента.

Пассивный эксперимент - это эксперимент, в котором исследователь регистрирует уровень факторов в каждом опыте, но не задает его значение. Здесь экспериментатор наблюдает за поведением зависимой переменной, стараясь извлечь максимум информации об изучаемых взаимосвязях. В дальнейшем он обрабатывает результаты такой регистрации и пытается их интерпретировать. По существу такой эксперимент является научным наблюдением.

Помимо перечисленных в методологии науки называют и другие виды экспериментов. Приведем несколько примеров.

Отсеивающий эксперимент позволяет отобрать основные, наиболее значимые факторы, влияющие на процесс или явление, без установления количественных соотношений между ними.

Экстраполирующий эксперимент – эксперимент, поставленный с целью предсказания явления, оценки его протекания в дальнейшем (экономическое прогнозирование, предсказание погоды, предсказание нагрузки электросистем).

Творческий эксперимент обычно предполагает своей целью открытие нового явления, объяснение неизвестного ранее эффекта.

Компьютерный (численный) эксперимент – это эксперимент над математической моделью объекта исследования на ЭВМ, который состоит в том, что по одним параметрам модели вычисляют другие ее параметры и на этой основе делают выводы о свойствах объекта, описываемого математической моделью. Данный вид эксперимента можно лишь условно отнести к эксперименту, потому как он не отражает природные явления, а лишь является численной реализацией созданной человеком математической модели. Действительно, при некорректности математической модели ее численное решение может расходиться с физическим экспериментом. Этот вид эксперимента также называют *математическим, или вычислительным, экспериментом*, так как на основе компьютерной обработки введенных данных получают результат в виде математического решения той или иной задачи. К преимуществам математического эксперимента, способствовавшим его широкому применению в современной науке, относится помимо высокой точности проводимых расчетов то, что в таком исследовании каждый участвующий фактор можно свободно варьировать без риска катастрофических последствий, который может возникнуть в натурном эксперименте. Типичные эксперименты, выполняемые с помощью суперкомпьютеров, – это моделирование глобальных явлений в атмосфере и предсказание погоды, моделирование извержений вулканов и океанических штормов, а также ядерных взрывов.

2.2. Цель, задачи и основные понятия экспериментальных исследований

Целями эксперимента обычно являются:

- получение новых эмпирических данных, подлежащих дальнейшему обобщению;
- выявление согласования или противоречия с имеющимися гипотезами или теориями.

Можно выделить две функции эксперимента:

- исследовательскую, когда эксперимент является источником теории;
- проверочную, когда эксперимент выступает как критерий истинности.

Из важнейших требований, предъявляемых к постановке эксперимента, можно отметить следующие:

- чистота, т. е. такая постановка опыта, чтобы на изучаемый процесс не накладывались посторонние связи;
- воспроизводимость – эксперимент должен быть осуществлен и описан так, чтобы он мог быть повторен другими исследователями;

– точность – эксперимент должен соответствовать поставленной задаче.

В экспериментальной физике данные о параметрах исследуемого объекта получают из измерений. Таким образом, в основе эксперимента – измерение параметров объекта при определенных на него воздействиях. Одной из задач проведения эксперимента является поиск таких параметров физических явлений, которые можно измерить, получив числовые значения. Между этими измеренными значениями можно установить определенную функциональную зависимость. Свойства физических объектов и процессов, которые можно прямо или косвенно измерить, называют *физическими величинами*. Значение физической величины представляет собой оценку размера этой величины в виде некоторого числа принятых для нее единиц. Физические законы, связывающие между собой эти величины, представляют в виде математических уравнений.

При измерении физической величины ее значение G сравнивают с единицей измерения $[G]$, Число, которое получается при измерениях, называют числовым значением $\{G\}$ физической величины. Поэтому любую физическую величину можно представить в виде выражения [8]

$$G = \{G\}[G]$$

Физическая величина – это одно из свойств физического объекта (физической системы или процесса), общее в качественном отношении для многих физических объектов, но в количественном отношении индивидуальное для каждого из них.

Единица измерения физической величины – это физическая величина фиксированного размера, которой условно присвоено значение, равное 1, и применяемая для количественного выражения однородных с ней физических величин.

Значение физической величины – это оценка размера физической величины в виде некоторого числа принятых для нее единиц.

Измерение - это получение количественных значений измеряемых физических величин в виде зависимостей параметров объекта от координат и времени в условиях воздействия. Путем измерений сопоставляются две группы факторов:

- предсказанные теорией;
- найденные в результате измерений.

Измерить непосредственно интересующие параметры объекта бывает очень сложно. Поэтому выделяют два вида измерений – прямые и косвенные,

Прямое измерение – это измерение, при котором значение измеряемой величины непосредственно считывается со шкалы прибора, проградуированного в соответствующих единицах измерения. Уравнение прямого измерения имеет вид

$$y = c \cdot x,$$

где y – значение измеряемой величины;

c – цена деления шкалы прибора в единицах измеряемой величины;

x – отсчет по индикаторному устройству в делениях шкалы.

В качестве примеров прямого измерения можно привести измерение длины предмета с помощью линейки или микрометра, измерение силы тока амперметром, измерение температуры термометром и т. д. [10].

Косвенным называется измерение, результат которого определяют на основании прямых измерений величин, связанных с измеряемой величиной известной зависимостью. Уравнение косвенного измерения имеет вид

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_n),$$

где y – искомая величина, являющаяся функцией величин x_1, x_2, \dots, x_n , измеряемых прямым методом.

Примерами таких измерений можно назвать определение объема тела по прямым измерениям его геометрических размеров, нахождение удельного электрического сопротивления проводника по его сопротивлению, длине и площади поперечного сечения.

Косвенные измерения распространены в тех случаях, когда искомую величину невозможно или слишком сложно измерить непосредственно или когда прямое измерение дает менее точный результат. Роль их особенно велика при измерении величин, недоступных непосредственному экспериментальному сравнению (например, размеров астрономического или внутриатомного порядка).

Измерения классифицируются, в частности, по точности – равноточные и неравноточные; по числу измерений – однократные и многократные; по характеру изменения измеряемой величины – статические и динамические; по метрологическому назначению – метрологические и технические; по общим приемам получения результатов – прямые, косвенные, совместные и совокупные [2].

Под *методом измерений* понимают совокупность физических явлений, устанавливающих связи между параметрами исследуемого объекта и измеряемыми величинами.

Способ измерения – совокупность операций, выполняемых при осуществлении измерений.

Измерительный прибор – средство измерений, предназначенное для получения значений измеряемой физической величины в установленном диапазоне.

2.3. Физические величины и системы единиц измерения

Размерность физической величины показывает, как связана данная величина с основными физическими величинами, поэтому нет нужды отдельно определять единицу измерения для каждой физической величины: они выражаются через произведение основных физических единиц с целыми показателями степени и численных множителей. Следует отметить, что физическая величина и ее размерность – разные понятия. Одинаковую размерность могут иметь совершенно разные по своей природе физические величины; например, работа и вращающий момент или сила электрического тока и напряженность магнитного поля. Размерность не содержит информации о том, является ли данная физическая величина скаляром, вектором или тензором. Однако размерность важна для проверки правильности соотношений между физическими величинами.

Многие физические величины связаны между собой математическими уравнениями, но можно выделить несколько независимых величин, которые не сводятся одна к другой. Их называют *основными физическими величинами*.

В 1960 г. было заключено международное соглашение о выборе основных физических величин. Эти величины, а также производные физические величины составляют основу Международной системы единиц СИ (Systeme International d'Unites),

Международная система единиц – система единиц, основанная на Международной системе величин, вместе с наименованиями и обозначениями, а также набором приставок и их наименованиями и обозначениями вместе с правилами их применения, принятая XI Генеральной конференцией по мерам и весам в 1960 г. [22], последующие конференции внесли в СИ ряд изменений.

СИ определяет семь основных и производные единицы физических величин, а также набор приставок. Установлены стандартные сокращенные обозначения для единиц и правила записи производных единиц.

Основными единицами физических величин являются: *килограмм, метр, секунда, ампер, кельвин, моль и кандела*. В рамках СИ считается, что эти единицы имеют независимую размерность, т. е. ни одна из основных единиц не может быть получена из других.

Производные единицы определяются из основных через алгебраические действия, такие, как произведение и деление основных величин. Наиболее важные из них имеют собственные названия и краткие обозначения (например, радиан).

Приставки можно использовать перед названиями единиц; они означают, что единицу нужно умножить или разделить на определенное целое число, являющееся степенью числа 10. Например, приставка «кило» означает умножение на 1000 (1 километр = 1000 метров). Приставки СИ называют также десятичными приставками, с их помощью обозначают кратные (единицы, которые в целое

число раз превышают основную единицу измерения некоторой физической величины) и дольные (составляют определенную долю от установленной единицы измерения величины) единицы. Для кратных единиц используют такие приставки: гекто-, кило-, тера-; для дольных – фемто-, нано-, деци- и пр.

В России действует ГОСТ 8.417–2002, предписывающий обязательное использование единиц СИ. В документе перечислены единицы физических величин, разрешенные к применению, приведены их международные и русские обозначения и установлены правила их использования [5]. По этим правилам при договорноправовых отношениях сотрудничества с зарубежными странами разрешается применять только международные обозначения единиц. Применение международных обозначений обязательно также на шкалах и табличках измерительных приборов. При этом во внутренних документах и публикациях можно использовать как международные, так и русские обозначения.

В табл. 2.1 приведены основные физические величины и их единицы измерения по российским и международным стандартам.

Определения основных физических величин с момента их введения претерпевали ряд изменений, связанных с повышением точности их измерения. По мере совершенствования методов измерений повышались требования к точности определения значений величин, при этом предлагались новые способы их измерения, позволяющие связать величины с фундаментальными постоянными, измеряемыми с высокой степенью точности и воспроизводимости.

Таблица 2.1

Основные единицы физических величин в СИ

Физическая величина	Символьное обозначение	Единица измерения		Обозначение	
		Русское название	Международное название	Русское	Международное
Длина	l	метр	<i>meter</i>	м	m
Масса	m	килограмм	<i>kilogram</i>	кг	kg
Время	t	секунда	<i>second</i>	с	s
Сила тока	I	ампер	<i>ampere</i>	А	A
Термодинамическая температура	T	кельвин	<i>kelvin</i>	К	K
Сила света	I ₀	кандела	<i>candela</i>	кд	cd
Количество вещества	n	моль	<i>mole</i>	моль	mol

Так, в 1791 г. метр определялся через длину окружности земного шара - как одна сорокамиллионная часть Парижского меридиана (что составляет одну десятиmillionную часть расстояния от Северного полюса до экватора по поверхности земного эллипсоида на долготе Парижа). По результатам измерений в 1795 г. был изготовлен первый прототип эталона метра из латуни. В 1889 г. был изготовлен более точный международный эталон метра из сплава платины (90 %) и иридия (10 %) с крестообразным поперечным сечением. Затем было принято решение отказаться от использования изготовленного людьми предмета в качестве эталона метра. Метр стали определять через длину волны излучения: с 1927 г. - через длину волны красной линии кадмия, с 1960 г. - как 650763,73 длины волны оранжевой линии (6056 А) спектра, излучаемого изотопом криптона ^{86}Kr в вакууме.

Современное определение метра с 1983 г. звучит так:

Метр – это длина пути, проходимого светом в вакууме за $1/299\,792\,458$ секунды.

Скорость света в вакууме составляет $c = 299\,792\,458$ м/с. Эта величина выбрана для определения метра, так как является одной из фундаментальных постоянных природы. Измерить эталонную длину можно, определив время, за которое свет проходит этот отрезок.

Особое место среди основных физических величин занимает масса, поскольку ее определяют путем сравнения с эталоном, так как до сих пор не удается достаточно точно выразить эталонную массу через фундаментальные постоянные.

Единицей массы служит килограмм. Действующее определение килограмма принято III Генеральной конференцией по мерам и весам в 1901 г. и формулируется так:

Килограмм есть единица массы, равная массе международного прототипа килограмма.

Международный прототип (эталон) килограмма хранится под тремя герметичными стеклянными колпаками в Международном бюро мер и весов (расположено в г. Севр, Франция) и представляет собой цилиндр диаметром и высотой 39,17 мм из платино-иридиевого сплава (90 % платины, 10 % иридия). Также было изготовлено более 80 точных официальных копий международного эталона, которые используются как национальные эталоны килограмма. Две копии международного эталона хранятся в России, во ВНИИ метрологии им. Менделеева.

Единица времени – **секунда** - в настоящее время определяется следующим образом:

Секунда есть время, равное 9192 631 770 периодам излучения, соответствующего переходу между двумя сверхтонкими уровнями основного состояния атома цезия ^{133}Cs в покое при 0 К в отсутствие возмущения внешними полями.

Это определение было принято в 1967 г., а уточнение относительно температуры и состояния покоя появилось в 1997 г. Эталон секунды реализуется с помощью цезиевого излучения.

Взаимосвязь между электродинамикой и механикой позволила в 1948 г. заново определить единицу силы тока:

Ампер есть сила неизменяющегося тока, который при прохождении по двум параллельным прямолинейным проводникам бесконечной длины и ничтожно малой площади кругового поперечного сечения, расположенным в вакууме на расстоянии 1 метр один от другого, вызвал бы на каждом участке проводника длиной 1 метр силу взаимодействия, равную $2 \cdot 10^{-7}$ ньютона (рис. 2.1).

Из данного определения следует числовое значение другой фундаментальной постоянной физики - магнитной постоянной:

$$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Н/А}^2.$$

Это соотношение эквивалентно приведенному определению ампера. Поскольку скорость света

$$c = 1/\sqrt{\epsilon_0\mu_0},$$

можно точно определить диэлектрическую постоянную ϵ_0 , которую уже не нужно измерять экспериментально [8].

Основной термодинамической величиной является термодинамическая температура. Она измеряется в кельвинах. Поскольку для температуры существует значение абсолютного нуля, то для определения этой величины необходимо зафиксировать еще одну точку, в качестве которой выбрана тройная точка воды: в термостате можно обеспечить равновесие жидкой фазы, твердой (водный лед) и водяного пара при атмосферном давлении.

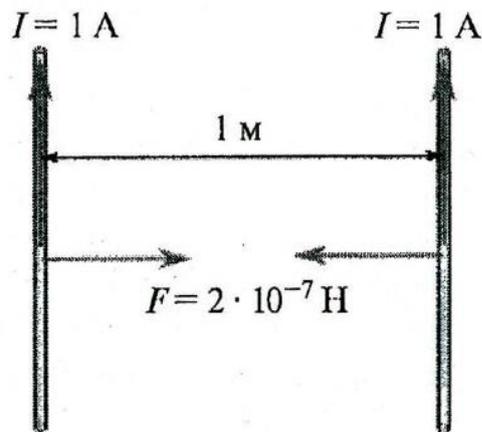


Рис. 2.1. К понятию «ампер»

Кельвин, единица термодинамической температуры, равен $1/273,16$ части термодинамической температуры тройной точки воды.

Начало шкалы (0 К) совпадает с абсолютным нулем. Практическое измерение температуры проводят с помощью Международной практической температурной шкалы (IPTS – 68/75), которая основана на целом ряде хорошо воспроизводимых фиксированных температурных точек [В].

Количество вещества было введено в Международную систему единиц в качестве основной величины в 1971 г. В результате появилась возможность описывать количественные соотношения в химии и физической химии с помощью единиц СИ. Единица количества вещества определяется следующим образом:

Моль представляет собой количество вещества в системе, содержащей столько же частиц, сколько атомов содержится в 0,012 килограмма изотопа углерода ^{12}C . При применении моля структурные элементы должны быть специфицированы и могут быть атомами, молекулами, ионами, электронами и другими частицами или специфицированными группами частиц.

При использовании моля следует точно определить тип отдельной частицы.

Число частиц, содержащихся в одном моле вещества, называют числом Авогадро N_A .

Электромагнитное излучение описывается с помощью так называемых энергетических фотометрических величин, которые выражаются через первые три основные единицы. Если же нужно описать излучение через его воздействие на человеческий глаз, то для этого используют соответствующие редуцированные фотометрические (светотехнические) величины. Основной величиной при этом служит сила света, которая измеряется в канделах. В международном соглашении определена спектральная чувствительность человеческого глаза. Кривая спектральной чувствительности позволяет связать друг с другом энергетические фотометрические величины и светотехнические величины: мощность излучения и световой поток связаны между собой через так называемый

фотометрический эквивалент излучения. В 1967 г. принято определение канделы, которое было основано на излучении света абсолютно черным телом при температуре затвердевания платины. К сожалению, это определение было не очень удобным, поскольку температура затвердевания платины несколько раз уточнялась, после чего всегда приходилось изменять фотометрический эквивалент излучения. Поэтому в 1979 г. было принято новое определение канделы:

Кандела – сила света источника, монохроматическое излучение которого частотой $540 \cdot 10^{12}$ герц, излучаемое в определенном направлении в телесный угол величиной 1 стерадиан, имеет мощность 1/683 ватта.

Интересно, что частота $540 \cdot 10^{12}$ Гц соответствует длине волны 555 нм, при которой человеческий глаз обладает максимальной чувствительностью.

Помимо основных единиц СИ существуют производные единицы СИ, которые могут быть выражены через основные с помощью математических операций умножения и деления. Некоторым из производных единиц для удобства использования присвоены собственные названия, такие единицы тоже можно использовать в математических выражениях для образования других производных единиц. Например, единица измерения «секунда в минус первой степени» (1/с) называется герцем (Гц), когда она используется для частоты. В то же время она называется беккерелем (Бк), если ее используют для активности радионуклидов.

Основные производные единицы СИ, имеющие собственные наименования, представлены в табл. 2.2.

Математическое выражение для производной единицы измерения следует из физического закона, с помощью которого эта единица измерения определяется, или определения физической величины, для которой она вводится. Например, скорость – это расстояние, которое тело проходит в единицу времени; соответственно, единица измерения скорости – м/с (метр в секунду).

Часто одна и та же единица может быть записана по-разному, с помощью разного набора основных и производных единиц. Однако на практике используются установленные (или просто общепринятые) выражения, которые наилучшим образом отражают физический смысл величины. Например, для записи значения момента силы следует использовать Н·м, а не м·Н или Дж.

Обозначения производных единиц, не имеющих специальных наименований, должны содержать минимальное число обозначений единиц СИ со специальными наименованиями и основных единиц с возможно более низкими показателями степени. Примером правильного обозначения являются: А/кг, Ом·м (неправильно: Кл·Дж·г·с), В·м/А).

Таблица 2.2

Производные единицы физических величин в СИ с собственными названиями

	Единица измерения		Обозначение		Выражение
	Русское название	Международное название	Русское	Международное	
Плоский угол	радиан	radian	рад	rad	$\text{м} \cdot \text{м}^{-1} = 1$
Телесный угол	стерадиан	steradian	ср	sr	$\text{м}^2 \cdot \text{м}^{-2} = 1$
Температура по шкале Цельсия	градус Цельсия	degree Celsius	°C	°C	К
Частота	герц	hertz	Гц	Hz	с^{-1}
Сила	ньютон	newton	Н	N	$\text{кг} \cdot \text{м} / \text{с}^2$
Энергия	джоуль	joule	Дж	J	$\text{Н} \cdot \text{м} = \text{кг} \cdot \text{м}^2 / \text{с}^2$
Мощность	ватт	watt	Вт	W	$\text{Дж} / \text{с} = \text{кг} \cdot \text{м}^2 / \text{с}^3$
Давление	паскаль	pascal	Па	Pa	$\text{Н} / \text{м}^2 = \text{кг} \cdot \text{м}^{-1} \cdot \text{с}^{-2}$
Световой поток	люмен	lumen	лм	lm	
Освещенность	люкс	lux	лк	lx	$\text{лм} / \text{м}^2$
Электрический заряд	кулон	coulomb	Кл	C	
Разность потенциалов	вольт	volt	В	V	
Сопротивление	ом	ohm	Ом	Ω	
Емкость	фарад	farad	Ф	F	
Магнитный поток	вебер	weber	Вб	Wb	
Магнитная индукция	тесла	tesla	Тл	T	
Индуктивность	генри	henry	Гн	H	
Электрическая проводимость	сименс	siemens	См	S	
Радиоактивность	беккерель	becquerel	Бк	Bq	
Поглощенная доза ионизирующего излучения	грэй	gray	Гр	Gy	
Эффективная доза ионизирующего излучения	зиверт	sievert	Зв	Sv	
Активность катализатора	катал	katal	кат	kat	

Некоторые единицы, не входящие в СИ, по решению Генеральной конференции по мерам и весам «допускаются для использования совместно с СИ». Перечень таких единиц измерения физических величин представлен в табл. 2.3.

Единицы измерения физических величин,
допускаемые к использованию совместно с СИ

Единица измерения	Международное название	Обозначение		Величина в единицах СИ
		Русское	Международное	
минута	minute	мин	min	60 с
час	hour	ч	h	60 мин = 3600 с
сутки	day	сут	d	24 ч = 86 400 с
градус	degree	°	°	л/180 рад
угловая минута	minute	'	'	$(1/60)^\circ = \text{л}/10\,800$
угловая секунда	second	"	"	$(1/60)' = \text{я}/648\,000$
литр	litre (liter)	л	l	1 дм ³
тонна	tonne	т	t	1000 кг
непер	neper	Нп	Np	Безразмерна
бел	bel	Б	B	Безразмерна
электрон-вольт	electronvolt	эВ	eV	$1,60217733 \cdot 10^{-19}$ Дж
атомная единица массы	unified atomic mass unit	а.е.м.	u	$-1,6605402 \cdot 10^{-27}$ кг
астрономическая единица	astronomical unit	а.е.	ua	$=1,4959787 \cdot 10^{11}$ м
морская миля	nautical mile	миля		1852 м
узел	knot	уз		1 морская миля в час = 1852/3600 м/с
ар	are	а	a	100 м ²
гектар	hectare	га	ha	10 ⁴ м ²
бар	bar	бар	bar	10 ⁵ Па
ангстрем	Angstrom	А	А	10 ⁻¹⁰ м
барн	barn	б	b	10 ⁻²⁸ м ²

Кроме того, ГОСТ 8.417-2002 разрешает применение следующих единиц: град, световой год, парсек, диоптрия, киловатт-час вольт-ампер, вар, ампер-час, карат, текс, гал, оборот в секунду, оборот в минуту. Разрешается применять единицы относительных и логарифмических величин, такие, как процент, промилле, миллионная доля фон, октава, декада. Допускается также применять единицы времени, получившие широкое распространение: например, неделя, месяц, год, век, тысячелетие. Другие единицы применять не разрешается, 1 ем не менее в различных областях науки и техники иногда используются и другие единицы:

– единицы СГС: эрг, гаусс, эрстед и др.;

-
- внесистемные единицы, широко распространенные до принятия СИ: кюри, калория, ферми, микрон и др.

Некоторые страны не приняли СИ или приняли ее лишь частично и продолжают использовать английскую систему мер или сходные единицы,

Следует отметить, что несмотря на широкое распространение И, во многих научных работах по электродинамике используется *гауссова система единиц*, которая, по мнению многих ученых, лучше описывает суть электродинамических величин. СГС и СИ эквивалентны во многих разделах физики, но если обратиться к электродинамике, то в СИ возникают такие, не имеющие непосредственного физического смысла величины, как электрическая постоянная и магнитная постоянная. Кроме того, в СИ электрическое поле, электрическая индукция, магнитное поле и магнитная индукция имеют разную размерность.

СГС (сантимет-грамм-секунда) - система единиц измерения которая широко использовалась до принятия Международной системы единиц (СИ). Другим ее названием является «абсолютная физическая система единиц».

В рамках СГС существуют три независимые размерности (длина, масса и время), все остальные сводятся к ним путем умножения деления и возведения в степень (возможно, дробную). Кроме трех основных единиц измерения - сантиметра, грамма и секунды СГС существует ряд дополнительных единиц измерения, которые являются производными от основных. Некоторые физические константы получаются безразмерными. Есть несколько вариантов СГС, отличающихся выбором электрических и магнитных единиц измерения и констант в различных законах электромагнетизма (СГЭС, СГСМ, Гауссова система единиц).

ГОСТ 8.417-2002 регламентирует также использование десятичных приставок для образования дольных и кратных единиц СИ и части внесистемных единиц. Приставку или ее обозначение следует писать слитно с наименованием единицы или соответственно с обозначением последней. Если единица образована как произведение или отношение единиц, приставку или ее обозначение присоединяют к наименованию или обозначению первой единицы входящей в произведение или в отношение.

Дольные единицы составляют определенную долю (часть) от установленной единицы измерения некоторой величины

Кратные единицы - единицы, которые в целое число раз (10 в какой-либо степени) превышают основную единицу измерения некоторой физической величины.

Дольные приставки соответствуют множителям при числовых значениях величины 10^{-p} а *кратные* - 10^p , где p – число из ряда 1, 2, 3, 6, 9, 12, 15, 18, 21, 24.

Международная система единиц (СИ) рекомендует следующие десятичные приставки для обозначений кратных и дольных единиц, наименования и обозначения которых приведены в табл. 2.4 и 2.5.

Таблица 2.4

Множители и приставки, используемые для образования наименований и обозначений десятичных кратных единиц СИ

Десятичный множитель	Приставка		Обозначение	
	Русская	Международная	Русское	Международное
10^1	дека	dcca	да	da
10^2	гекто	hecto	г	h
10^3	кило	kilo	к	k
10^6	мега	Mega	М	M
10^9	гига	Giga	Г	G
10^{12}	тера	Tera	Т	T
10^{15}	пета	Peta	п	P
10^{18}	экса	Exa	э	E
10^{21}	зетта	Zetta	З	Z
10^{24}	иотта	Yotta	и	Y

Таблица 2.5

Множители и приставки, используемые для образования наименований и обозначений десятичных дольных единиц СИ

Десятичный множитель	11 приставка		Обозначение	
	Русская	Международная	Русское	Международное
10^{-1}	деци	deci	д	d
10^{-2}	санتي	centi	с	c
10^{-3}	МИЛЛ И	milli	м	m
10^{-6}	микро	micro	мк	Ц
10^{-9}	нано	nano	н	п
10^{-12}	пико	pico	п	P
10^{-15}	фемто	femto	ф	f
10^{-18}	атто	atto	а	a
10^{-21}	зепто	zepto	З	Z
10^{-24}	иокто	yocto	и	У

Следует отметить, что неоднозначным вопросом является применение десятичных приставок к единицам измерения в двоичном исчислении.

В Положении о единицах величин, допускаемых к применению в Российской Федерации [12], установлено, что наименование и обозначение единицы количества информации «байт» (1 байт = 8 бит) применяются с двоичными приставками «кило», «Мега», «Гига», которые соответствуют множителям 2^{10} , 2^{20} и 2^{30} {1 Кбайт = 1024 байт, 1 Мбайт = 1024 Кбайт, 1 Гбайт = 1024 Мбайт}.

В программировании и индустрии, связанной с компьютерами, те же приставки «кило», «мега», «гига», «тера» и другие при применении к величинам, кратным степеням двойки (например, байт), могут означать кратность как 1000, так и $1024 = 2^{10}$. Например, применительно к объему оперативной памяти используется кратность 1024, а применительно к полному объему дисковой памяти жестких дисков – кратность 1000:

1 килобайт = $1024^1 = 2^{10} = 1024$ байт;

1 мегабайт = $1024^2 = 2^{20} = 1\ 048\ 576$ байт;

1 гигабайт = $1024^3 = 2^{30} = 1\ 073\ 741\ 824$ байт;

1 терабайт = $1024^4 = 2^{40} = 1\ 099\ 511\ 627\ 776$ байт.

В завершение данного раздела приведем основные правила обозначения физических величин, принятые при оформлении научных публикаций.

Обозначения единиц печатают прямым шрифтом, точку как знак сокращения после обозначения не ставят.

Обозначения помещают за числовыми значениями величин через пробел, перенос на другую строку не допускается. Исключения составляют обозначения в виде знака над строкой, перед ними пробел не ставится (например: 10 м/с, 15°).

Обозначения единиц, входящие в произведение, отделяют точками на средней линии (Н·м, Па·с), не допускается использовать для этой цели символ «х». В машинописных текстах допускается точку не поднимать или разделять обозначения пробелами, если это не может вызвать недоразумения.

В качестве знака деления в обозначениях используют горизонтальную или косую черту (только одну). При применении косой черты, если в знаменателе стоит произведение единиц, его заключают в скобки. Правильно: Вт/(м·К), неправильно: Вт/м/К, Вт/м·К.

Допускается применять обозначения единиц в виде произведения обозначений единиц, возведенных в степени (положительные и отрицательные): Вт·м²·К⁻¹, А·м². При использовании отрицательных степеней не разрешается использовать горизонтальную или косую черту (знак деления).

Допускается применять сочетания специальных знаков с буквенными обозначениями, например: °/с (градус в секунду).

Не допускается комбинировать обозначения и полные наименования единиц. Неправильно: км/час, правильно: км/ч.

Обозначения единиц, произошедшие от фамилий, пишутся с заглавной буквы, в том числе с приставками СИ, например: ампер - А, мегапаскаль - МПа, килоньютон - кН, гигагерц - ГГц.

2.4. Основные этапы планирования и проведения эксперимента

Рассмотрим основные этапы эксперимента:

- постановка задачи;
- предварительное изучение объекта исследования;
- выбор метода и/или разработка методики исследования;
- проведение экспериментальных исследований;
- обработка полученных экспериментальных результатов;
- оформление полученных данных и формулировка выводов.

Первым шагом при проведении экспериментальных исследований является постановка физической задачи, которая формулируется на базе анализа априорной информации. Это один из наиболее важных и сложных этапов исследования. Правильная постановка задачи в значительной мере предопределяет успех всей проводимой работы.

Второй этап – анализ, выбор и правильная подготовка объекта исследования, что также является неотъемлемой частью постановки эксперимента. Стадия предварительного изучения объекта исследования важна, так как только после изучения его известных свойств и характеристик можно составить представление о работе и дальнейшем исследовании объекта.

Стандартизация процедуры подготовки образцов при проведении серии измерений оказывает существенное влияние на полученные результаты и минимизацию случайных ошибок.

Следующим ответственным этапом является выбор методов и/или разработка методики измерений. Каждая оригинальная экспериментальная работа выполнена с использованием своей методики, т. е. рационального набора средств измерений, составленных определенным образом и предназначенных для исследования конкретного объекта или явления. Экспериментатору важно выбрать и разработать методику, позволяющую изучить свойства или параметры системы, исследование которых было запланировано при постановке задачи. При этом необходимо минимизировать воздействие на измерительный процесс внешних факторов, влияние которых не изучается при решении данной задачи.

Для проведения экспериментальных исследований обычно используется *экспериментальная установка* – совокупность средств измерения, представляющая собой единую конструкцию и предназначенная для измерения определенной физической величины или изучения процесса.

Экспериментальная установка должна пройти этап апробации и тестирования (а при необходимости - и сертификации) ее наиболее ответственных узлов. Поэтому в начале работы обычно проводятся контрольные измерения.

Основные принципы обработки экспериментальных данных и оформления результатов рассмотрены в следующих разделах.

Вопросы для самопроверки

1. Каковы основные цели, задачи и этапы эксперимента?
2. Назовите основные единицы физических величин СИ и способы их определения.
3. Приведите примеры производных единиц физических величин в СИ, имеющих собственные названия.
4. В чем отличие производных единиц СИ?
5. Назовите основные отличия СГС. Приведите основные характеристики дополнительных СГС.
6. Перечислите основные правила обозначения физических величин.
7. Что такое размерность физической величины?
8. Перечислите десятичные приставки для обозначений кратных и дольных единиц.
9. В чем состоит особенность применения десятичных приставок к единицам измерения в двоичном исчислении?
10. Назовите основные этапы проведения экспериментальных исследований.

3. ОСНОВЫ АНАЛИЗА ДАННЫХ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

При проведении экспериментальных исследований одной из важных задач является краткое и грамотное описание полученных данных с оценкой статистической значимости различий и проверкой выдвинутых гипотез. Далее будут рассмотрены основные типы ошибок и базовые принципы обработки и представления результатов измерений.

3.1. Ошибки измерений

В результате измерений экспериментатор получает числовые значения нужной физической величины. При *прямых* измерениях эти значения получаются непосредственно, а при *косвенных* измерениях вначале определяют одну или несколько исходных физических величин, а затем по их значениям вычисляют нужную величину.

При многократном повторении одного и того же измерения получают числовые значения, отличающиеся друг от друга в каком-то диапазоне. Поэтому

возникает вопрос об истинном значении изучаемой физической величины, а также о точности, с которой его можно определить по имеющимся данным.

Отклонения результатов измерения x от «истинного» значения x_0 (определение «истинного» значения будет рассмотрено далее) называют ошибками измерения e :

$$e = x - x_0.$$

Ошибки измерений физических величин необходимо проанализировать, попытаться установить их причину и свести их к минимуму.

Ошибки измерений можно разделить на три основные группы:

- систематические;
- случайные (или статистические);
- грубые.

Перечисленные виды ошибок можно проиллюстрировать условной схемой, представленной на рис.3.1. Систематические ошибки приводят к смещению группы полученных значений относительно истинного. Случайные ошибки определяют разброс значений относительно «истинного» значения.

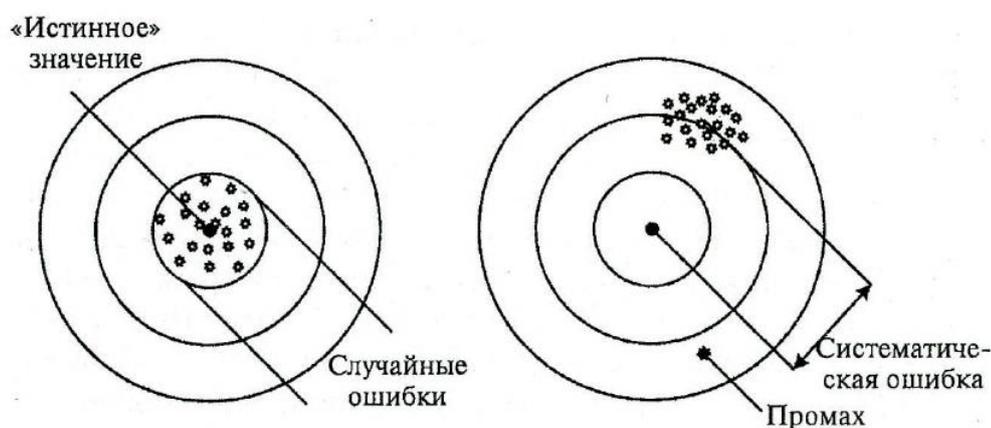


Рис. 3.1. Виды ошибок

Систематические ошибки – это ошибки, которые вызываются факторами, действующими одинаковым образом при многократном повторении одних и тех же измерений. Наглядным примером такой ошибки можно назвать измерение роста группы студентов в обуви – в таком случае полученный результат будет отличаться от истинного на толщину подошвы. Систематические ошибки имеют множество причин, и их обычно трудно обнаружить, поскольку при повторении измерений они, как правило, сохраняют свое значение. Прибор может давать очень малый разброс показаний, но результат будет неверным вследствие наличия систематической ошибки.

Типичными источниками систематических ошибок можно назвать:

-
- несовершенство используемой измерительной аппаратуры (ошибки линейности, градуировки, калибровки, дрейф нулевой точки и т. п.);
 - несовершенство используемого метода измерений;
 - плохая настройка измерительной аппаратуры;
 - недостаточная стабильность условий опыта;
 - влияние окружающей среды;
 - постоянные ошибки экспериментатора;
 - неучтенные влияния других параметров.

Наличие систематических погрешностей может быть обнаружено путем анализа условий измерения одного и того же значения измеряемой величины разными методами или приборами. Систематические погрешности нельзя уменьшить увеличением числа проводимых измерений. Должны устраняться вызывающие их причины. Общим методом выявления причин систематических погрешностей является калибровка (поверка), которая представляет собой поверку прибора во всем диапазоне измеряемой величины с помощью известного эталона. Следует отметить, что постоянное совершенствование экспериментальной техники во многих случаях позволяет избежать систематических ошибок. Например, в прошлом исследования атомных и молекулярных частиц были сильно затруднены взаимодействием этих частиц с молекулами остаточных газов, но после внедрения безмасляных мембранных и турбомолекулярных насосов проведение опытов в сверхвысоком вакууме позволило почти полностью исключить систематические ошибки такого рода.

Систематическая погрешность может оставаться постоянной или закономерно меняться при повторных измерениях одной и той же физической величины. Примером переменной систематической погрешности может быть погрешность измерения напряжения источника питания, если результат измерения зависит от напряжения. Отличительной особенностью систематических ошибок является то, что при их обнаружении они могут быть почти полностью устранены или учтены введением соответствующей поправки, однако их нахождение является сложной задачей. Источники подобных ошибок всегда стараются устранить, однако в эксперименте всегда остается вероятность неучтенной систематической ошибки.

Случайные ошибки – это неустраняемые флуктуации измеряемых величин на уровне их малых значений, они всегда присутствуют в эксперименте и являются причиной разброса результатов повторных измерений как между собой, так и относительно «истинного» значения измеряемой величины. Случайный характер таких ошибок является постулатом. Значение этой погрешности не может быть определено в каждом эксперименте, поэтому измерения повторяются определенное количество раз, а полученная совокупность данных обрабатывается с помощью методов теории вероятностей и математической статистики.

Увеличивая число измерений, можно получить достаточно точную оценку случайной ошибки. В экспериментальной физике случайным ошибкам уделяют наибольшее внимание.

К ошибкам третьего типа относят *грубые ошибки*, или *промахи*, которые возникают вследствие непредвиденного изменения условий эксперимента, низкого качества измерений, поломок прибора, ошибок экспериментатора, механических ударов прибора, неправильной регистрации показаний прибора, отключения источника питания и т. п. Результат, содержащий грубую ошибку, резко отличается от остальных измерений. Такие результаты должны быть исключены из рассмотрения до обработки результатов эксперимента.

Авторами работы [18] предложена следующая трактовка влияния разных видов ошибок:

- систематические ошибки влияют на правильность результата;
- случайные ошибки влияют на точность измерений;
- грубые ошибки дают «выпадающие» из общего диапазона значения, которые следует удалять.

Точность эксперимента, отражающая близость полученных результатов к «истинному» значению искомой величины, тем выше, чем меньше его погрешность. Следует отметить, что истинных значений экспериментально измеряемых величин не бывает. Некоторые авторы говорят о возможности применения термина «истинное значение» только к таким фундаментальным физическим постоянным, как скорость света ($c = (2,99792458 \pm 0,00000001) \cdot 10^8$ м/с), заряд электрона ($e = -1,602176565 + 0,000000004) \cdot 10^{-19}$ Кл) и другим, которые, вероятно, имеют точные значения, а приводимый разброс связан с ограничением точности измерений [6].

Истинное значение всех остальных экспериментально измеряемых величин может быть определено только как некоторое *математическое ожидание* (среднее значение случайной величины в теории вероятностей).

Истинное значение величины, определяемой в результате эксперимента, всегда остается неизвестным, поэтому и погрешности эксперимента могут быть оценены лишь приближенно.

Отклонение измеренного значения x определяемой величины от истинного ее значения называется погрешностью i -го измерения Δx_i . Полная погрешность измерений является суммой указанных составляющих и может быть представлена в абсолютном, относительном или нормированном виде.

Абсолютная погрешность – это разность между результатом эксперимента x и «истинным» значением искомой величины x_0 :

$$\Delta x = x - x_0. \quad (3.1)$$

Относительная погрешность выражается в безразмерных величинах и определяется отношением абсолютной погрешности к результату измерения:

$$\Delta x_{\text{отн}} = \frac{x - x_0}{x_0} 100 \%. \quad (3.2)$$

Приведенной погрешностью называют отношение абсолютной погрешности x к нормирующему значению $x_{\text{норм}}$, выраженному в процентах:

$$\Delta x_{\text{прив}} = \frac{x - x_0}{x_{\text{норм}}} 100 \%. \quad (3.3)$$

В качестве нормирующего значения используют некоторое постоянное условно принятое значение величины, имеющее размерность измеряемой величины. В качестве нормирующего множителя может выступать, например, верхний предел показаний прибора или абсолютное значение разности верхнего и нижнего пределов шкалы.

Понятие ошибки измерения имеет прямое отношение к таким вопросам, как цель эксперимента, его метод и значимость. Важно планировать и проводить эксперимент так, чтобы точность окончательного результата соответствовала его цели.

В качестве наглядного примера неудачной интерпретации экспериментальных данных по причине ошибочного представления погрешности эксперимента можно привести «открытие» холодного ядерного синтеза в 1989 г. [10]. Исследователи из университета г. Юта (США) Стенли Понс и Мартин Флейшман объявили, что им удалось осуществить ядерный синтез на установке, состоящей из палладиевых цилиндров, погруженных в сосуд с дейтерием. Ученые установили, что их прибор испускает нейтроны и гамма-лучи, что является свидетельством ядерной, а не химической реакции. Это заявление вызвало огромный интерес в научном мире и прессе. Говорилось о начале новой эры дешевой и неограниченной энергии для всего человечества. Однако эти утверждения оказались неверными. Наряду с другими экспериментальными погрешностями

Понс и Флейшман пренебрегли простой процедурой оценки ошибок экспериментальных данных. Зафиксированные ими результаты не превышали обычного фона излучения в университете.

3.2. Основы статистической обработки результатов измерений

После получения результатов измерений перед экспериментатором встает задача описания и представления данных эксперимента. При решении большинства задач, связанных с обработкой экспериментальных данных,

исследователю приходится обрабатывать результаты, имеющие заведомо вероятностный характер.

Систематические ошибки и промахи должны быть обнаружены и ликвидированы (либо учтены внесением поправок в данные). Оставшиеся необнаруженными систематические ошибки вносят в результаты измерений неизвестный сдвиг относительно истинного значения (чаще всего именно из-за наличия систематических ошибок измерения разных исследователей могут не совпадать). После минимизации систематических ошибок и удаления промахов точность измерений определяется случайными погрешностями. В этом случае к полученным данным применяют методы статистического анализа. Статистическое описание результатов наблюдений, построение и проверка различных математических моделей, использующих понятие вероятности, составляют основное содержание математической статистики, для более глубокого изучения которой существует множество литературных источников [4, 7, 13]. В данном разделе будут кратко рассмотрены лишь базовые принципы анализа наиболее распространенных видов экспериментальных данных.

Фундаментальными понятиями статистической теории являются понятия генеральной совокупности и выборки.

Генеральной совокупностью называют полный набор (совокупность) всех возможных значений, которые может принимать случайная величина при бесконечном числе испытаний. Смысл этого понятия заключается в том, что предполагается существование некоторых вполне определенных свойств, неслучайных закономерностей, присущих данной совокупности. Генеральная совокупность состоит из всех объектов, которые имеют качества и свойства, интересующие исследователя.

Выборка – это конечный набор значений случайной величины, получаемый в ходе наблюдений. Число элементов выборки называется ее объемом.

Выборка называется репрезентативной (представительной), если она достаточно полно характеризует генеральную совокупность. Назначение статистических методов заключается в том, чтобы по выборке ограниченного объема, т. е. по некоторой части генеральной совокупности, высказать обоснованное суждение о ее свойствах в целом. Подобное суждение может быть сформулировано путем построения эмпирических (выборочных) аналогов вероятностных характеристик исследуемой случайной величины. Целью статистической обработки набора полученных величин является как можно более точное описание характеристик генеральной совокупности по отдельной выборке.

Так, если бы перед исследователем стояла задача определить средний рост людей на Земле, то генеральной совокупностью являлся бы набор значений, соответствующих росту всех живущих на данный момент жителей планеты – от младенцев до стариков. Но так как существует возможность получить сведения

только об ограниченном числе людей, то совокупность полученных данных и будет представлять собой выборку, по которой исследователь будет пытаться найти «истинное» значение – математическое ожидание (среднее значение). Для того чтобы выборка была представительной, люди должны быть случайно выбраны из всех человеческих групп, т. е. выборка должна включать в себя представителей всех наций, различных возрастов, представителей разных сословий и культурных слоев, обоих полов и т. п. (пропорционально их доле в составе человечества). Данный пример показывает, что в ряде исследований подбор репрезентативной выборки является отдельной задачей.

Кривая распределения результатов. На практике при наиболее распространенном подходе одна и та же величина измеряется n раз, полученный набор значений величины x является выборкой. Весь диапазон полученных значений можно разделить на несколько интервалов одинаковой ширины и посчитать, сколько раз измеренная величина попадет в каждый интервал. Ширину интервалов можно выбирать произвольно, исходя из удобства расчета. Такое частотное распределение можно представить с помощью гистограммы, пример которой приведен на рис. 3.2.



Рис. 3.2, Гистограмма, отражающая распределение переменной x по заданным диапазонам значений; m – количество измерений, попавших в каждый из интервалов

Представленное распределение встречается достаточно часто. Используя это распределение, можно построить функцию распределения непрерывных величин, если устремить количество значений переменной x к бесконечности. Ступеньки гистограммы сольются, получится гладкая кривая, которая называется *кривой распределения*.

Для удобства вводят функцию $f(x)$, называемую *плотностью распределения*, смысл которой состоит в том, что произведение $f(x)dx$ дает долю полного числа отсчетов N , приходящуюся на интервал от x до $x + dx$. Иначе говоря, произведение $f(x)dx$ есть вероятность того, что отдельное случайно выбранное значение измеренной величины окажется в интервале от x до $x + dx$. Типичная кривая распределения выглядит примерно так, как на рис. 3.3.

По определению $f(x)$ удовлетворяет условию:

$$\int_{-\infty}^{+\infty} f(x) dx = 1.$$

Бесконечные пределы интегрирования берут из соображений математического удобства, но сильного противоречия с экспериментальными данными не возникает, так как функция плотности распределения $f(x)$ становится очень малой при увеличении разности между измеренным и средним значениями величины.

Если полученная кривая характеризуется тем, что значения измеряемой переменной у большинства объектов близки к их среднему и с равной вероятностью отклоняются от него в большую или меньшую сторону (см. рис. 3.3), то такое распределение называется *нормальным распределением* или *распределением Гаусса* и представляет собой распределение вероятностей, которое в одномерном случае задается функцией плотности распределения вероятности вида

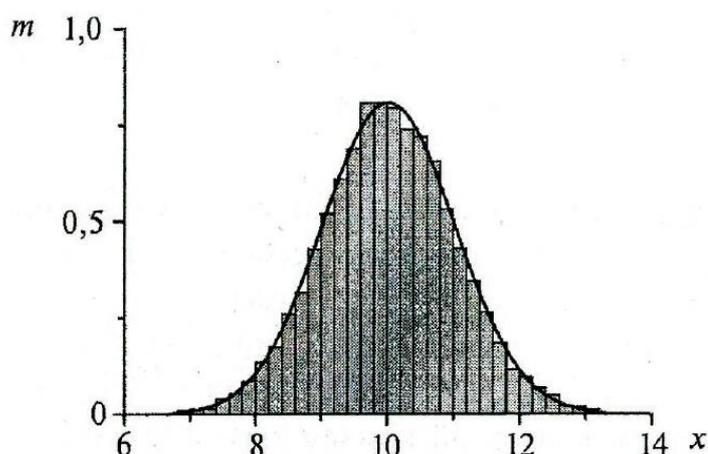


Рис. 3.3. Гистограмма распределения экспериментальных данных с наложением кривой нормального распределения (среднее значение 10, стандартное отклонение 1)

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-x_0}{\sigma}\right)^2},$$

где x – случайное значение величины;

x_0 – математическое ожидание (среднее значение случайной величины, определяющее центр распределения) и медиана распределения; параметр

σ – стандартное отклонение распределения.

Нормальное распределение часто встречается в практике измерений – ему подчиняются физические величины, случайность которых обусловлена действием множества независимых (или слабо зависимых) малых аддитивных

факторов, результат воздействия каждого из которых мал по сравнению с их суммарным воздействием.

3.3. Основы представления результатов измерений

Рассмотрим методы обработки наиболее простых и распространенных в экспериментальной физике данных.

Здесь и далее примем, что распределение измеренных значений близко к нормальному, что бывает достаточно часто. В таком случае лучшими характеристиками совокупности для описания результатов эксперимента будут среднее значение и стандартное отклонение [4].

Средним значением по совокупности является величина

$$\mu = \frac{\sum X}{N},$$

где X – значение параметра; N – количество измерений.

Среднее значение, или математическое ожидание, принимается равным «истинному» значению измеряемой величины. Если сравнивать результаты нескольких серий измерений одной и той же физической величины, то наиболее точное значение будет получено в той серии, в которой кривая распределения будет самой узкой. В примере, представленном на рис. 3.4, кривые соответствуют среднему значению величины 10, полученному при различной точности измерений: кривая 1 соответствует более точным измерениям, кривая 3 – менее точным.

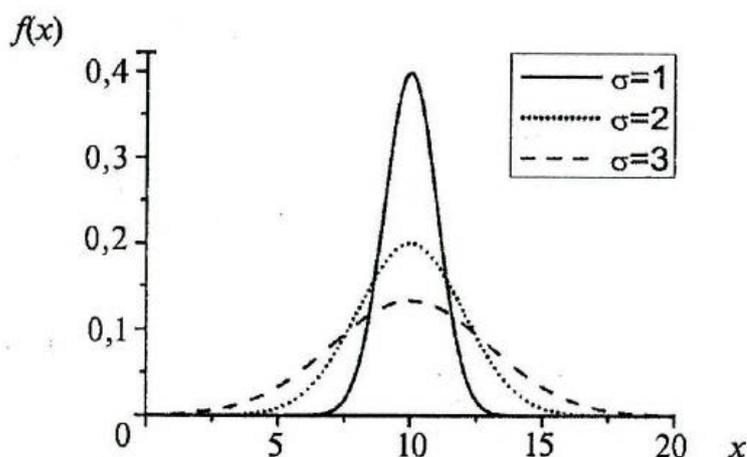


Рис. 3.4. Распределение плотности вероятности, соответствующее среднему значению 10 и стандартным отклонениям 1, 2 и 3

Чем уже кривая распределения, тем меньше ошибка отдельного измерения, поэтому распределение вероятностей характеризуют не только средним значением, но и шириной кривой распределения.

Для этого рассчитывают средний квадрат отклонения от среднего, представляющий собой математическое ожидание квадрата ошибки σ^2 , которое называют *дисперсией* и рассчитывают следующим образом:

$$\sigma^2 = \frac{\Sigma(X - \mu)^2}{N}.$$

Как видно из формулы, дисперсия измеряется в единицах, равных квадрату единицы измерения соответствующей величины. Например, дисперсия измеряемого в сантиметрах роста сама измеряется в квадратных сантиметрах. Это довольно неудобно. Поэтому чаще используют квадратный корень из дисперсии – *стандартное отклонение*, или *среднее квадратичное отклонение*:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\Sigma(X - \mu)^2}{N}}.$$

Стандартное отклонение измеряется в тех же единицах, что и исходные данные.

Нормальное распределение полностью определяется средним значением μ и стандартным отклонением σ . Когда значение некой величины отклоняется от среднего под действием множества слабых независимых друг от друга факторов, то часто распределение характеризуется тем, что примерно 68 % экспериментальных значений отличается от среднего не более чем на одно стандартное отклонение и примерно 95 % – на два стандартных отклонения. Подобные показатели характеризуют нормальное распределение и встречаются очень часто.

Если же значения переменной распределены несимметрично относительно среднего, то использовать при описании данных значения среднего и стандартного отклонений неверно. Асимметрично распределенную совокупность описывают с помощью медианы и процентилей.

Медиана – это значение, которое делит распределение пополам: половина значений больше медианы, половина – меньше (точнее – не больше). Для характеристики разброса параметров в таком случае используют понятия процентилей. Обычно для: описания используют 25-ный и 75-ный процентиля, соответствующие значениям переменной, не выше которых оказались 25 % и 75 % результатов измерений.

Следует отметить, что генеральная совокупность обычно бесконечно велика, поэтому теоретическое распределение вероятностей никогда не реализуется. На практике всегда есть конечное число измерений – выборка объемом n .

Эти значения представляют собой случайную выборку величин из генеральной совокупности. По результатам выборки мы должны как можно точнее

узнать характеристики генеральной совокупности. Поэтому нужно определить соответствующие величины выборки, причем следует постоянно помнить, что величины в выборке случайным образом «извлечены» из генеральной совокупности. Имея дело с выборкой, невозможно узнать точные значения среднего и стандартного отклонений, но можно их оценить.

Оценка среднего, вычисленная по выборке, называется *выборочным средним*. Выборочное среднее обозначают \bar{x} и вычисляют по формуле

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i,$$

где n – объем выборки.

Оценка стандартного отклонения называется *выборочным стандартным отклонением* s и определяется следующим образом:

$$s = \sqrt{\frac{\sum (x - \bar{x})^2}{n - 1}}. \quad (3.6)$$

Формула (3.6) отличается от формулы для стандартного отклонения по совокупности. Во-первых, среднее μ заменяется его выборочной оценкой – \bar{x} . Во-вторых, в знаменателе из числа членов выборки вычитается единица. Строгое обоснование последнего представлено в ряде работ, его суть состоит в том, что разброс значений в пределах выборки никогда не бывает столь большим, как во всей совокупности, и деление не на n , а на $n - 1$ компенсирует возникающее занижение оценки стандартного отклонения. Поэтому если известно, что выборка, скорее всего, принадлежит к совокупности с нормальным распределением, лучше всего использовать выборочное среднее и выборочное стандартное отклонения.

Если есть основания полагать, что распределение в совокупности отличается от нормального, следует использовать медиану, 25-й и 75-й процентиля.

Задачей эксперимента является нахождение истинного значения X физической величины, которое может быть получено, только если мы располагаем генеральной совокупностью всех значений искомой величины x . Однако количество наблюдений в выборке конечно, и в опыте находят некоторое приближенное к X значение \bar{x} , которое называют оценкой истинного значения.

После проведенного анализа выборки результат измерения обычно записывается в виде выражения

$$\bar{x} \pm \Delta x,$$

где Δx – погрешность измерения.

Погрешность измерений принято указывать с определенной степенью достоверности, задаваемой *доверительным интервалом*. Доверительным называют интервал, в который истинное значение X попадает с заданной вероятностью α .

Поскольку гауссово распределение симметрично относительно центра распределения x_0 , вероятность того, что случайное значение величины x , распределенной по нормальному закону, попадет в заданный интервал $(x_0 - \Delta x < x < x_0 + \Delta x)$:

$$\alpha(x_0 - \Delta x < x < x_0 + \Delta x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_{x_0 - \Delta x}^{x_0 + \Delta x} \exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{x - x_0}{\sigma}\right)^2\right) dx.$$

Вводя стандартизованную переменную

$$u = \frac{x - x_0}{\sigma},$$

можно записать:

$$\alpha(-t < u < t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-t}^t \exp\left(-\frac{u^2}{2}\right) du,$$

где t – коэффициенты, определяющие ширину интервала в единицах параметра нормального распределения σ :

$$\Delta x = t_\alpha \sigma.$$

Вероятность попадания u в интервал $(-t_\alpha, t_\alpha)$ можно найти, вычислив интеграл численно для различных значений ширины интервала t_α . И наоборот, каждой заранее заданной вероятности α будет соответствовать свое конкретное значение коэффициента t_α зависящее от выбора доверительной вероятности α . Если значения коэффициентов найдены, то от переменной u можно вернуться к переменной x . Тогда из неравенства $-t < u < t$ получим $x_0 - t_\alpha \sigma < x < x_0 + t_\alpha \sigma$ с вероятностью α .

Можно показать, что если значениях распределены по нормальному закону, то и рассчитываемые по ним средние значения \bar{x} также распределены по нормальному закону с центром в точке x_0 и шириной распределения

$$\sigma = \frac{s}{\sqrt{n}}, \quad (3.7)$$

где n – объем выборки.

Данная величина называется стандартной ошибкой, а выражение для ее вычисления содержит только экспериментально измеряемые величины.

Если средние значения x распределены по нормальному закону, то задача нахождения доверительного интервала сводится к нахождению доверительного интервала $(-t_\alpha, t_\alpha)$ для стандартизованной переменной u и переходу к доверительному интервалу переменной x . В результате получим, что границы интервала, в который случайное значение x попадает с вероятностью α , определяется неравенством

$$x_0 - t_\alpha \sigma < x < x_0 + t_\alpha \sigma, \quad (3.8)$$

где t – коэффициенты Стьюдента, значения которых, соответствующие различным объемам выборок и доверительным вероятностям, приведены в табл. 3.1.

Таблица 3.1

**Значения коэффициентов Стьюдента t
для различных значений доверительного уровня a**

$n - 1$	$a = 68,3\%$	$a = 95\%$	$a = 99\%$	$a = 99,73\%$
2	1,32	4,70	9,9	19,2
3	1,20	3,18	5,8	9,2
4	1,15	2,78	4,6	6,6
5	1,11	2,57	4,0	5,5
6	1,09	2,45	3,7	4,9
7	1,08	2,37	3,5	4,5
8	1,07	2,31	3,4	4,3
9	1,06	2,26	3,2	4,1
10	1,05	2,23	3,2	4,0
15	1,03	2,13	3,0	3,6
20	1,03	2,09	2,8	3,4
30	1,02	2,04	2,8	3,3
50	1,01	2,01	2,7	3,2
100	1,00	1,98	2,6	3,1
200	1,00	1,97	2,6	3,0

Неравенство (3.8) принято записывать в виде символического равенства:

$$X = \bar{x} \pm \Delta x,$$

где $\Delta x = t_\alpha \sigma = t_\alpha \frac{s}{\sqrt{n}}$ – случайная доверительная погрешность результата измерения.

Таким образом, при проведении прямого измерения некоторой величины, подчиняющейся закону нормального распределения, процедуру обработки результатов измерений можно кратко записать следующим образом:

1. провести многократные измерения при стандартизированных условиях и записать данные;
2. рассчитать среднее значение величины по формуле (3.5);
3. вычислить выборочное стандартное отклонение по формуле (3.6);
4. вычислить среднеквадратичную ошибку среднего;
5. задав требуемый уровень доверительной вероятности, определить коэффициент Стьюдента (см. табл. 3.1) и границы доверительного интервала по формулам (3.7) и (3.8);
6. округлив соответствующие результаты, записать результат в виде $X = \bar{x} \pm \Delta x$ при доверительной вероятности α .

3.4. Запись и округление результата измерения

Погрешность результата рассчитывается по случайной выборке и сама содержит погрешность. Новая выборка даст новую погрешность, отличную от первой. Поэтому принято считать, что объективную информацию о величине погрешности несут лишь одна-две значащие цифры в ее численном выражении [10]. Остальные значащие цифры можно считать случайными. Результат измерения также содержит лишь ограниченное число значащих цифр, несущих информацию о величине этого результата. В связи с этим числовые значения результата и погрешности должны быть округлены. При округлении используют следующие правила.

1. Предварительно результат и погрешность записывают в нормальном виде: общий показатель степени выносят за скобку или заменяют соответствующей приставкой: микро, милли, кило, мега и др. Например,

$$x = 0,22 \pm 0,03 \text{ м} = (22 \pm 3) 10^{-2} \text{ м} = 22 \pm 3 \text{ см.}$$

2. Если результат измерения является окончательным и не будет использован в вычислениях других величин, то доверительную погрешность Δx округляют до первой значащей цифры, если она равна или больше 2, или до двух значащих цифр, если первая равна 1.

Если результат будет в дальнейшем использован в вычислениях, то во избежание накопления погрешностей за счет округлений погрешность округляют до двух значащих цифр при любой первой. При промежуточных вычислениях величин, из которых впоследствии будет извлекаться квадратный корень, следует сохранять не менее четырех значащих цифр.

3. Среднее значение x округляют до того разряда, которым оканчивается округленная погрешность Δx . Если погрешность округляется до двух значащих цифр, но вторая из них равна нулю, то этот нуль сохраняется, а в соответствующем этому нулю разряде результата записывается получающаяся там значащая цифра:

$$x = 3,48 \pm 0,10.$$

3.5. Регрессионный анализ

Важной задачей является нахождение функциональных зависимостей между физическими величинами. Пусть, например, в эксперименте получают пары значений $((x_n, y_n), n = 1, 2, 3, \dots)$, которые образуют выборку мощностью n из двумерной генеральной совокупности. Для построения графиков по этим зависимостям используется метод наименьших квадратов Гаусса, или *регрессионный анализ*. Например, в линейном случае необходимо правильно провести прямую линию через набор точек (x_n, y_n) . Наилучшей прямой $y = ax + b$ является такая, на которой достигается минимум суммы квадратов отклонений $F(a, b, n)$:

$$\sum_{i=1}^n (y_i - ax_i - b)^2 = F(a, b, n) \rightarrow \min.$$

Условие минимума означает

$$\frac{\partial F}{\partial a} = 0, \quad \frac{\partial F}{\partial b} = 0,$$

откуда следует система уравнений:

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^n (x_i y_i - ax_i^2 - bx_i) &= 0; \\ \sum_{i=1}^n (y_i - ax_i - b) &= 0, \end{aligned}$$

которая позволяет найти значения a, b и построить искомую прямую.

3.6. Автоматизация статистической обработки

В настоящее время разработано множество программных продуктов, позволяющих упростить и автоматизировать обработку экспериментальных данных, рассчитать основные статистические параметры, провести сравнение данных и представить результаты в графическом виде.

Существуют исследовательские программные системы общего назначения, такие, как Wolfram Mathematica, MatLab/Octave, Maple и другие, которые позволяют производить математическое моделирование и обработку данных, в том числе статистически. Если говорить о более узкоспециализированных

программах для статистической обработки экспериментальных данных, то можно привести в качестве примера следующие:

ADaMSoft (свободно распространяемое ПО, adamsoft.sourceforge.net) – приложение для сбора и анализа данных;

Analyse-it (коммерческое ПО, www.analyse-it.com) - дополнение к Microsoft Excel, позволяющее расширить встроенные в Excel функции по статистической обработке и визуализации данных;

BrightStat (свободно распространяемое ПО, www.brightstat.com) – Adobe Flash приложение, работающее on-line, позволяющее выполнять простые операции по статистическому анализу и визуализации данных;

Dataplot (свободно распространяемое ПО, www.itl.nist.gov/div898/software/dataplot) - приложение предназначено для статистического анализа, визуализации и нелинейного моделирования данных; нацелено на исследование инженерных и научных процессов;

MacAnova (свободно распространяемое ПО, www.stat.umn.edu/macanova/) - приложение для математического и статистического анализа;

Minitab (коммерческое ПО, www.minitab.com) - приложение, позволяющее выполнять статистический анализ данных, включая планирование экспериментов, оптимальную визуализацию данных;

Origin (коммерческое ПО, www.originlab.com) - приложение для анализа данных и построения качественных академических иллюстраций;

PSPP (свободно распространяемое ПО, www.gnu.org/software/pspp/) - приложение, предназначенное для статистического анализа дискретных данных, является бесплатным аналогом коммерческого пакета для статистического анализа IBM SPSS;

R (свободно распространяемое ПО, www.r-project.org/) – среда и язык для статистической обработки и визуализации данных, включает в себя широкие возможности линейного и нелинейного моделирования, проверки статистических гипотез, анализа рядов, классификации и т. д.;

ROOT (свободно распространяемое ПО, root.cern.ch/) – система, позволяющая анализировать большой объем данных, включает в себя в том числе и статистический анализ; была разработана для анализа данных с ЛНС (Большой адронный коллайдер);

SalStat (свободно распространяемое ПО, salstat.sourceforge.net) – небольшое приложение для статистического анализа данных;

SAS (коммерческое ПО, www.sas.com) - инфраструктура для анализа, визуализации и обработки данных;

SOFA Statistics (свободно распространяемое ПО, sofastatistics.com) – приложение позволяет выполнять анализ данных, в том числе и статистический,

акцент делают на широкие возможности по формированию отчетов и визуализации результатов анализа;

SPSS (коммерческое ПО, www.spss.com) – система приложений для статистического анализа данных, в том числе больших объемов;

STATISTICA (коммерческое ПО, www.statsoft.com) – система приложений для статистического анализа данных, в том числе больших объемов, управления данными и визуализации.

Многие операции статистического анализа данных доступны и в таких распространенных программах, как Excel, функционала которой вполне достаточно для простых задач анализа данных.

Перечисленные программы и многие другие программные продукты позволяют производить статистический анализ полученных данных, проводить оценку распределения и основных параметров изучаемой выборки, строить графики и выполнять многие другие математические и статистические операции. Однако после обработки экспериментальных данных остается задача оформления и представления результатов в виде отчетов и публикаций.

Вопросы и задания для самопроверки

1. Перечислите основные виды ошибок измерений.
2. Чем обусловлены ошибки измерений?
3. Назовите основные параметры распределений.
4. В чем состоят основные отличия нормального распределения?
5. В результате проведения измерений зафиксированы следующие значения показателя напряжения: 5,33; 4,95; 4,93; 5,08; 4,95; 4,96; 5,02; 4,99; 5,24; 5,25; 5,23; 5,01. Рассчитайте среднее значение, стандартное отклонение и стандартную ошибку измерений.

4. ОФОРМЛЕНИЕ НАУЧНЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ. СОВРЕМЕННЫЕ ИНСТРУМЕНТЫ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ ДАННЫХ

В данном разделе рассматриваются основные принципы использования издательской системы \LaTeX для оформления академических работ, которая часто используется для компьютерной подготовки результатов исследований к публикации. \LaTeX имеет развитую инфраструктуру и выполняет интеграционную функцию среди исследовательских программных систем, таких, как Origin, Wolfram Math

.....

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Подводя итоги, следует отметить, что способность применить статистические методы в физике не сводится к заучиванию нескольких формул и умению

отыскать табличное значение. Как и любая творческая деятельность, применение статистических методов и интерпретация полученных результатов требуют глубокого проникновения в суть дела – понимания как возможностей и ограничений используемых методов, так и сути решаемой задачи. Исследователю важно до начала измерений осознать цели исследования и подлежащие проверке гипотезы. Когда продумана цель и гипотеза исследования, гораздо проще грамотно выбрать тип предстоящего эксперимента и метод анализа данных.

1. Ахутин А. В. История принципов физического эксперимента от античности до XVII века / А. В. Ахутин. – М.: Наука, 1976. – 292 с.
2. Бекряев В. И. Основы теории эксперимента : учеб. пособие / В. И. Бекряев. - СПб.: Изд. РГТМУ, 2001. - 266 с.
3. Величко Е. П. Биомолекулярная электроника. Введение : учеб. пособие / Б. Н. Величко, О. К). Цыбин. – СПб. : Изд-во Политехи, унта, 2012.- 260 с.
4. Бланд С. Медико-биологическая статистика: [пер. с англ.] / С. Гланц. – М.: Практика, 1998. – 459 с.
5. ГОСТ 8.417–2002. Государственная система обеспечения единства измерений. Единицы величин. – 2002. URL: <http://protect.gost.ru/document.aspx?control=7&id=129858>).
6. Князев Б. А, Начала обработки экспериментальных данных / Б. А. Князев, В. С. Черкасский ; Новосибирск. - 1996. - 93 с.
7. Красовский Г. И. Планирование эксперимента / Г, И. Красовский, Г. Ф. Филаретов. – Минск : Изд-во БГУ, 1982. ■- 302 с.
8. Кунде Х. И. Методы физических измерений : [пер. с нем.] / Х. И. Купце. - М. : Мир, 1989. - 216 с.
9. Лиисон Г. ВејтКНС эксперименты в физике: [пер. с англ.] / Г. Липсон; под ред. В. И. Рыдника. – М. : Вузовская книга, 2011, – 196 с.
10. Лямкин А. И. Экспериментальные методы исследований. Курс лекций / А. И. Лямкин. - Красноярск, 2007. – 434 с.
11. Международный словарь по метрологии: основные и общие понятия и соответствующие термины. International vocabulary of metrology – Basic and general concepts and associated terms (VIM): [пер. с англ. и фр.]. – 2-е изд., испр. / НПО «Профессионал». – СПб., 2010. – 82 с. URL: <http://mathscinet.ru/slaev/records/images/SlaevChun02.pdf>.
12. Постановление Правительства РФ «Об утверждении положения о единицах величин, допускаемых к применению в Российской

-
- Федерации» от 31 октября 2009 г. № 879. URL: http://www.fundmetrology.ru/depository/01_пра/ро879.pdf.
13. Рыков В. В. Математическая статистика и планирование эксперимента : конспект лекций / В. В. Рыков, В. Ю. Иткин; РГУ нефти и газа им. И. М. Губкина. - М., 2008. - 210 с.
 14. Тригг Дж. Решающие эксперименты в современной физике / Дж. Тригг. – М.: Мир, 1974. – 160 с.
 15. Тригг Дж. Физика XX века: ключевые эксперименты: [пер. с англ.] / Дж. Тригг. – М.: Мир, 1978. – 376 с.
 16. Шипунова О. Д. История и философия науки. Философские проблемы естествознания : учеб. пособие / О. Д. Шипунова. – СПб.: Изд-во Политехи, ун-та, 2010. – 206 с.
 17. Gratzer G. Math Into LaTeX. 2000.
 18. Hughes I.G., Hase T.P.A. Measurements and their uncertainties. A practical guide to modern error analysis. - New York: Oxford University press, 2010. – 136 p.
 19. Knuth D. E. The TeXbook. - 1984. - 531 p.
 20. Lamport L. LaTeX: A Document Preparation System. – 1994.
 21. LATEX 2 for authors., LATEX3 Project Team. – 2001.
 22. Resolution 1 of the 24th meeting of the CGPM. – 2011. URL: <http://www.bipm.org/en/CGPM/db/24/1/>,
 23. Samuel A. L. First Grade TeX. A Beginner's TeX Manual. Stanford Department of Computer Science. – Report, 1983.
 24. Tantau T., Wright J., Miletic V. The beamer class. User Guide for version 3.33.- 2013.
 25. The International Technology Roadmap for Semiconductors: 2010 Update, URL: http://www.itrs.net/LINKS/2010ITRS/2010Update/ToPost/2010_Update_Overview.pdf.
 26. Willkins D. R. Getting Started with Plain TeX, – 1994. – 40 p. URL: <http://www.ntg.nl/doc/wilkins/pllong.pdf>.