

*МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РФ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«УДМУРТСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»
«ИНСТИТУТ «НЕФТИ И ГАЗА ИМ. М.С. ГУЦЕРИЕВА»
КАФЕДРА «ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКА»*

***В.П. ИВАННИКОВ
А.В. КАБАКОВА***

МЕТОДОЛОГИЯ НАУЧНОГО ТВОРЧЕСТВА

УЧЕБНОЕ ПОСОБИЕ

ИЖЕВСК

2019

УДК 001.8 (075.8)
ББК 72.52я73
И 196

Рецензент: доктор технических наук, профессор Щенятский А.В.

Иванников Валерий Павлович, Кабакова Анна Валерьевна

И Методология научного творчества: Учебное пособие / В.П. Иванников, А.В. Кабакова – Ижевск: Издательский центр «Удмуртский университет», 2019. – 224 с.

ISBN 978-5-4312-0703-7

В учебном пособии в соответствии ФГОС ВО и рабочими программами по дисциплинам «Философия и методология науки» и «Методология научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ», для студентов обучающихся в УдГУ по направлениям подготовки 13.03.02 – «Электроэнергетика и электротехника» и 20.04.01 – «Техносферная безопасность», дано представление о единстве взглядов современной философии и физики на сущность пространственно-временных отношений, на структуру материального мира с его внутренними взаимодействиями, на единство понятий материя, взаимодействие и движение, виды взаимодействия. Рассмотрены фундаментальные законы физики, силы, поля, законы сохранения, проблемы измерения пространственных и временных величин, единицы и стандарты пространства и времени, основы физических методов измерений. Изложено обоснование измерительного эксперимента, как главного метода научного познания, условий обеспечения качества измерений и роли метрологии в определении результатов экспериментальных исследований, дано описание общей схемы организации и методологического обеспечения организации и проведения научных исследований.

@ В.П. Иванников, А.В. Кабакова, 2019
@ ФГБОУ ВО «Удмуртский государственный университет», 2019

ISBN 978-5-4312-0703-7

МЕТОДОЛОГИЯ НАУЧНОГО ТВОРЧЕСТВА

ВВЕДЕНИЕ	5
ГЛАВА I. ПОНЯТИЕ О НАУЧНОМ ПОЗНАНИИ	7
<i>Введение</i>	
§ I.1. <i>Философия и физика</i>	
<i>О сущности пространственно-временных отношений</i> ...	10
§ I.2. <i>Атрибутивные характеристики материи</i>	20
I.2.1. <i>Пространство</i>	20
I.2.2. <i>Время</i>	27
§ I.3. <i>Материя, взаимодействие и движение.</i>	
<i>Фундаментальные законы физики</i>	32
I.3.1. <i>Некоторые представления о структуре материального объекта и его внутренними взаимодействиями</i>	33
I.3.2. <i>Виды взаимодействия. Силы. Поля</i>	48
I.3.3. <i>Фундаментальные законы физики</i>	53
I.3.4. <i>Законы сохранения</i>	54
ГЛАВА II. ОСНОВЫ ФИЗИЧЕСКИХ МЕТОДОВ ИЗМЕРЕНИЙ	66
<i>Введение</i>	
§ II.1. <i>Измерение пространственных и временных величин.</i>	
<i>Единицы и стандарты пространства и времени</i>	74
II.1.1. <i>Геометрия, физика пространства и времени.</i>	
<i>Связь физики с математикой. Размерные измерения</i>	75
§ II.2. <i>Системы отсчета. Системы координат</i>	85
II.2.1. <i>Понятие о материальной точке</i>	85
II.2.2. <i>Примеры систем отсчета</i>	86
II.2.3. <i>Системы координат</i>	88
II.2.4. <i>Несколько слов о стандарте длины. Измерение длины</i>	90
II.2.5. <i>Измерение времени</i>	93
§ II.3. <i>Измерение механических величин</i>	96
II.3.1. <i>Закон инерции. Инерциальная система отсчета.</i>	
<i>Кинематика и динамика</i>	99
II.3.2. <i>Измерение массы и плотности</i>	104
II.3.3. <i>Измерение скорости, ускорения</i>	110
II.3.4. <i>Измерение фундаментальных механических сил</i>	114
§ II.4. <i>Измерение электрических и магнитных величин</i>	125
II.4.1. <i>Силы электростатического взаимодействия</i>	125
§ II.5. <i>Возможности измерения псевдосил, сил ядерного взаимодействия, и иных физических явлений</i>	136

ГЛАВА III. ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЙ ЭКСПЕРИМЕНТ – ГЛАВНЫЙ МЕТОД НАУЧНОГО ПОЗНАНИЯ 147

Введение

§ III.1. Теоретические основы измерений	149
III.1.1. Физические свойства и величины	149
III.1.2. Классификация физических величин	151
III.1.3. Шкалы измерений	153
§ III.2. Физические законы и размерности физических величин.	
Системы единиц	157
III.2.1. Физические законы и размерности физических величин	157
III.2.2. Размерности физических величин. Правило размерностей ..	161
III.2.3. Системы единиц	167

ГЛАВА IV. КАЧЕСТВО ИЗМЕРЕНИЙ 174

Введение

§ IV.1. Качество измерений и метрология	176
IV.3.1. Случайные и систематические погрешности измерений ...	177
IV.3.2. Сложение случайных и систематических погрешностей ..	185
IV.3.3. Обработка результатов при косвенных измерениях	186
IV.3.4. Запись результатов. Точность расчетов	188
IV.3.5. Изображение экспериментальных результатов на графиках	190
IV.3.6. Проведение кривых через экспериментальные точки	193
IV.3.7. Определение искомых параметров по результатам измерений	195

ГЛАВА V. ОБЩАЯ СХЕМА ОРГАНИЗАЦИИ И МЕТОДОЛОГИЯ НАУЧНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ .. 199

Введение

§ V.1. Оформление результатов НИР и ОКР	202
§ V.2. Структура НИР и ОКР	205
§ V.3. Требования к содержанию глав и разделов НИР и ОКР	208
§ V.4. Оформление работы	215
V.4.1. Рубрикация текста	216

ЛИТЕРАТУРА 224

ВВЕДЕНИЕ

Развитие знаний об окружающем нас мире осуществляется человеком через субъективное восприятие материальных объектов и процессов, происходящих в пространстве и во времени с помощью органов чувств. Приборы и инструменты лишь повышают чувствительность наших органов и чувств.

Попытки людей осмыслить то, как *«выглядит картина мира»*, привели науку к пониманию того, что материя бывает *«живая»*, если говорить о биологических видах, и *«неживая»* - если говорить о *«веществах»*. Не возникает противоречия и тогда, когда мы говорим о *«космосе»*. То есть, весь *«космос»*- есть материя. Но межпланетные расстояния огромны в сравнении с размерами планет и, поэтому, мы можем сказать, что *«космос»*, в большей степени *«пуст»*, чем наполнен материальными объектами, а пространство между планетами заполнено *«вакуумом»*. Поскольку, в течение 20-ти веков, пока существует наука, под вакуумом учёные понимали отсутствие в объёме материальных объектов, даже атомов, то всё это время, учёные отождествляли понятия *«вакуум»* и *«пустота»*. То есть, вплоть до конца 19-того века считалось, что понятия *«вакуум»* и *«материя»* противоположны по своему смысловому содержанию. Вместе с тем, после того, как физики и философы сформулировали новое понятие *«материи»*, как *«объективной реальности, данной нам в ощущениях»*, стало очевидно, что *«космическое пространство»*- *«вакуум»*, а вакуум мы можем и ощущать физически, и можем измерять, с помощью специальных приборов – вакуумметров, то есть он проявляет себя *«объективная реальность, данная нам в ощущениях»* и заполнено материальными объектами, то у нас есть все основания считать *«космос»* определённой формой существования материи. Но тогда и вакуум, как неотъемлемая часть космоса есть *«материя»*. И в этом нет никакого противоречия. Попробуйте закрыть пальцем конец трубки вакуумного

насоса, и вы ощутите боль, а боль и есть «объективная реальность, данная нам в ощущениях». Следовательно, вакуум есть «особая форма существования материи». А про понятие «пустота» в физических исследованиях можно забыть.

Однако вернёмся от философского осмысления понятия «материя» к понятию, когда под «материей» мы понимаем любое «вещество». Наиболее важное предположение, связанное с этим понятием, это то, что «все вещества состоят из атомов». В биологии, например, из этого следует утверждение смысл которого состоит в том, что все, что делает животное, совершают атомы. Иными словами, в живых существах нет ничего, что не могло бы быть понято с той точки зрения, что они состоят из атомов, действующих по законам физики и биологии. Когда-то это не было очевидно и потребовалось очень много времени, опытов и размышлений, прежде чем доказать это предположение. В настоящее время, однако, это утверждение воспринимается как аксиома, принято и приносит огромную пользу, порождая новые идеи в области биологии. Рассмотрим и другие примеры.

«Стальной кубик или кристаллик соли, сложенный из одинаковых рядов одинаковых атомов, могут обнаруживать очень интересные свойства; вода — простые капельки, неотличимые друг от друга и покрывающие милья за милья поверхность Земли, — способна породить волны и пену, гром прибоя и странные узоры на граните набережной. И все это, все богатство свойств минералов и жизни вод — всего лишь свойство сгустков атомов. Можно выстраивать атомы по ранжиру, строй за строем, колонну за колонной, можно сооружать из них замысловатые молекулы запаха фиалок, можно располагать их каждый раз по-новому, разнообразя их мозаику, не повторяя того, что уже было, — представляете, сколько необыкновенного, неожиданного может возникнуть в их поведении. Разве не может быть, что те «тела», которые разгуливают по улице и беседуют с вами, тоже не что иное, как сгустки атомов, но такие сложные, что уже не хватает фантазии предугадывать по их виду их поведение. Когда мы называем себя сгустками

атомов, это не значит, что мы — только собрание атомов, потому что такой сгусток, который никогда не повторяется, прекрасно может оказаться способным и на то, чтобы сидеть у стола и читать эти строки» - Ричард Фейнман, Нобелевский лауреат по физике [1].

В данном учебном пособии в соответствии ФГОС ВО и рабочими программами по дисциплинам «Философия и методология науки» и «Методология научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ», для студентов, обучающихся в УдГУ по направлениям подготовки 13.03.02 – «Электроэнергетика и электротехника» и 20.04.01 – «Техносферная безопасность», дано представление о единстве взглядов современной философии и физики на сущность пространственно-временных отношений, на структуру материального мира с его внутренними взаимодействиями, на единство понятий материя, взаимодействие и движение, виды взаимодействия. Рассмотрены фундаментальные законы физики, силы, поля, законы сохранения, проблемы измерения пространственных и временных величин, единицы и стандарты пространства и времени, основы физических методов измерений. Изложено обоснование измерительного эксперимента, как главного метода научного познания, условий обеспечения качества измерений и роли метрологии в определении результатов экспериментальных исследований, дано описание общей схемы организации и методологического обеспечения организации и проведения научных исследований.

ГЛАВА I

ПОНЯТИЕ О НАУЧНОМ ПОЗНАНИИ

Введение

Как было показано в предисловии, познание окружающего «мира», включая «космос», развивается через субъективное восприятие материальных объектов и процессов, происходящих в пространстве и во времени, человеком с помощью органов чувств. Приборы и инструменты, только лишь, повышают чувствительность наших органов и чувств.

Доказательства существования атомов можно получить, изучая строение кристаллов [2]. Во многих случаях их строение, определяется с помощью опытов по прохождению рентгеновских лучей через кристаллы. Результаты взаимодействия рентгеновского излучения с кристаллической решеткой согласуются, по своему пространственному расположению, с формой самого природного кристалла. Углы между разными гранями кристалла, на которых рассеиваются рентгеновские лучи, согласуются с точностью до секунд, с углами, высчитанными в предположении, что кристалл состоит из множества «слоев» атомов. Например, кристалл соли. Соль — твердое тело, кристалл, в котором «атомы соли» расставлены правильными рядами. В качестве иллюстрации на рис. 1 показано трехмерное строение обычной соли (хлористого натрия).

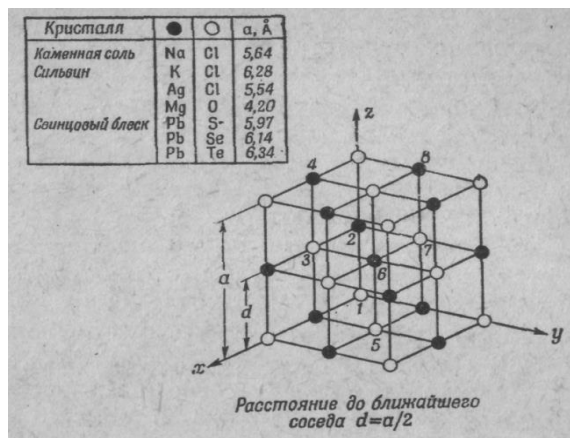


Рис. 1. Структура кристалла соли[2]

Оказалось, что и некоторые другие вещества имеют сходное строения (см. таблицу на рис. 1). А что находится между атомами натрия и хлора? И если диаметр атома $\sim 1A^{\circ}$, и $a = 4\div 6 A^{\circ}$, то «пустоты» в кристалле в 125 раз больше, чем материи. Вспомните пример с космическим вакуумом. Таким образом очевидно, что «пространство» и «время» являются безусловной составной частью «картины мира» в целом [3].

Развитие геометрии, астрономии, физики от Евклида и Пифагора на протяжении многих веков и вплоть до настоящего времени подтвердило правильность представлений о «пространстве» и «времени», как неотъемлемых атрибутах «предметной материальности» окружающей нас природы (мира). В свою очередь, диалектико-материалистические представления о «пространстве» и «времени», сформулированные в 20 веке, позволили дать правильную интерпретацию современной физической теории «пространства»-«времени», вскрыть неудовлетворительность субъективистского понимания «материи», основанного на представлениях о «предметной материальности» мира, и попыток развить это понимание в отрыве представлений о «пространстве»-«времени» от «материи». «Пространство» и «время» не существуют вне «материи» и независимо от неё. В то же время, «пространство» и «время» можно рассматривать и как атрибутивные характеристики материи. Учение о «пространстве» и «времени» углубляется и развивается вместе с развитием естествознания и, прежде всего, физики. Более того, современная физика обнаружила глубокое единство «пространства» и «времени», выражающееся в совместном закономерном изменении «пространственно-временных» характеристик материальных систем и объектов в зависимости от «движения» последних, а также в зависимости этих характеристик от концентрации масс в окружающей среде.

В настоящее время чётко доказано, что *«пространство»*, *«время»* и *«движение»* - всеобщие формы существования *«материи»*. Показано также, что *«пространственно-временные»* отношения между материальными объектами, подчиняются не только общим физическим закономерностям, но и специфическим, характерным для объектов того или иного класса, поскольку эти отношения определяются структурой материального объекта и его внутренними взаимодействиями. Поэтому такие характеристики, как размеры объекта и его форма, время жизни, ритмы процессов, типы симметрии, являются существенными параметрами объекта того, или иного типа, зависящими также от условий, в которых он существует. Особенно специфичны *«пространственно-временные»* отношения в таких сложных развивающихся объектах, как организм или общество. В этом смысле можно говорить об индивидуальных пространственных, либо временных характеристиках таких объектов (например, о биологическом или социальном времени) [4].

Пространственными характеристиками являются положения относительно других тел (координаты тел), расстояния между ними, углы между различными пространственными направлениями. Отдельные объекты характеризуются протяжённостью и формой, которые определяются расстояниями между частями объекта и их ориентацией.

Временные характеристики - *«моменты»*, в которые происходят явления, продолжительности (длительности) процессов. Отношения между этими пространственными и временными величинами называются метрическими.

Для измерения пространственных и временных величин пользуются системами отсчёта. Топологические характеристики *«пространства»* и *«времени»* связаны с *«взаимодействием»* различных объектов, числом направлений, понятиями однородности и неоднородности пространства. С чисто пространственными отношениями имеют дело лишь в том случае, когда можно отвлечься от свойств и движения тел и их частей; с чисто

временными — в случае, когда можно отвлечься от многообразия сосуществующих объектов. Однако в реальной действительности пространственные и временные отношения неразрывно связаны друг с другом, их неразрывное единство выступает в движении материи [5].

§ 1.1. Философия и физика

О сущности пространственно-временных отношений

Важнейшие философские проблемы, относящиеся к «*пространству*» и «*времени*» - это вопросы о сущности пространственно-временных отношений и об отношении этих форм бытия к материи, объективности пространственно-временных отношений и закономерностей материального мира.

На протяжении почти всей истории естествознания и философии существовали две основные концепции «*пространства*» и «*времени*». Одна из них идёт от древних атомистов — Демокрита, Эпикура, Лукреция, которые ввели понятие «*пустого пространства*» и рассматривали его как однородное (одинаковое во всех точках) и бесконечное. Эпикур полагал, что «*пространство*» не изотропно, т. е. неодинаково по всем направлениям, а понятие «*времени*» рассматривалось им отдельно от «*пространства*», было разработано крайне слабо и рассматривалось как субъективное ощущение действительности.

В своё время, в связи с разработкой основ динамики концепцию «*пространства*» и «*времени*» развил Исаак Ньютон, который очистил её от антропоморфизма. По Ньютону, «*пространство*» и «*время*» суть особые начала, существующие независимо от материи и друг от друга. Пространство само по себе (абсолютное пространство) есть «*пустоеместилище тел*», абсолютно неподвижное, непрерывное, однородное и изотропное, проницаемое, не воздействующее на материю и не подвергающееся её воздействиям, бесконечное, обладает тремя измерениями. От абсолютного пространства Ньютон отличал «*протяжённость*» тел - их основное свойство, благодаря которому они занимают определённые места в абсолютном пространстве,

совпадают с этими местами. Протяжённость, по Ньютону, если говорить о простейших частицах (атомах), есть начальное, первичное свойство, не требующее объяснения. Абсолютное пространство вследствие неразличимости своих частей неизмеримо и не познаваемо. Положения тел и расстояния между ними можно определять только по отношению к другим телам. Иными словами, наука и практика имеют дело только с относительным пространством.

Время в концепции Ньютона само по себе есть нечто абсолютное и ни от чего не зависящее, чистая длительность, как таковая, равномерно текущая от прошлого к будущему. Время является пустым «вместилищем событий», которые могут его заполнять, но могут и не заполнять; ход событий не влияет на течение времени. Время, как абсолютная философская категория, универсально, одномерно, непрерывно, бесконечно, однородно (везде одинаково) и неизмеримо. Вместе с абсолютным временем, Ньютон использовал понятие измеряемого относительного времени. Измерение относительного времени осуществляется с помощью часов, т.е. периодических движений.

«Пространство» и «время» в концепции Ньютона независимы друг от друга. Независимость «пространства» и «времени» проявляется прежде всего в том, что расстояние между двумя данными точками пространства и промежуток времени между двумя событиями сохраняют свои значения независимо друг от друга в любой системе отсчёта, а отношения этих величин, (скорости тел) могут быть любыми [6].

Ньютон решительно отвергал идею Декарта о заполненном мировом пространстве, т. е. о тождестве протяжённой материи и пространства. Концепция «пространства» и «времени», разработанная Ньютоном, была господствующей в естествознании на протяжении XVII—XIX вв., т. к. она полностью соответствовала Евклидовой геометрии, классической механике и классической теории тяготения. Оказалось, что законы «ньютоновой механики» справедливы только в инерциальных системах отсчёта. Это объясняется тем, что тела в инерциальных системах отсчёта движутся поступательно, равномерно

и прямолинейно именно по отношению к абсолютному «*пространству*» и «*времени*». Согласно ньютоновской теории тяготения, действия от одних частиц вещества к другим передаются мгновенно через разделяющее их пустое пространство.

Ньютонова концепция «*пространства*» и «*времени*», таким образом, соответствовала всей физической картине мира той эпохи. В частности и представлению о материи как изначально протяжённой и по природе своей неизменной сущности.

Существенным противоречием концепции Ньютона, однако, является то, что абсолютное «*пространство*» и «*время*» признаются, в этой концепции, непознаваемыми с помощью опыта, поскольку, в соответствии с принципом относительности классической механики, все инерциальные системы отсчёта равноправны и невозможно отличить, движется ли система по отношению к абсолютному «*пространству*» и «*времени*» или покоится. В конечном итоге, это противоречие послужило доводом для сторонников противоположной концепции «*пространства*» и «*времени*», исходные положения которой восходят к Аристотелю и Декарту.

Это представление о «*пространстве*» и «*времени*» было разработано Г. Лейбницем, опиравшимся также на некоторые идеи Декарта. Особенность «*лейбницевой*» концепции «*пространства*» и «*времени*» состоит в том, что в ней отвергается представление о «*пространстве*» и «*времени*» как о самостоятельных началах бытия, существующих наряду с материей, но независимо от неё. По Лейбницу, *пространство* — это порядок взаимного расположения множества тел, существующих вне друг друга, *время* — порядок сменяющих друг друга явлений или состояний тел. При этом Лейбниц в дальнейшем включал в понятие порядка также и понятие относительной величины. Представление о протяжённости отдельного тела, рассматриваемого безотносительно к другим, по концепции Лейбница, не имеет смысла [7].

Пространство есть отношение («*порядок*»), применимое лишь ко многим телам, к «*ряду*» тел. Можно говорить только об относительном размере данного

тела в сравнении с размерами других тел. То же можно сказать и о длительности: понятие длительности применимо к отдельному явлению постольку, поскольку оно рассматривается как звено в единой цепи событий. Протяжённость любого объекта, по Лейбницу, не есть первичное свойство, а обусловлено силами, действующими внутри объекта; внутренние и внешние взаимодействия определяют и длительность состояния, что же касается самой природы времени как порядка сменяющихся явлений, то оно отражает их причинно-следственную связь.

Логически концепция Лейбница связана со всей его философской системой в целом. Однако Лейбницева концепция *«пространства»* и *«времени»* не играла существенной роли в естествознании XVII÷XIX вв., т.к. она не могла дать ответа на вопросы, поставленные наукой той эпохи. Прежде всего, воззрения Лейбница на пространство казались противоречащими существованию вакуума (*только после открытия физического поля в XIX веке проблема вакуума предстала в новом свете- как сущностная форма существования материи*); кроме того, она явно противоречила всеобщей убеждённости в единственности и универсальности Евклидовой геометрии.

Наконец, концепция Лейбница представлялась находящейся в непримиримом противоречии с классической механикой, поскольку казалось, что признание чистой относительности движения не даёт объяснения преимущественной роли инерциальных систем отсчета. Таким образом, современное Лейбницу естествознание оказалось в противоречии с его концепцией *«пространства»* и *«времени»*, которая строилась на гораздо более широкой философской основе. И только два века спустя началось накопление научных фактов, показавших ограниченность господствовавших в то время *«ньютоновских»* представлений о *«пространстве»* и *«времени»*.

Философы-материалисты XVIII÷XIX вв. решали проблему *«пространства»* и *«времени»* в основном в духе концепции Ньютона или Лейбница, хотя, как правило, полностью не принимали какую-либо из них полностью. Большинство философов-материалистов (Дж. Толанд, Д. Дидро)

выступало против *«ньютоновского»* пустого пространства. Ещё ближе к концепции Лейбница стоял Г. Гегель. В концепциях субъективных идеалистов и агностиков проблемы *«пространства»* и *«времени»* сводились главным образом к вопросу об отношении *«пространства»* и *«времени»* к сознанию, восприятию. Дж. Беркли категорически отвергал *«ньютоновское»* абсолютное *«пространство»* и *«время»*. Беркли рассматривал пространственные и временные отношения субъективистски, как порядок восприятий; у него не было и речи об объективных геометрических и механических законах. Поэтому точка зрения Дж. Беркли не сыграла существенной роли в развитии научных представлений о *«пространстве»* и *«времени»*.

Иначе обстояло дело с воззрениями Канта, который сначала примыкал к концепции Лейбница, но противоречивость этих представлений и естественно научных взглядов того времени привели Канта к принятию *«ньютоновской»* концепции и к стремлению философски обосновать её. Главным у Канта было объявление *«пространства»* и *«времени»* априорными формами человеческого созерцания, т. е. их абсолютизация. Взгляды Канта на *«пространство»* и *«время»* нашли немало сторонников в конце XVIII века и в 1-й половине XIX века. Несостоятельность *«кантовской»* концепции *«пространства»* и *«времени»* была доказана лишь после создания и принятия неевклидовой геометрии, которая в корне противоречила *«ньютоновскому»* и *«кантовскому»* пониманию *«пространства»*. Отвергнув эти идеи, Н.И. Лобачевский и Б. Риман утверждали, что геометрические свойства пространства, будучи наиболее общими физическими свойствами, определяются общей природой сил, формирующих тела [5].

Однако, кризис механистического естествознания на рубеже XIX÷XX вв. привёл к возрождению на новой основе субъективистских взглядов на *«пространство»* и *«время»*. Критикуя концепцию Ньютона и правильно подмечая её слабые стороны, Э. Мах снова развил взгляд на *«пространство»* и *«время»* как на *«порядок восприятий»*, подчёркивая опытное происхождение аксиом геометрии. Но опыт понимался Махом субъективистски, поэтому и

геометрия Евклида, и геометрии Лобачевского и Римана рассматривались им как различные способы описания одних и тех же пространственных соотношений.

Критика субъективистских взглядов Маха на «пространство» и «время» была дана В. И. Лениным в книга «Материализм и эмпириокритицизм» [8]. Ленин придерживался взглядов на «пространство» и «время», сформулированных основателями диалектического материализма К. Марксом и Ф. Энгельсом [9,10]. По Энгельсу, находиться в пространстве - значит быть в форме расположения одного возле другого, существовать во времени - значит быть в форме последовательности одного после другого. Энгельс подчёркивал, что *«... обе эти формы существования материи без материи суть ничто, пустые представления, абстракции, существующие только в нашей голове».*

Именно в конце XIX - начале XX вв. произошло глубокое изменение научных представлений и о материи, соответственно, радикально изменившие и представление о «пространстве» и «времени». Физическую картину мира дополнили концепцией поля, как формы материальной связи между частицами вещества, и как особой формы существования материи. Экспериментально было доказано, что все тела представляют собой системы заряженных частиц, связанных полем, передающим действия от одних частиц к другим с конечной скоростью - скоростью света. Ранее полагали, что поле - это состояние эфира, абсолютно неподвижной среды, заполняющей мировое абсолютное пространство. Позже было установлено (Х. Лоренц и др.), что при движении тел с очень большими скоростями, близкими к скорости света, происходит изменение поля, приводящее к изменению пространственных и временных свойств тел; при этом Лоренц считал, что длина тел в направлении их движения сокращается, а ритм происходящих в них физических процессов замедляется, причём пространственные и временные величины изменяются согласованно. Вначале казалось, что таким путем можно будет определить абсолютную скорость тела по отношению к эфиру, следовательно, по отношению к абсолютному пространству. Однако вся совокупность опытов опровергла этот взгляд. Было установлено, что в любой инерциальной системе отсчёта все физические законы,

включая законы электромагнитных (и вообще полевых) взаимодействий, одинаковы.

Новой физической теорией «пространства» и «времени» явилась специальная теория относительности А. Эйнштейна, основанная на двух фундаментальных положениях - о предельности скорости света и равноправности инерциальных систем отсчёта [11]. Из неё следует, что пространственные и временные отношения - длина тела (вообще расстояние между двумя материальными точками) и длительность (а также ритм) происходящих в нём процессов - являются не абсолютными величинами, как утверждала «*ньютонова механика*», а относительными. Частица (например, нуклон) может проявлять себя по отношению к медленно движущемуся относительно неё частице как сферическая, а по отношению к налетающей на неё с очень большой скоростью частице - как сплюснутый в направлении движения диск. Соответственно, время жизни медленно движущегося заряженного π -мезона составляет $\sim 10^{-8}$ сек, а движущегося с около световой скоростью - во много раз больше.

Относительность пространственно-временных характеристик тел полностью подтверждена опытом. Отсюда следует, что представления об абсолютном «пространстве» и «времени» несостоятельны. Именно «пространство» и «время» являются общими формами координации материальных явлений, а не самостоятельно существующими формами бытия (началами), независимо от материи. Таким образом, теория относительности исключает представление о пустых «пространстве» и «времени», имеющих собственную размерность. Представление о пустом пространстве было отвергнуто в дальнейшем и в квантовой теории поля, в связи с новым пониманием «вакуума».

Дальнейшее развитие теории относительности показало, что пространственно-временные отношения зависят также и от концентрации масс. При переходе к космическим масштабам геометрия «пространства» и «времени» не является евклидовой (или «плоской»), т. е. не зависящей от размеров пространственно-временной области, а изменяется от одной области

космоса к другой в зависимости от плотности масс в этих областях и их движения, где изложен также вопрос о конечности или бесконечности «пространства» и «времени». В масштабах метagalактики геометрия пространства изменяется со временем вследствие расширения метagalактики.

Таким образом, развитие физики и астрономии в XX веке доказало несостоятельность как априоризма Канта, т. е. понимания «пространства» и «времени», как априорных форм человеческого восприятия, природа которых неизменна и независима от материи, так и «ньютоновой» догматической концепции «пространства» и «времени».

Связь «пространства» и «времени» с материей выражается не только в зависимости законов физики от общих закономерностей, определяющих взаимодействия материальных объектов. Она проявляется и в наличии характерного ритма существования материальных объектов и процессов - типичных для каждого класса объектов средних времён жизни и средних пространственных размеров.

Из изложенного следует, что «пространству» и «времени» присущи общие физические закономерности, относящиеся ко всем объектам и процессам. Это касается и проблем, связанных с топологическими свойствами «пространства» и «времени». Проблема границы (соприкосновения) отдельных объектов и процессов непосредственно связана с поднимавшимся ещё в древности вопросом о конечной или бесконечной делимости «пространства» и «времени», их дискретности и/или непрерывности. Ещё Лейбниц полагал, что хотя «пространство» и «время» делимы неограниченно, но реально не могут быть разделены на отдельные точки, так как в природе нет объектов и явлений, лишённых размера и длительности, а понятие точки – это математический образ, не имеющий размера. Тем не менее, из представлений о неограниченной делимости «пространства» и «времени» следует, что и границы тел и явлений абсолютны.

Проблема реальной делимости «пространства» и «времени» была решена только в XXв. в связи с открытием в квантовой механике соотношения

неопределённостей, согласно которому для абсолютно точной локализации микрочастицы необходимы бесконечно большие импульсы, что физически не может быть осуществлено. Более того, современная физика элементарных частиц показывает, что при очень сильных воздействиях на частицу она вообще не сохраняется, а происходит даже множественное рождение частиц. В действительности не существует реальных физических условий, при которых можно было бы измерить точное значение напряжённостей поля в каждой точке. Т. о., в современной физике установлено, что невозможна не только реальная разделённость «пространства» и «времени» на точки, но принципиально невозможно осуществить и процесс их реального бесконечного разделения. Следовательно, геометрическое понятия точки, кривой и/или поверхности являются абстракциями, отражающими пространственные свойства материальных объектов лишь приближённо. В действительности объекты отделены друг от друга не абсолютно, а лишь относительно. То же справедливо и по отношению к моментам времени. Именно такой взгляд на «точечность» (локальность) событий вытекает из так называемой теории нелокального поля.

Одновременно с идеей «нелокальности» взаимодействия разрабатывается гипотеза о квантовании «пространства» и «времени», т. е. о существовании наименьших длин и длительностей. Сначала предполагали, что «квант» длины есть величина $\sim 10^{-13}$ см (порядка классического радиуса электрона или порядка «длины» сильного взаимодействия). Однако с помощью современных ускорителей заряженных частиц исследуются явления, связанные с длинами 10^{14} - 10^{15} см; поэтому значения кванта длины стали отодвигать ко всё меньшим значениям ($\sim 10^{-17}$ см, «длина» слабого взаимодействия, и даже $\sim 10^{-33}$ см).

Решение вопроса о квантовании «пространства» и «времени» тесно связано с проблемами структуры элементарных частиц. Появились исследования, в которых вообще отрицается применимость к субмикроскопическому миру понятий «пространства» и «времени». Однако

понятия «*пространства*» и «*времени*» не должны сводиться ни к метрическим, ни к топологическим отношениям известных типов.

Тесная взаимосвязь пространственно-временных свойств и природы взаимодействия объектов обнаруживается также и при анализе симметрии «*пространства*» и «*времени*». Ещё в 1918 (Э. Нетер) было доказано, что однородности пространства соответствует закон сохранения импульса, однородности времени - закон сохранения энергии, изотропности пространства - закон сохранения момента количества движения. Т. о., типы симметрии «*пространства*» и «*времени*», как общих форм координации объектов и процессов взаимосвязаны с важнейшими законами сохранения. Симметрия пространства при зеркальном отражении оказалась связанной с существенной характеристикой микрочастиц - с их *чётностью*.

Ещё одной важной проблемой «*пространства*» и «*времени*» является вопрос о направленности течения времени. В «*ньютоновой*» концепции это свойство времени считалось само собой разумеющимся и не нуждающимся в обосновании. У Лейбница необратимость течения времени связывалась с однозначной направленностью цепей причин и следствий. Современная физика конкретизировала и развила это обоснование, связав его с современным пониманием *причинности*. По-видимому, направленность времени связана с такой интегральной характеристикой материальных процессов, как *развитие*, являющееся принципиально необратимым.

К проблемам, обсуждавшимся ещё в древности, относится и вопрос о числе измерений «*пространства*» и «*времени*». В «*ньютоновой*» концепции это число считалось изначальным. Аристотель обосновывал трехмерность пространства числом возможных сечений (делений) тела. Интерес к этой проблеме возрос в XX веке с развитием *топологии*. Л. Брауэр установил, что размерность пространства есть топологический инвариант - число, не изменяющееся при непрерывных и взаимно однозначных преобразованиях пространства. В ряде исследований была показана связь между числом измерений пространства и структурой электромагнитного поля (Г. Вейль),

между трехмерностью пространства и спиральностью элементарных частиц. Всё это показало, что число измерений «пространства» и «времени» неразрывно связано с материальной структурой окружающего нас мира и изменениями материи (движением).

§ 1.2. Атрибутивные характеристики материи

1.2.1. Пространство

Окружающий нас мир представляется огромным и сложным. Это своего рода гигантская арена, на которой разыгрываются события самого различного масштаба. Не будем сейчас подробно останавливаться на доказательствах и измерениях, которые позволили бы определить численный масштаб физических процессов, происходящих во Вселенной. Самое замечательное в этих числах - это то, что мы их вообще знаем. И не имеет решающего значения, что некоторые из них мы знаем только приближенно.

Большие расстояния

Размеры Вселенной огромны. Из астрономических наблюдений известно, что это величина порядка 10^{28} см, или 10^{10} «световых лет», - это характеристическая длина, которую иногда называют радиусом Вселенной. Для сравнения укажем, что расстояние Земли от Солнца равно $1,5 \cdot 10^{13}$ см, а радиус Земли равен $6,4 \cdot 10^8$ см. Луна удалена от нас на расстояние $4 \cdot 10^8$ м [1].

Под расстоянием мы понимаем то, что можно измерить в метрах. Но как, например, измерить метром расстояние между вершинами двух гор? Здесь на помощь приходит метод триангуляция для измерения расстояний.

В последний год достигнуты большие успехи в определении масштаба солнечной системы. В Лаборатории ракетных двигателей с помощью прямой радиолокационной связи были проведены очень точные измерения расстояния от Земли до Венеры. Здесь мы имеем дело еще с одним определением понятия «расстояние». Нам известна скорость

распространения света (а стало быть, и скорость распространения радиоволн), и мы предполагаем, что эта скорость постоянна на всем протяжении между Землей и Венерой. Послав радиоволну по направлению к Венере, мы считаем время до прихода отраженной волны. А зная время и скорость, мы получаем расстояние.

А как измерить расстояние до еще более отдаленных объектов, например до звезд? К счастью, здесь снова можно возвратиться к нашему методу триангуляции, ибо движение Земли вокруг Солнца позволяет измерить расстояние до объектов, находящихся вне солнечной системы. Если мы направим телескоп на некую звезду один раз зимой, а другой раз летом (рис. 2), то можно надеяться достаточно точно измерить углы и определить расстояние до этой звезды.

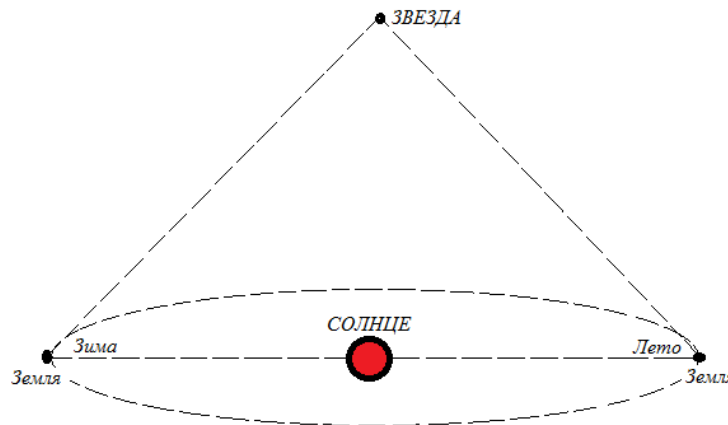


Рис. 2. Определение расстояния до ближайшей звезды методом триангуляции (В качестве базы используется диаметр орбиты Земли)

Но что делать, если звезда находится настолько далеко от нас, что уже невозможно пользоваться методом триангуляции? Астрономы всегда изобретают все новые и новые способы определения расстояний. Так, они научились определять размер и яркость звезд по их цвету. Оказалось, что цвет и истинная яркость многих близлежащих звезд, расстояние до которых определялось методом триангуляции, в большинстве случаев связаны между собой гладкой зависимостью. Если теперь измерить цвет отдаленной звезды, то по этой зависимости можно определить ее истинную яркость, а измеряя видимую яркость звезды (вернее, по тому, насколько звезда нам кажется

тусклой), можно вычислить расстояние до нее. (Видимая яркость, по отношению к истинной яркости уменьшается как квадрат расстояния.) Правильность этого метода нашла неожиданное подтверждение в результатах измерений, проведенных для группы звезд, известных под названием «шарового скопления» [1]. Фотография этой группы звезд приведена на рис. 3.

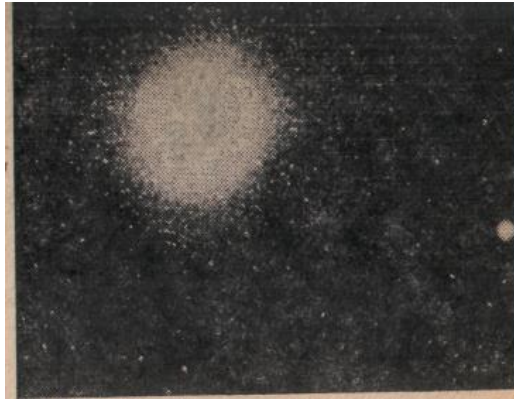


Рис. 3. Скопление звезд вблизи центра нашей Галактики, удаленное от нас на расстояние 30000 световых лет, или около $3 \cdot 10^{20}$ м.[1]

Достаточно взглянуть на фотографию, чтобы убедиться, что все эти звезды расположены в одном месте. Тот же результат получается и с помощью метода сравнения цвета и яркости.

Изучение многих шаровых скоплений дает еще одну важную информацию. Оказалось, что существует участок неба с большой концентрацией таких шаровых скоплений, причем большинство из них находится на одном и том же расстоянии от нас.

Сравнивая эти данные с некоторыми другими, мы приходим к заключению, что эти скопления являются центром нашей Галактики. Таким образом, мы определяем, что расстояние до центра нашей Галактики составляет приблизительно 10^{20} м.

Данные о размере нашей Галактики дают ключ к определению еще больших межгалактических расстояний. На рис. 4 приведена фотография галактики, которая по форме очень похожа на нашу Галактику. Возможно, что и размер ее тот же.

Есть еще ряд соображений, согласно которым размеры всех галактик приблизительно одинаковы. А если это так, то можно узнать расстояние до нее.

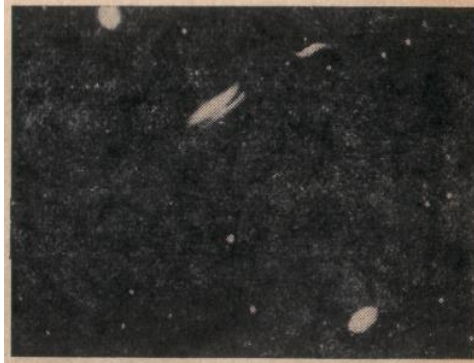


Рис. 4. Спиральная галактика, подобная нашей[1]

Мы измеряем угловой размер галактики (т. е. угол, который она занимает на небесном своде), знаем ее диаметр, а стало быть, можем вычислить расстояние. Опять та же триангуляция!

Если предположить, что диаметр этой галактики равен диаметру нашей Галактики, то, исходя из ее кажущегося размера, можно подсчитать расстояние; оно оказывается равным 30 миллионам световых лет ($3 \cdot 10^{23}$ м)

Недавно с помощью гигантского Паломарского телескопа были получены фотографии невероятно далеких галактик. Одна из этих фотографий приведена на рис. 5.

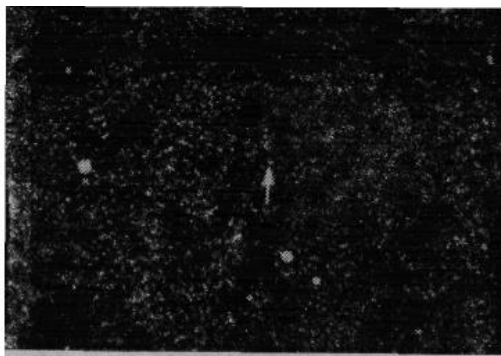


Рис. 5. Наиболее удаленный от нас объект 3С295 в созвездии Волоса (указан стрелкой), который измерялся в 1960 г. с помощью 200-дюймового телескопа [1]

Сейчас полагают, что расстояние до некоторых из них приблизительно равно половине размера Вселенной (10^{26} м) — наибольшего расстояния, которое можно себе представить!

Малые расстояния

Обратимся теперь к малым расстояниям. Подразделить метр просто. Без особых трудностей можно разделить его на тысячу равных частей. Таким же путем, хотя и несколько сложнее (используя хороший микроскоп), можно разделить миллиметр на тысячу частей и получить микрон (миллионную долю метра). Однако продолжать это деление становится трудно, поскольку невозможно «увидеть» объекты, меньшие, чем длина волны видимого света (около $5 \cdot 10^{-7}$ м).

Все же мы не останавливаемся на том, что недоступно глазу. С помощью электронного микроскопа можно получить фотографии, помогающие увидеть и измерить еще меньшие объекты — вплоть до 10^{-8} м (рис. 6).

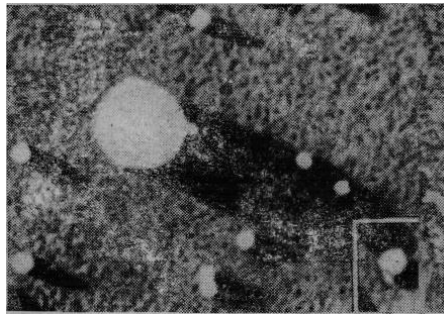


Рис. 6. Фотография вирусов, полученная с помощью электронного микроскопа. Видна «большая» сфера, показанная для сравнения: диаметр ее равен $2 \cdot 10^{-7}$ м, или 2000 \AA [1]

А с помощью косвенных измерений (своего рода триангуляции в микроскопическом масштабе) можно измерять все меньшие и меньшие объекты. Сначала из наблюдений отражения света короткой длины волны (рентгеновских лучей) от образца с нанесенными на известном расстоянии метками измеряется длина волны световых колебаний. Затем по картине рассеяния того же света на кристалле можно определить относительное расположение в нем атомов, причем результат хорошо согласуется с данными о расположении атомов, полученными химическим путем. Таким способом косвенно оценивается диаметр атомов ($\sim 10^{-10}$ м).

Таблица расстояний

<i>Световые годы</i>	<i>Метры</i>	<i>Расстояния</i>

		????
	10^{27}	
		Размеры Вселенной
10^9	10^{24}	
10^6		До ближайшей соседней Галактики
	10^{21}	
		До центра нашей Галактики
10^3		
	10^{18}	
1		До ближайшей Звезды
	10^{15}	
		Радиус орбиты Плутона
	10^{12}	
		До Солнца
	10^9	
		До Луны
	10^6	
		Высота искусственного спутника
	10^3	
		Высота телевизионной башни
		Рост ребёнка
	1	
	10^{-3}	
		Крупинка соли
	10^{-6}	
		Размер вируса
	10^{-9}	
		Диаметр атома
	10^{-12}	
	10^{-15}	Диаметр ядра атома
	10^{-18}	Диаметр электрона
		?????

Дальше в шкале расстояний имеется довольно большая незаполненная «щель» между атомными размерами 10^{-10} м и в 10^5 раз меньшими ядерными размерами ($\sim 10^{-15}$ м). Для определения ядерных размеров применяются уже совершенно другие методы: измеряется видимая площадь σ , или так называемое эффективное поперечное сечение. Если же мы хотим определить радиус, то пользуемся формулой $\sigma = \pi r^2$, поскольку ядра можно приближенно рассматривать как сферические. Эффективные сечения ядер можно определить, пропуская пучок частиц высокой энергии через тонкую пластинку вещества и измеряя число частиц, не прошедших сквозь нее. Эти высокоэнергетические частицы прорываются сквозь легкое облачко электронов, но при попадании в тяжелое ядро останавливаются или отклоняются.

Предположим, что у нас имеется пластинка толщиной 1 см . На такой толщине укладывается приблизительно 10^8 атомных слоев. Однако ядра атомов настолько малы, что вероятность того, что одно ядро закроет другое, очень незначительна. Можно себе представлять, что высокоэнергетическая частица, налетающая на пластинку углерода толщиной 1 см , «видит» приблизительно то, что в сильно увеличенном масштабе показано на рис. 7.

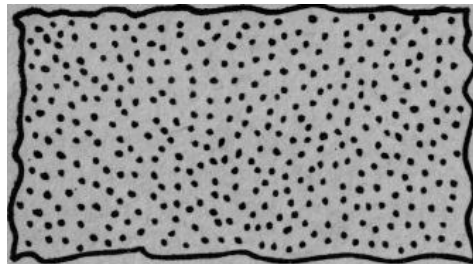


Рис. 7. Воображаемая пластинка углерода толщиной 1 см при сильном увеличении (если бы были видны только ядра атомов)

Вероятность того, что очень малая частица столкнется с ядром, равна отношению площади, занимаемой ядрами (черные точки) к общей площади рисунка. Пусть над областью с площадью A по всей толщине пластинки находится N атомов (разумеется, каждый с одним ядром). Тогда доля площади, закрытая ядрами, будет равна $N\sigma/A$. Пусть теперь число частиц в нашем пучке до пластинки будет равно n_1 , а после нее равно n_2 ; тогда доля частиц, не прошедших через пластинку, будет $(n_1 - n_2)/n_1$, что должно быть равно доле площади, занимаемой ядрами. Радиус же ядер вычисляется из равенства *

$$\pi r^2 = \sigma = \frac{A}{N} \frac{n_1 - n_2}{n_1}. \quad (I.1)$$

(* Это равенство справедливо только тогда, когда площадь, занимаемая ядрами, составляет малую долю общей площади, т. е. $(n_1 - n_2)/n_1$ мною меньше единицы. В противном же случае необходимо учитывать поправку на частичное «загораживание» одного ядра другим.)

Из таких экспериментов мы находим, что радиусы ядер лежат в пределах от $1 \cdot 10^{-15}$ до $6 \cdot 10^{-15}$ м. Кстати, единица длины 10^{-15} м называется *ферми* в честь Энрико Ферми (1901÷1958).

Что можно ожидать в области еще меньших расстояний? Можно ли их измерять? На этот вопрос пока еще нет ответа. Может быть, именно здесь, в каком-то изменении понятия пространства или измерения на малых расстояниях, кроется разгадка тайны ядерных сил.

Но потом оказалось, что результаты измерения расстояний зависят от наблюдателя. Два наблюдателя движущиеся друг относительно друга, измеряя один и тот же предмет, получают разные значения, хотя, казалось бы, мерили одно и то же. Расстояния, в зависимости от системы координат (т.е. системы отсчета), в которой производят измерения, имеют различную величину. То есть, законы природы не позволяют выполнять абсолютно точные измерения расстояний. Оказалось, что ошибка в определении положения места не может быть меньше, чем

$$\Delta x = \frac{h}{\Delta p}, \quad (1.2)$$

где h — малая величина, называемая «постоянной Планка», а Δp — ошибка в измерении импульса (массы, умноженной на скорость) этого предмета. Как уже говорилось, эта неопределенность в измерении положения связана с волновой природой частиц.

1.2.2. Время

Следует признать тот факт, что время — это одно из понятий, которое определить невозможно. Вместе с тем, мы можем просто сказать, что это нечто известное нам: это-то, что отделяет два последовательных события! Дело, однако, не в том, как дать определение понятия «время», а в том, как его измерить.

Один из способов измерить время - это использовать нечто регулярно повторяющееся, нечто периодическое. Например, день. Казалось бы, дни регулярно следуют один за другим. Но, поразмыслив немного, сталкиваешься с вопросом: периодичны ли они? Все ли дни имеют одинаковую длительность?

Короткие времена

Современная электроника позволяет создавать осцилляторы с периодами 10^{-12} сек, которые выверяются (калибруются) методом сравнения на стандартную единицу времени - секунду. В последние несколько лет в связи с изобретением и усовершенствованием «лазера», или усилителя света, появилась возможность сделать осцилляторы с ещё более коротким периодом. Можно измерять промежутки времени, гораздо более короткие, чем 10^{-12} сек.

В сущности, используется другой подход к определению понятия «время». Один из таких подходов - это измерение расстояния между двумя событиями, происходящими на движущемся объекте. Именно таким методом в последние годы измерялось время жизни π^0 -мезона. При наблюдении в микроскоп мельчайших следов, оставленных на фотоэмульсии, в которой родился π^0 -мезон, было обнаружено следующее: π^0 -мезон, двигаясь со скоростью, близкой к скорости света, прежде чем распасться, проходит в среднем расстояние около 10^7 м. Таким образом, время жизни π^0 -мезона составляет всего лишь 10^{-16} сек. Необходимо подчеркнуть, что здесь было использовано несколько другое определение понятия «время», но поскольку оно не приводит к каким-либо противоречиям, можно быть уверенным в том, что эти определения, в достаточной мере, эквивалентны друг другу.

Развивая технику эксперименту, и, если необходимо, меняя определение понятия «время», можно обнаружить ещё более быстрые физические процессы. Мы, например, можем говорить о периоде вибраций ядра или о времени жизни недавно обнаруженных «странных частиц» (резонансов). Время жизни этих частиц лишь ненамного больше 10^{-24} сек. Приблизительно столько времени требуется свету (который имеет наибольшую скорость распространения), чтобы пройти расстояние, равное диаметру ядра водорода (наименьший из известных объектов).

Что можно, сказать о еще более коротких интервалах времени?
Имеет ли смысл вообще говорить о них, если невозможно не только

измерить, но даже разумно судить о процессах, происходящих в течение столь коротких интервалов. Возможно, нет. Это один из тех вопросов, на которые нет ответа.

Большие времена

Рассмотрим теперь промежутки времени, больше «суток». Измерять большие времена легко: нужно просто считать дни, пока не придумаем что-нибудь лучшего. Первое, с чем мы сталкиваемся, это год — вторая естественная периодичность, состоящая приблизительно из 365 дней.

Таблица времён

Годы	Секунды	Временные периоды	Период полураспада веществ
	10^{18}	????	
		Возраст вселенной	
		Возраст Земли	U^{238}
10^9			
	10^{15}		
		Первый человек	
10^6			
	10^{12}	Возраст пирамид	
10^3			Ra^{226}
		Возраст США	
	10^9	Человеческая жизнь	H^3
1			
	10^6		
		Сутки	
	10^3	Свет проходит расстояние от Солнца до Земли	Нейтрон
	1	Один удар сердца	
	10^{-3}	Период звуковой волны	
	10^{-6}	Период радиоволны	μ - мезон $\mu\pm$ - мезон
	10^{-9}	Свет проходит расстояние 1 метр	
	10^{-12}	Период молекулярных вращений	
	10^{-15}	Период атомных колебаний	π^0 - мезон
	10^{-18}	Свет проходит через атом	
	10^{-21}		
		Период ядерных колебаний	
	10^{-24}	Свет проходит через ядро	Странные частицы
		????	

Интересно, что в природе существуют естественные счётчики лет в виде годовых колец у деревьев или отложений речного ила. В некоторых случаях можно использовать эти естественные счётчики для определения времени, отделяющего наше время от какого либо отдаленного события в

прошлом. А когда невозможно сосчитать годы для очень больших отрезков времени, нужно искать какие-то другие способы измерения.

Одним из наиболее эффективных методов является использование в качестве «часов» радиоактивного вещества. Здесь мы сталкиваемся с «регулярностью» иного рода, чем, скажем, маятника. Радиоактивность любого вещества для последовательных равных интервалов времени изменяется в одно и то же число раз.

Если начертить график радиоактивности от времени, то мы получим " кривую типа изображенной на рис. 8. Мы видим, что если радиоактивность за T дней (период полураспада) уменьшается вдвое, то за $2T$ дней она уменьшится в четыре раза, и т. д.

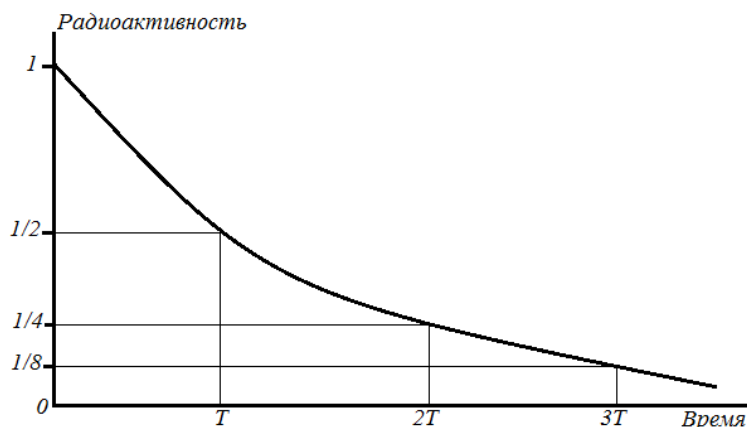


Рис. 8. Уменьшение радиоактивности со временем.
(Радиоактивность уменьшается в два раза за каждый период полураспада)

Произвольный интервал времени t содержит t/T «периодов полураспада», и, следовательно, количество начального вещества уменьшится в $2^{t/T}$ раза.

Если мы знаем, что какой-то материал, например дерево, при своем образовании содержал некоторое количество радиоактивного вещества A , а прямые измерения показывают, что теперь он содержит количество B , то возраст этого материала можно просто вычислить, решив уравнение

$$\left(\frac{1}{2}\right)^{t/T} = \frac{B}{A} \dots \dots \dots (I.3)$$

А такие случаи, когда мы знаем первоначальное количество радиоактивного вещества, к счастью, существуют. Известно, например, что

углекислый газ в воздухе содержит малую долю радиоактивного изотопа C^{14} , период полураспада которого составляет 5000 лет. Количество его благодаря действию космических лучей постоянно пополняется взамен распавшегося. Если мы измеряем полное содержание углерода в каком-то предмете и знаем, что определенная доля этого углерода была первоначально радиоактивным C^{14} , то нам известно и первоначальное количество A и мы можем пользоваться приведенной выше формулой. Если же путем точных измерений установлено, что оставшееся количество C^{14} соответствует 20 периодам полураспада, то можно сказать, что этот органический предмет жил приблизительно 100000 лет назад.

Хотелось бы узнать возраст ещё более древних вещей. Это можно сделать, измерив содержание других радиоактивных элементов с большими периодами полураспада. Уран, например, имеет изотоп с периодом полураспада около 10^9 лет, так что если какой-то материал при своем образовании 10^9 лет назад содержал уран, то сегодня от него осталась только половина первоначального количества. При своем распаде уран превращается в свинец. Как определить возраст горной породы, которая образовалась много-много лет назад в результате какого-то химического процесса? Свинец по своим химическим свойствам отличается от урана, поэтому первоначально они входили в разные виды горных пород. Если взять такой вид породы, который вначале должен содержать только уран, то мы обнаружим в нем некоторое количество свинца. Сравнивая доли свинца и урана, можно определить ту часть урана, которая в результате распада превратилась в свинец. Этим методом было установлено, что возраст некоторых горных пород составляет несколько миллиардов лет. Применяя шире этот метод путем сравнения содержания урана и свинца не только в горных породах, но и в воде океанов, а затем, усредняя различные данные по всему земному шару, установили, что нашей планете исполнилось примерно 5,5 миллиардов лет.

Интересно, что возраст метеоритов, падающих на Землю, вычисленный по урановому методу, совпадает с возрастом самой Земли. Более того, оказалось, что и метеориты, и горные породы Земли составлены из одного и того же материала, поэтому существует мнение, что Земля образовалась из пород, «плававших» некогда в «околосолнечном» пространстве.

Некогда, во времена ещё более древние, чем возраст Земли (т.е. 5 миллиардов лет назад) начала свою историю Вселенная.

Сейчас считают, что возраст, по крайней мере, нашей части Вселенной достигает примерно *10-12 миллиардов лет*. Нам неизвестно, что было до этого. *В сущности, опять можно спросить: «А есть ли смысл говорить о том, что было до этого! И имеет ли смысл само понятие «время» до «рождения» вселенной? Имеет ли смысл понятие «пространства» до «рождения» вселенной?»*

§ 1.3. Материя, взаимодействие и движение

Фундаментальные законы физики

Непосредственное единство пространственно-временных отношений проявляется во взаимодействии и движении материи. Простейшая форма движения – перемещение, характеризуется величинами, которые представляют собой различные отношения «*пространства*» и «*времени*» (скорость, ускорение) и изучаются кинематикой.

Более глубокое единство «*пространства*» и «*времени*» проявляется в совместном закономерном изменении пространственно-временных характеристик систем в зависимости от движения последних, а также в зависимости этих характеристик от концентрации масс в окружающей среде, которые изучаются *динамикой*.

По мере углубления знаний о «*материи*» и «*движении*» изменяются и научные представления о «*пространства*» и «*времени*». Теория относительности позволяет, глубже понять физический смысл и значение вновь открываемых закономерностей взаимодействия и движения материи,

путём установления их связей с общим закономерностями «пространственно-временных» отношений.

1.3.1. Некоторые представления о структуре материального объекта и его внутренними взаимодействиями

Пространственно-временные отношения подчиняются не только общим закономерностям, но и специфическим, характерным для объектов того или иного класса, поскольку эти отношения определяются структурой материального объекта состоящего из атомов и их взаимодействиями. Поэтому такие характеристики, как размеры объекта и его форма, *время жизни*, ритмы процессов, типы симметрии, являются существенными параметрами вещества из которого состоит объект данного типа и условий, в которых он существует [1]. Чтобы показать силу идеи атома, представим себе капельку воды размером 0,5 см. Если мы будем пристально разглядывать ее, то ничего, кроме воды, спокойной, сплошной воды, мы не увидим. Даже под лучшим оптическим микроскопом при 2000-кратном увеличении, когда капля примет размеры большой комнаты, и то мы *все еще* увидим относительно спокойную воду, разве что по ней начнут шнырять какие-то «футбольные мячи». Это парамеция — очень интересная штука. На этом вы можете задержаться и заняться парамецией, ее ресничками, смотреть, как она сжимается и разжимается, и на дальнейшее увеличение махнуть рукой (если только вам не захочется рассмотреть ее изнутри). Парамециями занимается биология, а мы проществуем мимо них и, чтобы еще лучше разглядеть воду, увеличим ее опять в 2000 раз. Теперь капля вырастет до 20 км, и мы увидим, как в ней что-то кишит; теперь она уже не такая спокойная и сплошная, теперь она напоминает толпу на стадионе в день футбольного состязания с высоты птичьего полета. Что же это кишит? Чтобы рассмотреть получше, увеличим еще в 250 раз. Нашему взору представится нечто похожее на рис. 9.

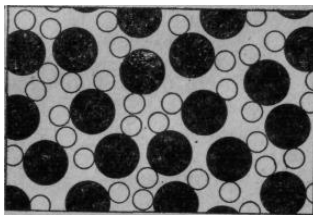


Рис. 9. Капля воды (увеличенная в миллиард раз).

Это капля воды, увеличенная в миллиард раз, но, конечно, картина эта условная. Прежде всего частицы изображены здесь упрощенно, с резкими краями — это *первая неточность*. Для простоты они расположены на плоскости, на самом же деле они блуждают во всех трех измерениях — *вторая неточность*. На рисунке видны «кляксы» (или кружочки) двух сортов — черные (кислород) и белые (водород); видно, что к каждому кислороду пристроились два водорода. (Такая группа из атома кислорода и двух атомов водорода называется молекулой.) Наконец, *третье упрощение* заключается в том, что настоящие частицы в природе непрерывно дрожат и подпрыгивают, крутятся и вертятся одна вокруг другой. Вы должны представить себе на картинке не покой, а движение. На рисунке нельзя также показать, как частицы «липнут друг к другу», притягиваются, пристают одна к одной и т. д. Можно сказать, что целые их группы чем-то «склеены». Однако ни одно из телец не способно протиснуться сквозь другое. Если вы попытаете насильно прижать одно к другому, они оттолкнутся.

Радиус атомов примерно равен 1 или 2 на 10^{-8} см. Величина 10^{-8} см это *ангстрем*, так что радиус атома равен 1 или 2 *ангстремам* (А°). А вот другой способ запомнить размер атома: если яблоко увеличить до размеров Земли, то атомы яблока сами станут размером с яблоко.

Представьте теперь себе эту каплю воды с ее частичками, которые приплясывают, играют в пятнашки и льнут одна к другой. Вода сохраняет свой объем и не распадается на части именно из-за взаимного притяжения молекул. Даже катясь по стеклу, капля не растекается, опять-таки из-за притяжения. И все вещества не улетучиваются по той же причине. Движение частиц в теле мы воспринимаем как *теплоту*; чем выше температура, тем

сильнее движение. При нагреве воды толчея среди частиц усиливается, промежутки между ними растут, и наступает миг, когда притяжения между молекулами уже не хватает, чтобы удержать их вместе, вот тогда они и *улетучиваются*, удаляются друг от друга. Так получают водяной пар: при повышении температуры усиливается движение и частицы воспаряют.

На рис. 10 показан пар. Рисунок этот плох в одном — при выбранном нами увеличении на комнату придется всего несколько молекул, поэтому сомнительно, чтобы целых 2,5 молекулы оказались на таком маленьком рисунке. На такой площадке скорее всего не окажется ни одной частицы. Но ведь надо что-то нарисовать, чтобы рисунок не был совсем пустым.

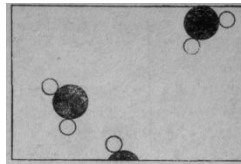


Рис. 10. Пар под микроскопом

Глядя на пар, легче увидеть характерные черты молекул воды. Для простоты на рисунке угол между атомами водорода взят 120° . На самом же деле он равен $105^\circ 3'$, а промежуток между центрами атомов кислорода и водорода равен $0,957 \text{ \AA}$. Как видите, мы довольно хорошо представляем себе эту молекулу.

Давайте рассмотрим некоторые свойства водяного пара или других газов. Разрозненные молекулы пара то и дело ударяются о стенки сосуда. Представьте себе комнату, в которой множество теннисных мячей (порядка сотни) беспорядочно и непрерывно прыгают повсюду. Под градом ударов стенки расходятся (так что их надо придерживать). Эту неумолкаемую дробь ударов атомов наши грубые органы чувств (их-то чувствительность не возросла в миллиард раз) воспринимают как постоянный напор. Чтобы сдержать газ в его пределах, к нему нужно приложить давление. На рис. 11 показан обычный сосуд с газом (без него не обходится ни один учебник) — цилиндр с поршнем. Молекулы для простоты изображены теннисными

мячиками, или точечками, потому что форма их не имеет значения. Они движутся беспорядочно и непрерывно.

Множество молекул непрерывно колотит о поршень. Их непрекращающиеся удары вытолкнут его из цилиндра, если не приложить к поршню некоторую силу — давление (сила, собственно, — это давление, умноженное на площадь). Ясно, что сила пропорциональна площади поршня, потому что если увеличить его площадь, сохранив то же количество молекул в каждом кубическом сантиметре, то и число ударов о поршень возрастет во столько же раз, во сколько расширилась площадь.

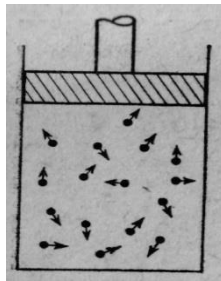


Рис. 11. Цилиндр с поршнем

А если в сосуде число молекул удвоится (и соответственно возрастет их плотность), а скорости их (и соответственно температура) останутся прежними? Тогда довольно точно удвоится и число ударов, а так как каждый из них столь же «энергичен», как и раньше, то выйдет, что давление пропорционально плотности. Если принять во внимание истинный характер сил взаимодействия атомов, то следует ожидать и небольшого спада давления из-за увеличения притяжения между атомами и легкого роста давления из-за увеличения доли общего объема, занятого самими атомами. И все же в хорошем приближении, когда атомов сравнительно немного (т. е. при невысоких давлениях), давление пропорционально плотности.

Легко понять и нечто другое. Если повысить температуру газа (скорость атомов), не меняя его плотности, что произойдет с давлением? Двигаясь быстрее, атомы начнут бить по поршню сильнее; к тому же удары посыплются чаще — и давление возрастет. Вы видите, до чего просты идеи атомной теории.

А теперь рассмотрим другое явление. Пускай поршень медленно двинулся вперед, заставляя атомы тесниться в меньшем объеме. Что бывает, когда атом ударяет по ползущему поршню? Ясно, что после удара его скорость повышается. Можете это проверить, играя в пинг-понг: после удара ракеткой шарик отлетает от ракетки быстрее, чем подлетал к ней. (Частный пример: неподвижный атом после удара поршня приобретает скорость.) Стало быть, атомы, отлетев от поршня, становятся «горячее», чем были до толчка. Поэтому все атомы в сосуде наберут скорость. Это означает, что при медленном сжатии газа его температура растет. Когда медленно сжимаешь газ, его температура повышается, а когда медленно расширяешь, температура падает.

Вернемся к нашей капельке воды и посмотрим, что с ней будет, когда температура понизится. Положим, что толчея среди молекул воды постепенно утихает. Меж ними, как мы знаем, существуют силы притяжения; притянувшись друг к другу молекулам уже нелегко покачиваться и прыгать. На рис. 12 показано, что бывает при низких температурах; мы видим уже нечто новое. Образовался лед. Конечно, картинка эта опять условна — у льда не два измерения, как здесь изображено, но в общих чертах она справедлива.

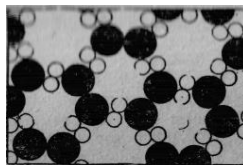


Рис. 12. Молекулы льда

Интересно, что в этом веществе у каждого атома есть свое место, и если каким-то образом мы расставим атомы на одном конце капли каждый на свое место, то за многие километры от него на другом конце (в нашем увеличенном масштабе) из-за жесткой структуры атомных связей тоже возникнет определенная правильная расстановка. Поэтому если потянуть за один конец ледяного кристалла, то за ним, противясь разрыву, потянется и другой — в отличие от воды, в которой эта правильная расстановка разрушена интенсивными движениями атомов. Разница между твердыми и

жидкими телами состоит в том, что в твердых телах атомы расставлены в особом порядке, называемом кристаллической структурой, и даже в том случае, когда они находятся далеко друг от друга, ничего случайного в их размещении не наблюдается — положение атома на одном конце кристалла определяется положением атомов на другом конце, пусть между ними находятся хоть миллионы атомов. В жидкостях же атомы на дальних расстояниях сдвинуты как попало. На фиг. 12 расстановка молекул льда мною выдумана, и хотя кое-какие свойства льда здесь отражены, но в общем она неправильна. Верно схвачена, например, часть шестигранной симметрии кристаллов льда. Посмотрите: если повернуть картинку на 120° , получится то же самое расположение. Таким образом, лед имеет симметрию, вследствие которой снежинки все шестигранны. Из рис. 12 можно еще понять, отчего, растаяв, лед занимает меньший объем. Смотрите, как много «пустот» на рисунке; у настоящего льда их тоже много. Когда система разрушается, все эти пустоты заполняются молекулами. Большинство простых веществ, за исключением льда и галта (типографского сплава), при плавлении расширяется, потому что в твердых кристаллах атомы упакованы плотнее, а после плавления им понадобится место, чтобы колебаться; сквозные же структуры, наподобие льда, разрушаясь, становятся компактнее.

Но хотя лед обладает «жесткой» кристаллической структурой, его температура может тоже меняться, в нем есть запас тепла. Этот запас можно менять по своему желанию. Что же это за тепло? Атомы льда все равно не находятся в покое. Они дрожат и колеблются. Даже когда существует определенный порядок в кристалле (структура), все атомы все же колеблются «на одном месте». С повышением температуры размах их колебаний все растет, пока они не стронутся с места. Это называется плавлением. Наоборот, с падением температуры колебания все замирают, пока при абсолютном нуле температуры они не станут наименьшими из возможных (хотя полной остановки не наступит).

Этого минимального количества движения не хватает, чтобы растопить тело. Но есть одно исключение — гелий. Гелий при охлаждении тоже уменьшает движение своих атомов до предела, но даже при абсолютном нуле в них оказывается достаточный запас движения, чтобы предохранить гелий от замерзания. Гелий не замерзает и при абсолютном нуле, если только не сжимать его под высоким давлением. Повышая давление, можно добиться затвердения гелия.

Так с атомной точки зрения описываются твердые, жидкие и газообразные тела. Но атомная гипотеза описывает и процессы, и мы теперь рассмотрим некоторые процессы с атомных позиций.

Атомные процессы

Первым делом речь пойдет о процессах, происходящих на поверхности воды. Что здесь происходит? Мы усложним себе задачу, приблизим ее к реальной действительности, предположив, что над поверхностью находится воздух. Взгляните на рис. 13. Мы по-прежнему видим молекулы, образующие толщу воды, но, кроме того, здесь изображена и ее поверхность, а над нею - различные молекулы: прежде всего молекулы воды в виде водяного пара, который всегда возникает над водной поверхностью (пар и вода находятся в равновесии, о чем мы вскоре будем говорить).

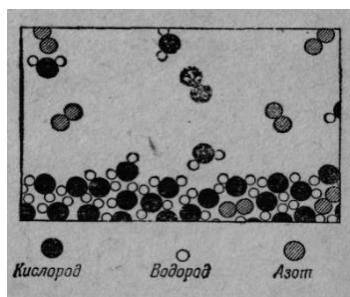


Рис. 13. Молекулы воды, испаряющейся в воздух

Кроме того, над водой витают и другие молекулы - то скрепленные воедино два атома кислорода, образующие молекулу кислорода, то два атома азота тоже слипшиеся в молекулу азота. Воздух почти весь состоит из азота,

кислорода, водяного пара и меньших количеств углекислого газа, аргона и прочих примесей.

Итак, над поверхностью воды, находится воздух — газ, содержащий некоторое количество водяного пара. Что происходит на этом рисунке? Молекулы воды непрерывно движутся. Время от времени какая-нибудь из молекул близ поверхности получает толчок сильнее остальных и выскакивает вверх. На рисунке этого, конечно, не видно, потому что здесь все неподвижно. Но попробуйте просто представить себе, как одна из молекул только что испытала удар и взлетает вверх, с другой случилось то же самое и т. д. Так, молекула за молекулой, вода исчезает — она испаряется. Если закрыть сосуд, мы обнаружим среди молекул находящегося в нем воздуха множество молекул воды. То и дело некоторые из них снова попадают в воду и остаются там. То, что казалось нам мертвым и неинтересным (скажем, прикрытый чем-нибудь стакан воды, который, может быть, 20 лет простоял на своем месте), на самом деле таит в себе сложный и интересный, беспрерывно идущий динамический процесс. Для нашего грубого глаза в нем ничего не происходит, но стань мы в миллиард раз зорче, мы бы увидели, как все меняется: одни молекулы взлетают, другие оседают.

Почему же мы не видим этих изменений? Да потому, что сколько взлетает молекул, столько же и оседает! В общем-то там «ничего не происходит». Если раскрыть стакан и сдуть влажный воздух, на смену ему притечет уже сухой; число молекул, покидающих воду, останется прежним (оно ведь зависит только от движения в воде), а число возвращающихся молекул сильно уменьшится, потому что их уже над водой почти не будет. Число улетающих молекул превысит число оседающих, вода начнет испаряться. Мораль: если вам нужно испарять воду, включайте вентилятор!

Но это еще не все. Давайте подумаем, какие молекулы вылетают из воды? Если уж молекула выскочила, то это значит, что она случайно вобрала в себя излишек энергии; он ей понадобился, чтобы разорвать путы притяжения соседей. Энергия вылетающих молекул превосходит среднюю

энергию молекул в воде, поэтому энергия остающихся молекул ниже той, которая была до испарения. Движение их уменьшается. Вода от испарения постепенно остывает. Конечно, когда молекула пара опять оказывается у поверхности воды, она испытывает сильное притяжение и может снова попасть в воду. Притяжение разгоняет ее, и в итоге возникает тепло. Итак, уходя, молекулы уносят тепло; возвращаясь — приносят. Когда стакан закрыт, баланс сходится, температура воды не меняется. Если же дуть на воду, чтобы испарение превысило оседание молекул, то вода охлаждается. Мораль: чтобы остудить суп, дуйте на него!

Вы понимаете, конечно, что на самом деле все происходит гораздо сложнее, чем здесь описано. Не только вода переходит в воздух, но молекулы кислорода или азота время от времени переходят в воду и «теряются» в массе молекул воды. Попадание атомов кислорода и азота в воду означает растворение воздуха в воде; если внезапно из сосуда воздух выкачать, то молекулы воздуха начнут из воды выделяться быстрее, чем проникают в нее; мы увидим, как наверх поднимаются пузырьки. Вы, наверно, слышали, что это явление очень вредно для ныряльщиков.

Перейдем теперь к другому процессу. На рис. 14 мы видим, как (с атомной точки зрения) соль растворяется в воде. Что получается, если в воду бросить кристаллик соли?

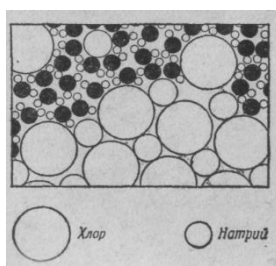


Рис. 14. Молекулы соли, растворяющейся в воде.

Строго говоря, кристалл состоит не из атомов, а из ионов. Ионы — это атомы с избытком или с нехваткой электронов. В кристалле соли мы находим ионы хлора (атомы хлора с лишним электроном) и ионы натрия (атомы натрия, лишенные одного электрона). Ионы в твердой соли

скреплены друг с другом электрическим притяжением, но в воде некоторые из них, притянувшись к положительному водороду или отрицательному кислороду, начинают свободно двигаться.

На рис. 14 виден освободившийся ион хлора и другие атомы, плавающие в воде в виде ионов. На рисунке нарочно подчеркнуты некоторые детали процесса. Заметьте, например, что водородные концы молекул воды обычно обступают ион хлора, а возле иона натрия чаще оказывается кислород (ион натрия положителен, а атом кислорода в молекуле воды отрицателен, поэтому они притягиваются). Можно ли из рисунка понять, растворяется ли здесь в воде или же выкристаллизовывается из воды? Ясно, что нельзя; часть атомов уходит из кристалла, часть присоединяется к нему. Процесс этот динамический, подобный испарению; все зависит от того, много или мало соли в воде, в какую сторону нарушено равновесие. Под равновесным понимается такое состояние, когда количество уходящих атомов равно количеству приходящих. Если в воде почти нет соли, то больше атомов уходит в воду, чем возвращается из воды: соль растворяется. Если же «атомов соли» слишком много, то приход превышает уход, и соль выпадает в кристаллы.

Мы мимоходом упомянули, что понятие молекулы вещества не совсем точно и имеет смысл только для некоторых видов веществ. Оно применимо к воде, в ней действительно три атома всегда скреплены между собой, но оно не очень подходит к твердому хлористому натрию. Хлористый натрий - это ионы хлора и натрия, образующие кубическую структуру. Нельзя естественным путем сгруппировать их в «молекулы соли».

Вернемся к вопросу о растворении и осаждении соли. Если повысить температуру раствора соли, то возрастет и число растворяемых атомов и число осаждаемых. Оказывается, что в общем случае трудно предсказать, в какую сторону сдвинется процесс, быстрее или медленнее пойдет растворение. С ростом температуры большинство веществ начинает растворяться сильнее, а у некоторых растворимость падает.

Химические реакции

Во всех описанных процессах атомы и ионы не меняли своих напарников. Но, конечно, возможны обстоятельства, в которых сочетания атомов меняются, образуя новые молекулы. Процесс, в котором атомные партнеры меняются местами, называется химической реакцией. Это показано на рис. 15.

Описанные нами прежде процессы называются физическими, но трудно указать резкую границу между теми и другими. (Природе все равно, как мы это назовем, она просто делает свое дело.) На картинке мы хотели показать, как уголь горит в кислороде. Молекула кислорода состоит из двух атомов, сцепленных очень крепко. (А почему не из трех или даже не из четырех? Такова одна из характерных черт атомных процессов: атомы очень разборчивы, им нравятся определенные партнеры, определенные направления и т. д. Одна из обязанностей физики — разобраться, почему они хотят именно то, что хотят. Во всяком случае два атома кислорода, довольные и насыщенные, образуют молекулу.)

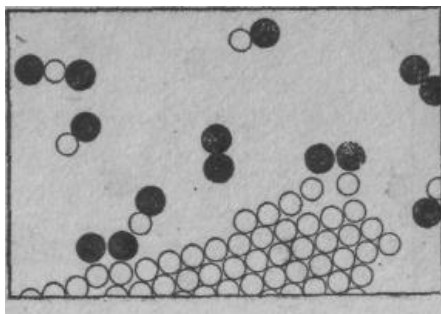


Рис. 15. Уголь, горящий в кислороде

Предположим, что атомы углерода образуют твердый кристалл (графит или алмаз). Одна из молекул кислорода может пробраться к углероду, каждый ее атом подхватит по атому углерода и улетит в новом сочетании углерод — кислород. Такие молекулы образуют газ, называемый угарным. Его химическое имя CO. Что это значит? Буквы CO — это фактически картинка такой молекулы: C — углерод, O — кислород. Но углерод притягивает к себе кислород намного сильнее, чем кислород притягивает

кислород или углерод — углерод. Поэтому кислород для этого процесса может поступать с малой энергией, но, схватываясь с невероятной жадностью и страстью с углеродом, высвобождает энергию, поглощаемую всеми соседними атомами. Образуется большое количество энергии движения (кинетической энергии). Это, конечно, и есть горение; мы получаем тепло от сочетания кислорода и углерода. Теплота в обычных условиях проявляется в виде движения молекул нагретого газа, но иногда ее может быть так много, что она вызывает и свет. Так получается пламя.

Вдобавок молекулы CO могут не удовольствоваться достигнутым. У них есть возможность подсоединить еще один атом кислорода; возникает более сложная реакция: кислород в паре с углеродом столкнется с другой молекулой CO. Атом кислорода присоединится к CO и в конечном счете образуется молекула из одного углерода и двух кислородов. Ее обозначают CO_2 и называют углекислым газом. Когда углерод сжигают очень быстро (скажем, в моторе автомашины, где взрывы столь часты, что углекислота не успевает образоваться), то возникает много угарного газа. Во многих таких перестановках атомов выделяется огромное количество энергии, наблюдаются взрывы, вспыхивает пламя и т. д.; все зависит от реакции.

Химики изучили эти расположения атомов и установили, что любое вещество — это свой тип расположения атомов.

Чтобы объяснить эту мысль, рассмотрим новый пример. У клумбы фиалок вы сразу чувствуете их «запах». Это значит, что в ваш нос попали молекулы, или расположения атомов особого рода. Как они туда попали? Ну, это просто. Раз запах — это молекулы особого рода, то, двигаясь и сталкиваясь повсюду, они случайно могли попасть и в нос. Конечно, они не стремились попасть туда. Это просто беспомощные толпы молекул, и в своих бесцельных блужданиях эти осколки вещества, случается, оказываются и в носу.

И вот химики могут взять даже такие необычные молекулы, как молекулы запаха фиалок, проанализировать их строение и описать нам

точное расположение их атомов в пространстве. Мы, например, знаем, что молекула углекислого газа пряма и симметрична: $O—C—O$ (это легко обнаружить и физическими методами). Но и для безмерно более сложных, чем те, с которыми имеет дело химия, расположений атомов можно после долгих увлекательных поисков понять, как выглядит это расположение. На рис. 16 изображен воздух над фиалками. Снова мы находим здесь азот, кислород, водяной пар... (А он-то откуда здесь? От влажных фиалок. Все растения испаряют воду.)

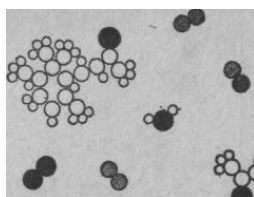


Рис. 16. Запах фиалки

Среди них, однако, витает «чудовище», сложенное из атомов углерода, водорода и кислорода, облюбовавших для себя особого вида расположение. Это расположение намного сложнее, чем у углекислоты. К сожалению, мы не можем его нарисовать: хотя оно известно химикам очень точно, но оно ведь трехмерное, как его изобразить в двух измерениях?! Как нарисовать шесть углеродов, которые образуют кольцо, но не плоское, а «гармошкой»? Все углы, все расстояния в ней известны. Так вот, химическая формула — это просто картина такой молекулы. Когда химик пишет формулу на доске, он, грубо говоря, пытается нарисовать молекулу в двух измерениях. Например, мы видим кольцо из шести углеродов; углеродную цепочку, свисающую с одного конца; кислород, торчащий на конце цепочки; три водорода, привязанные вон к тому углероду; два углерода и три водорода, прилепленные вот здесь, и т. д.

Как же химик узнает, что это за расположение? Возьмет он две пробирки с веществом, сольет их содержимое и смотрит: если смесь покраснела, значит, к такому-то месту молекулы прикреплен один водород и два углерода; если посинела, то... то это ничего не значит. Органическая

химия может поспорить с самыми фантастическими страницами детективных романов. Чтобы узнать, как расположены атомы в какой-нибудь невероятно сложной молекуле, химик смотрит, что будет, если смешать два разных вещества! Да физик нипочем не поверит, что химик, описывая расположение атомов, понимает, о чем говорит. Но вот уже больше 20 лет, как появился физический метод, который позволяет разглядывать молекулы (не такие сложные, но, по крайней мере, родственные) и описывать расположение атомов не по цвету раствора, а по измерению расстояний между атомами. И что же? Оказалось, что химики почти никогда не ошибаются! Оказывается, что действительно в запахе фиалок присутствуют три слегка различные молекулы, они отличаются только расстановкой атомов водорода.

Одна из проблем в химии — это придумать такое название для вещества, чтобы по нему можно было бы узнать, какое оно. Найти имя для его формы! Но оно должно описывать не только форму, а указывать еще, что здесь стоит кислород, а вон там — водород, чтобы было точно отмечено, где что стоит. Теперь вы понимаете, почему химические названия так сложны. Это не сложность, а полнота. Название молекулы запаха фиалок поэтому таково: 4-(2,2,3,6-тетраметил-5-циклогексан)-3-бутен-2-ОН. Оно полностью описывает строение молекулы (изображенной на рис. 16), а его длина объясняется сложностью молекулы (рис.17).

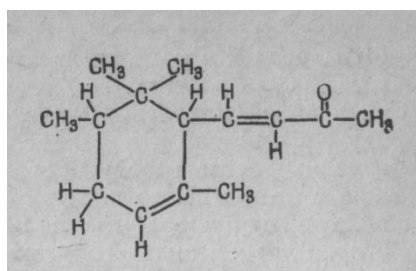


Рис. 17. Структурная формула запаха фиалки

Дело, значит, вовсе не в том, что химики хотят затуманить мозги, просто им приходится решать сложнейшую задачу описания молекулы словами!

Но откуда мы все-таки знаем, что атомы существуют? А здесь идет в ход уже описанный прием: мы предполагаем их существование, и все результаты один за другим оказываются такими, как мы предскажем, — какими они должны быть, если все состоит из атомов. Существуют и более прямые доказательства. Вот одно из них. Атомы так малы, что ни в какой микроскоп их не увидишь (даже в электронный, а уж в световой и подавно). Но атомы все время движутся, и если бросить в воду большой шарик (большой по сравнению с атомами), то и он начнет подрагивать. Все равно как в игре в пушбол, где большущий мяч толкают с разных сторон две команды. Толкают в разных направлениях, и куда мяч покатится, не угадаешь. Точно так же будет двигаться и «большой мяч» в воде: в разные моменты времени с разных сторон на него будут сыпаться неодинаковые удары. Поэтому когда мы глядим в хороший микроскоп на мельчайшие частички в воде, то видим их непрерывное метание — итог бомбардировки их атомами. Называется это броуновским движением.

Движение

Чтобы найти законы, управляющие различными изменениями, происходящими с течением времени, нужно сначала описать эти изменения и придумать какой-то способ их записи. Начнем с самого простого изменения, которое происходит с телом, — с изменения его положения в пространстве, т. е. того, что мы называем движением. Рассмотрим движущийся предмет, на который нанесена маленькая отметка; ее мы будем называть точкой. Неважно, будет ли это кончик радиатора автомобиля или центр падающего шара. Мы будем пытаться описать тот факт, что она движется, и как это происходит.

На первый взгляд это кажется совсем просто, однако в описании изменений есть много хитростей. Некоторые изменения описать труднее, нежели движение точки на твердом предмете. Например, как описать движение облака, которое не только медленно перемещается, но вдобавок

еще изменяет свои очертания или испаряется? Или как описать капризы женского ума? Впрочем, поскольку изменения облака хотя бы в принципе можно описать с помощью движения всех отдельных молекул его составляющих, то вполне возможно, что и изменения мыслей обусловлены тоже какими-то перемещениями атомов в мозгу, хотя мы еще не знаем простого способа их описания.

С точки зрения современного состояния науки взаимодействие тел осуществляется посредством полей и передается с конечной скоростью — со скоростью света; совокупность тел и полей представляет собой единую материальную систему. Под влиянием взаимодействия тела могут изменять свое расположение относительно друг друга, т. е. перемещаться в пространстве.

Вместе с тем *изменение относительного расположения материальных объектов обладает длительностью*, т. е. перемещение происходит не только в пространстве, но и во времени.

Классическая механика изучает такие перемещения тел в пространстве и времени, при которых процесс передачи взаимодействия тел можно считать практически мгновенным; тем самым процессы, протекающие в самих полях, мы можем не рассматривать. Несмотря на это ограничение, область применимости классической механики очень велика. Единственное ограничение в том, чтобы скорости перемещения тел были малы по сравнению со скоростью света.

Отметим особо также то, что большое количество понятий и аналитических приемов классической механики с успехом используется в других разделах теоретической физики.

1.3.2. Виды взаимодействия. Силы. Поля

Вопросы механического движения, возникающие в различных разделах физики, нет никаких оснований относить не к механике, а к этим разделам физики, если эти вопросы таковы, что по своему существу они могут быть

рассмотрены в рамках механики, т. е. для их решения не требуется применять никаких других законов, кроме законов механики. Эти законы позволяют определить движение тел, если известны действующие на тела силы. Происхождение этих сил, механизм их возникновения, для определения движения тел не имеет значения. Необходимо лишь располагать независимым (т. е. не опирающимся на самые законы движения) способом измерения сил, обеспечивающим возможность измерить или рассчитать силы, действующие в каждом конкретном случае. Тогда, пользуясь законами Ньютона (или следствиями из них), можно найти движение тела, т. е. решить задачу механики.

Вопрос же о происхождении сил выходит за рамки механики, поэтому в механике вообще не рассматривается. Поэтому принципиально неправильно разделять задачи о движении тел на «механику» и «немеханику» с точки зрения происхождения сил, вызывающих движение. Ведь нет никаких признаков, по которым упругие силы, силы трения и силы всемирного тяготения можно относить к механике, а силу Лоренца — к «немеханике», поскольку, например, в возникновении упругих сил существенную роль играют силы взаимодействия между электрическими зарядами ионов кристаллической решетки. Поэтому такое разделение было бы совершенно условным и с точки зрения современных физических представлений не оправданным.

Хотя изучение законов физики интересно и поучительно, хотя они и помогают нам понимать природу и овладевать ее силами, все же порой стоит остановиться и поразмыслить: что же они на самом деле значат? Смысл любого утверждения — вещь, которая издавна, с незапамятных времен, интересовала и тревожила философов, а уж смысл физических законов тем более должен волновать нас, ведь повсеместно считается, что в этих законах таятся некоторые реальные знания. Смысл истины — это глубочайший философский вопрос; всегда важно вовремя спросить: что это значит?

Спросим же: в чем смысл физических законов Ньютона, в чем смысл формулы $F=ma$? В чем смысл силы, массы и ускорения? Мы интуитивно понимаем, что такое масса; мы можем также определить ускорение, если нам понятно, что такое место и что такое время. Смысл этих понятий мы поэтому не будем обсуждать, а сосредоточимся на новом понятии силы. И здесь ответ тоже весьма прост: если тело ускоряется, значит на него действует сила. Так говорят законы Ньютона, и самое точное и красивое из мыслимых определений силы состояло бы в том, что сила есть масса тела, умноженная на его ускорение.

Имеется, положим, закон, что импульс сохраняется тогда, когда сумма внешних сил равна нулю. И вот у нас спрашивают: «А что это значит: сумма внешних сил равна нулю?» И мы любезно отвечаем: «Когда полный импульс постоянен, то сумма внешних сил равна нулю». Нет, здесь что-то не то. Ведь ничего нового мы при этом не сказали. Обнаружив основной закон, утверждающий, что сила есть масса на ускорение, а потом определив силы как произведение массы на ускорение, мы ничего нового не открываем. Можно также определить силу и на другой манер: движущееся тело, на которое сила не действует, продолжает двигаться по прямой с постоянной скоростью. Тогда, увидев, что тело не движется по прямой с постоянной скоростью, мы можем утверждать, что на него действует сила. Но такие высказывания не могут составить содержание физики: зачем же ей гонять определения по кругу? Несмотря на это, приведенное выше положение Ньютона, по-видимому, самое точное из всех определений силы, одно из тех, которые так много говорят сердцу математика. И все же оно совершенно бесполезно, потому что из одного определения никогда ничего никто не выводил. Можно день-деньской просиживать в кресле, определяя слова по своему хотению, но совсем иное дело — понять, что происходит при столкновении двух шаров или что бывает, когда груз висит на пружинке. Поведение тел и выбор определений — между этими вещами нет ничего общего.

Пусть, например, мы бы решились говорить, что тело, предоставленное самому себе, лежит на месте и не движется; тогда, заметив, что что-то движется, мы бы стали утверждать, будто на него действует «жила» — мера охоты к перемене мест. Мы получили бы прекрасный новый закон, все было бы хорошо, кроме тех случаев, когда действует «жила». Как видите, все было бы подобно нашему определению силы и точно так же не несло бы в себе никакой информации. Истинное же содержание законов Ньютона таково: предполагается, что сила обладает независимыми свойствами в дополнение к закону $F=ma$; но характерные независимые свойства сил не описал полностью ни Ньютон, ни кто-нибудь еще; поэтому физический закон $F=ma$ — закон неполный. Он подразумевает, что, изучив характеристики величины, определяемой как произведение m на a , мы обнаружим в них некоторую простоту; закон этот дает нам хорошую программу анализа природы, он подсказывает нам, что свойства этой величины — силы — могут оказаться простыми, что ее стоит изучать.

Первый пример таких сил — полный закон тяготения, предложенный Ньютоном. Формулируя свой закон, он отвечал на вопрос: что такое сила? Если бы ничего, кроме тяготения, не существовало, то сочетание этого закона и закона силы (второго закона движения) оказалось бы завершенной теорией. Но, кроме тяготения, существует и многое другое, и мы собираемся пользоваться законами Ньютона во всевозможных положениях. Поэтому нам придется кое-что порассказать о свойствах сил.

К примеру, говоря о силе, мы всегда неявно предполагаем, что когда нет физических тел, то сила равна нулю. Если мы видим, что сила не равна нулю, мы ищем по соседству ее источник. Это предположение совсем не то, что введенная нами «жила».

Одна из важнейших характеристик силы - ее материальное происхождение; и это свойство как раз нельзя считать определением.

Ньютон привел еще одно правило, касающееся сил: силы между взаимодействующими телами равны и противоположны; действие равно

противодействию. И это правило, оказывается, не совсем верно. Да и сам закон $F=ma$ не совсем верен; будь он определенным, мы бы должны были утверждать, что он точно верен всегда; а на самом деле это не так.

Вы можете заявить: «А мне не нравится эта неточность, я хочу, чтобы все определялось точно, да и во многих книжках написано, что наука — вещь точная, что в ней все определено». Но сколько бы вы ни настаивали на точном определении силы, вы его никогда не получите! Во-первых, и сам Второй закон Ньютона не точен, а во-вторых, чтобы понять физические законы, вы должны усвоить себе раз и навсегда, что все они — в какой-то степени приближения.

Любое простое высказывание является приближенным; в виде примера рассмотрим некоторый предмет... кстати, что такое предмет? «Философы» всегда отвечают: «Ну, например, стул».

Стоит услышать это и сразу становится ясно, что они сами не понимают того, о чем говорят. Что есть стул? Стул имеет определенную массу.... Определенную? Насколько определенную? Из него время от времени вылетают атомы - немного, но все же! На него садится пыль, из него сыплется труха, да и лак со временем сходит. Четко определить стул, сказать точно, какие атомы принадлежат ему, какие - воздуху, а какие - лаку, невозможно. Значит, массу стула можно определить лишь приближенно. Точно так же невозможно определить массу отдельного предмета, ибо таких предметов не существует, в мире нет одиноких, обособленных объектов; любая вещь есть смесь множества других, и мы всегда имеем дело с рядом приближений и идеализации. Вся суть в идеализации. В очень хорошем приближении ($\sim 1/10^{10}$) количество атомов стула за минуту не меняется. Если вас эта точность устраивает, вы имеете право считать массу стула постоянной. Точно так же можно идеально изучить и характеристики силы, стоит только не гнаться за точностью. Вас может не удовлетворить этот приближенный взгляд на природу, который пытается выработать физика. Все время стремясь повысить точность приближений, вы можете предпочесть

математическое определение, но оно никогда не действует в реальном мире. Математические определения хороши для математики — там можно полностью и до конца следовать логике, а физический мир сложен. Мы об этом уже говорили, приводя такие примеры, как океанские волны и бокал вина. Пытаясь разделить их на части, мы толкуем отдельно о массе вина и отдельно о массе бокала. Но как можно узнать, где одно, где другое, раз одно растворимо в другом? И сила, действующая на обособленный предмет, уже включает неточность, и всякая система рассуждений о реальном мире, по крайней мере сегодня, предполагает разного рода приближения.

Эта система ничем не похожа на математические рассуждения. В них все может быть определено, и в итоге всегда не известно, о чем говорят.

Принципы, лежащие в основе физики, они являются обобщением опытных фактов. На них следует смотреть не как на изолированные независимые утверждения, а как на систему взаимосвязанных законов. Опытной проверке подвергается и каждый закон в отдельности, и вся система в целом.

Движение тел происходит в связи с действующими на них силами, а сила, действующая на тело, является мерой взаимодействия его с окружающими материальными объектами. Мерой непосредственного, или опосредованного полевого, взаимодействия с другими телами.

1.3.3. Фундаментальные законы физики

Физика - это самая фундаментальная, самая всеобъемлющая из всех наук; огромным было ее влияние на все развитие науки. Действительно, ведь нынешняя физика вполне равноценна давнишней натуральной философии, из которой возникло большинство современных наук. Не зря физику вынуждены изучать студенты всевозможных специальностей; во множестве явлений она играет основную роль.

В этой главе мы попытаемся рассказать, какого рода фундаментальные проблемы встают перед соседними науками. Жаль, что нам не придется по-настоящему заняться этими науками, их проблемами; мы не сможем

прочувствовать всю их сложность, тонкость и красоту. Из-за нехватки места мы не коснемся также связи физики с техникой, с промышленностью, с общественной жизнью и военным искусством. Даже на замечательной связи, объединяющей физику с математикой, мы не задержимся. (Математика, с нашей точки зрения, не наука - в том смысле, что она не относится к естественным наукам. Ведь мерило ее справедливости отнюдь не опыт.) Кстати, не все то, что не наука, уж обязательно плохо. Любовь, например, тоже не наука. Словом, когда какую-то вещь называют не наукой, это не значит, что с нею что-то неладно: просто не наука она, и все.

1.3.4. Законы сохранения

Сохранение материи

Одним из первых закон сохранения массы сформулировал древнегреческий философ Эмпедокл (*V век до н. э.*): «Ничто не может произойти из ничего, и никак не может то, что есть, уничтожиться». Аналогичный тезис, в более поздние века, высказывали Демокрит, Аристотель и Эпикур. Средневековые учёные также не высказывали никаких сомнений в истинности этого закона. С определением массы, как меры количества вещества пропорциональной весу, формулировка закона сохранения материи была уточнена: *масса есть инвариант, то есть при всех процессах общая масса не уменьшается и не увеличивается.*

Однако, в середине *XVIII* века, опыты Роберта Бойля поставили закон сохранения массы под сомнение - у него при химической реакции вес вещества увеличился. Но вскоре М.В. Ломоносов указал Бойлю на его ошибку: увеличение веса происходило за счёт воздуха, а в запаянном сосуде вес сохранялся неизменным. Ломоносов писал Эйлеру: «*Все встречающиеся в природе изменения происходят так, что если к чему-либо нечто прибавилось, то это отнимается у чего-то другого. Так, сколько материи прибавляется к какому-либо телу, столько же теряется у другого, сколько часов я затрачиваю на сон, столько же отнимаю от бодрствования и т. д.*».

В дальнейшем, вплоть до создания физики микромира, закон сохранения массы считался истинным и очевидным. Лавуазье в "Начальном учебнике химии" (1789), приводит точную количественную формулировку закона сохранения массы вещества, однако не объявляет его каким-то новым и важным законом, а просто упоминает мимоходом как о хорошо известном и давно установленном факте. Для химических реакций Лавуазье сформулировал закон так: *«Масса всех веществ, вступивших в химическую реакцию, равна массе всех продуктов реакции»*.

В общефизическом смысле закон сохранения массы, строго говоря, неверен. Ведь, например, *электрон* и *позитрон*, каждый из которых обладает массой, могут аннигилировать в *фотоны*, не имеющие массы покоя. Другой пример: масса *дейтрона*, состоящего из одного *протона* и одного *нейтрона*, не равна сумме масс своих составляющих, поскольку следует учесть *энергию взаимодействия* частиц.

В настоящее время, стало очевидным, что *закон сохранения массы* в физике работает с известными оговорками, поскольку, на самом деле является *законом сохранения материи*, ограниченным частными случаями и абсолютным и тождественным в применениях как *закон сохранения энергии*, с учётом известного соотношения $E=mc^2$, которое записывается для энергии массы покоя частиц в виде $E=m_0c^2$.

Сохранение энергии

Чтобы показать характер идей и тип рассуждений, которые применяются в теоретической физике, более внимательно проанализируем *закон сохранения энергии* - закон, управляющий всеми явлениями природы, всем, что известно, вплоть до настоящего времени. Исключений из этого закона не существует и, насколько известно, он абсолютно точен [12].

Он утверждает, что существует определенная физическая величина, называемая энергией, которая не меняется ни при каких превращениях, происходящих в природе. Само это утверждение весьма и весьма отвлеченно;

это по существу математический принцип, утверждающий, что существует некоторая численная величина, которая не изменяется ни при каких обстоятельствах. Это отнюдь не описание механизма явления или чего-то конкретного, просто-напросто отмечается то обстоятельство, что можно подсчитать какое-то число и затем спокойно следить, как природа будет выкидывать любые свои трюки, а потом опять подсчитать это число - и оно останется прежним.

Чтобы проверить закон *сохранения энергии*, во-первых, мы должны быть уверены, что не забыли учесть ее убыль или прибыль. Во-вторых, необходимо учитывать, что энергия имеет множество разных форм существования и для каждой из них есть своя формула: энергия тяготения, кинетическая энергия, тепловая энергия, упругая энергия, электроэнергия, химическая энергия, энергия излучения, ядерная энергия, энергия массы. Когда мы раскроем формулы для вклада каждой из энергий в анализируемое явление, например, энергию выделяющуюся при радиоактивном ядерном распаде урана, то сумма вклада каждого вида энергий при распаде ядер, будет равна начальной величине, определяемой массой нераспавшегося ядра урана.

Потенциальная энергия тяготения

Сохранение энергии можно понять, только если имеются формулы для всех ее видов.

Для объяснения *энергии тяготения* рассмотрим грузоподъемные машины, способные поднимать один груз, опуская при этом другой. Если мы подняли и опустили какие-то грузы, восстановили прежнее состояние машины и после этого обнаружили, что в итоге груз поднят, а никакой энергии не затрачено, то мы получили вечный двигатель: поднятый груз может привести в движение что-то другое и вернуться в прежнее положение. То есть, машина, поднявшая груз, вернулась в первоначальное положение и ни от чего не зависела, не получала энергию для подъема груза ни от какого

внешнего источника. Очевидно, что вечное движение таких грузоподъемных машин невозможно. (Именно недопустимость вечного движения и есть общая формулировка закона сохранения энергии.)

Тем не менее, определяя вечное движение, нужно быть очень аккуратным. Сделаем это сначала для грузоподъемных машин.

Очень простая грузоподъемная машина показана на рис. 18. Она поднимает тройной вес.

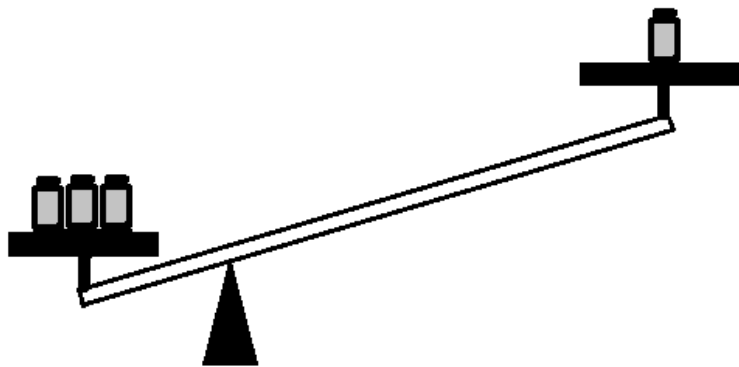


Рис. 18. Простая грузоподъемная машина

На одну чашку весов помещают три единицы веса, на другую — одну. Однако, чтобы грузоподъемная машина смогла поднять тройной груз, необходимо с этой чашки снять хоть малюсенький грузик. И наоборот, чтобы поднять единичный груз, опуская тройной, также необходимо убрать часть груза с правой чашки. Следовательно, в любой подъемной машине необходимо создать небольшую перегрузку на одну сторону, чтобы поднять другую.

Заметим, что грузоподъемные машины, являются почти обратимыми, в том смысле, что если они поднимают почти тройной вес при помощи единичного, то они могут поднять также почти единичный вес, опуская тройной. Это «почти» дает нам возможность представить, что все грузоподъемные машины разделить на две группы — необратимые (сюда входят все реальные машины) и обратимые, которых на самом деле не существует; как бы тщательно ни изготавливать подшипники, рычаги и т. д., таких машин все равно не построишь, и это очевидно.

Представим теперь, что имеются два класса машин — необратимые (сюда входят все реальные машины) и обратимые.

То есть, считается, что идеальные грузоподъемные машины, хотя их и нет на самом деле, могут существовать, и не нуждаются в перевесе. Это значит, что такая идеальная (обратимая) грузоподъемная машина существует и она способна, опустив единичный груз (килограмм или грамм — все равно) на единичную длину, поднять в то же время тройной груз. Назовем такую обратимую машину - машиной A . Положим, что данная обратимая машина поднимает тройной груз на высоту X .

Затем предположим, что имеется другая машина B , не обязательно обратимая, то есть неидеальная, которая тоже опускает единичный вес на единицу длины X , но поднимает тройной вес на высоту Y . Остаётся доказать, что Y не больше X , что будет доказательством того, что невозможно создать машину, которая смогла бы поднять груз *выше*, чем обратимая.

Чтобы доказать это будем рассуждать, как это принято называть, «от *противного*». Допустим, что Y больше X . То есть, взяв единичный вес и опустив его на единицу длины необратимой машиной B , мы поднимаем тройной груз на высоту Y ($Y < X$). Затем, с помощью этой же машины, мы можем опустить тройной груз с высоты Y до уровня X . Но мы условились, что $X > Y$. То есть, в итоге мы получим *свободную энергию*, что даёт нам возможность запустить обратимую машину A в обратную сторону, опустить тройной груз на уровень X и поднять единичный вес на прежнюю высоту. В итоге, единичный вес очутится там, где он был прежде, и обе машины окажутся в состоянии непрерывно работать дальше. Таким образом, если Y больше X , то возникает не просто «вечный двигатель» (но мы знаем, что такого не бывает), но ещё и вырабатывать *свободную энергию* при циклической работе машины. Но мы знаем, что обратимая машина — наилучшая из всех возможных, а это возможно только при $Y = X$ и допущение, что $Y > X$, абсолютно ложно.

А если предположить, что машина B также обратима. То есть, $Y=X$ и это, безусловно, верно. Однако, машину можно запустить в обратную сторону и повторить наши рассуждения. В итоге получим, что X не больше Y . Это очень важное наблюдение, так как оно позволяет узнать, на какую высоту разные машины могут поднимать грузы, не заглядывая в их внутреннее устройство. То есть, система рычагов для подъема груза любой сложности, если мы сравним эту машину с простым обратимым рычагом, способным проделать то же самое, то мы легко узнаем точно, на какую высоту, и какой груз будет поднимать такая машина.

Заметим, что вес материальных тел, умноженный на высоту, называется *потенциальной энергией тяготения* - энергией, которой обладает всякое тело определенной массы, вследствие своего положения в пространстве по отношению к земле. Формула для расчёта энергии тяготения:

$$(\text{Потенциальная энергия тяготения}) = (\text{Вес}) \times (\text{Высота}). \quad (I.4)$$

Справедливость этого утверждения подтверждена опытом.

Потенциальная энергия - это общее название для энергии, связанной с расположением по отношению к чему-либо. В рассмотренном нами частном случае это — *потенциальная энергия тяготения*.

Если же производится работа против электрических сил, а не сил тяготения, если мы «поднимаем» заряды «над» другими зарядами с помощью многочисленных рычагов, тогда запас энергии именуется электрической потенциальной энергией. Общий принцип состоит в том, что изменения потенциальной энергии равны силе, умноженной на то расстояние, на котором она действует:

$$\left(\begin{array}{c} \text{Изменение} \\ \text{энергии} \end{array} \right) = (\text{Сила}) \times \left(\begin{array}{c} \text{Расстояние, на котором} \\ \text{она действует} \end{array} \right). \quad (I.5)$$

Принцип сохранения энергии во многих обстоятельствах оказывается очень полезен при предсказании того, что может произойти.

Кинетическая энергия

Чтобы рассказать о другом виде энергии, рассмотрим маятник (рис. 19). Отведем его в сторону и затем отпустим. Он начнет качаться взад и вперед. Двигаясь от края к середине, он теряет высоту. Куда же девается потенциальная энергия? Когда он опускается до самого низа, энергия тяготения пропадает, однако он вновь взбирается вверх. Выходит, что энергия тяготения может превращаться в другую форму энергии. Ясно, что способность взбираться наверх остается у маятника благодаря тому, что он *движется*; значит, в нижней точке качания энергия тяготения переходит в другой вид энергии.

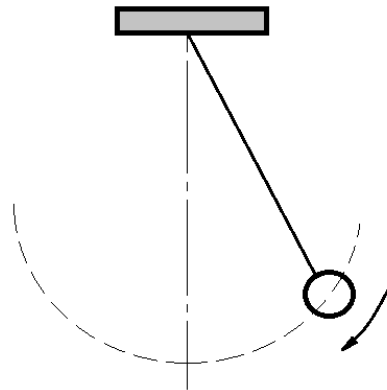


Рис. 19. Маятник

Мы должны получить формулу для энергии движения. Вспоминая наши рассуждения о необратимых машинах, мы легко поймем, что, двигаясь мимо нижней точки, маятник должен обладать некоторым количеством энергии, которая позволит ему подняться на определенную высоту, и при этом независимо от *механизма* подъема или *пути* подъема. Возникает формула, выражающая равноценность обоих видов энергии.

Легко понять, какой может быть новая форма энергии. Её называют кинетической энергией W . В нижней точке она должна быть равна весу тела P умноженному на высоту, на которую этот вес может подняться из-за своей скорости:

$$W = PH = mgH. \quad (1.6)$$

Теперь нужна формула, для расчёта высоты подъема по скорости движения тела в нижней точке траектории. Если мы толкнем что-нибудь с определенной скоростью, скажем, прямо вверх, то это тело достигнет определенной высоты. Мы не знаем пока, какова эта высота, но нам ясно, что она зависит от скорости и что она войдет в нужную нам формулу. Значит, чтобы найти формулу для кинетической энергии тела, движущегося со скоростью V , нужно вычислить высоту, до которой она может добраться, и умножить на тяжесть тела. Получается, что:

$$W = PV^2/2g. \quad (I.7)$$

Конечно, тот факт, что движение обладает энергией, никак не связан с полем тяготения, в котором находится тело и неважно, откуда взялось движение. Это общая формула для любых скоростей. Кстати, и (I.6) и (I.7)-формулы приближенные; первая становится неправильной на больших высотах (настолько больших, что тяжесть тела ослабляется), а вторая — на больших скоростях (настолько больших, что требуются релятивистские поправки). Однако, если ввести более точные формулы для энергии, закон сохранения энергии всё равно соблюдается.

Прочие формы энергии

В таком ключе можно и дальше показывать существование энергии в разных формах.

Отметим, во-первых, упругую энергию. Растягивая пружину, мы должны совершить какую-то работу, ведь растянутая пружина способна поднять груз. После притяжения она получает возможность выполнить работу. Если бы мы теперь составили сумму произведений весов на высоты, то она больше не сошлась бы, и нам пришлось бы в нее что-то вставить, чтобы учесть напряженность пружинки. Упругая энергия — это и есть формула растянутой пружины. Сколько же в ней энергии?

Когда вы отпускаете пружину, то упругая энергия при переходе пружины через точку равновесия обращается в энергию кинетическую; и

далее все время совершаются переходы от сжатия и растяжения пружины к кинетической энергии движения (в переходы эти замешиваются еще изменения энергии тяготения, но если это нам мешает, то можно пружину не подвешивать, а положить). И так продолжается до тех пор, пока потери энергии... Поймите! Выходит, мы все время жульничали: то совершали обвес, чтобы рычаг наклонился, то говорили, что машины обратимы, то уверяли, что они будут работать вечно. А машина, в конечном счете, останавливается. Где же теперь, когда пружина перестала сжиматься-разжиматься, находится энергия? Она перешла в *новую* форму энергии — *тепло*.

В пружине или рычаге имеются кристаллы, состоящие из множества атомов; и при сборке частей машины требуется особая точность и тщательность, чтобы в работе машины ни один из атомов не сдвинулся со своего места, не поколебался. Нужно быть очень осторожным. Ведь обычно, когда машина вертится, то и дело происходят какие-то удары, покачивания, вызванные неровностями материала, и атомы начинают дрожать. Так теряются маленькие доли энергии; по мере того как движение замедляется, все сильнее становятся случайные, неожиданные дрожания атомов вещества машины. Конечно, это все еще кинетическая энергия, но не связанная с видимым движением.

Позвольте, какая кинетическая энергия? Что за сказка? Откуда известно, что это все еще кинетическая энергия? Оказывается, термометр способен обнаружить, что пружина или рычаг *нагреваются*, т. е. что и впрямь происходит определенный прирост кинетической энергии. Мы ее называем *тепловой*, а сами помним, что никакая это не новая форма энергии, а всего лишь кинетическая, но внутреннего движения. (Одна из трудностей всех опытов с большим количеством вещества в том и состоит, что невозможно вправду показать «сохраняемость» энергии, сделать настоящую обратимую машину; каждый раз, когда поворачивается большой комок вещества, атомы не остаются в прежнем состоянии, в их

систему включается некоторое количество случайного движения. Увидеть это нельзя, но измерить термометрами и другими приборами можно.)

Существует еще немало других форм энергии, но описать их сейчас сколько-нибудь подробно мы, конечно, не сможем.

Имеется энергия электрическая, связанная с притяжением и отталкиванием электрических зарядов.

Есть энергия излучения, или энергия света, — одна из форм электрической энергии, ибо свет может быть представлен как колебания электромагнитного поля.

Бывает энергия химическая — энергия, высвобождаемая в химических реакциях. Упругая энергия в некотором роде похожа на химическую; и химическая энергия есть энергия притяжения атомов друг к другу, и упругая энергия тоже. В настоящее время мы это понимаем следующим образом: химическая энергия складывается из двух частей — энергии движения электронов внутри атомов, т. е. из кинетической части, и электрической энергии притяжения электронов к протонам, т. е. из электрической части.

Дальше, бывает ядерная энергия, связанная с расстановкой частиц в ядре; для нее тоже существует формула, хотя основные законы нам и неведомы. Мы знаем, что это не электричество, не тяготение, просто химия — словом, неизвестно что. Видимо, это добавочная форма энергии.

И наконец, теория относительности видоизменяет формулу кинетической энергии, так что название это становится условным, сочетая ее с другим понятием: *энергией массы*. Любой объект обладает энергией уже потому, что он *существует*. Если электрон и позитрон спокойно стоят рядом, ничем не занимаясь (ни тяготением, ни чем иным), а потом сливаются и исчезают, то освобождается определенная порция энергии излучения, и эту порцию можно подсчитать. Все, что для этого нужно, — это знать массу объекта. Неважно, что это такое — два тела исчезли, определенная энергия появилась. Формулу впервые придумал Эйнштейн: это $E = mc^2$.

Из наших рассуждений ясно, что при анализе явления закон сохранения энергии незаменим; мы уже показали это на ряде примеров, для которых мы не знали всех формул. Владей мы формулами для всех типов энергии, мы могли бы узнавать, не вдаваясь в детали, сколько процессов происходит в таком-то явлении. Оттого законы сохранения столь важны. Встает естественный вопрос: какие еще есть в физике законы сохранения [12].

Существуют еще два закона, сходных с законом сохранения энергии. Один называется сохранением импульса (или количества движения). Другой — сохранением момента количества движения. Позже мы подробнее познакомимся с ними.

В конечном счете, мы не понимаем законов сохранения достаточно глубоко. Нам непонятно сохранение энергии. Мы не вправе представить себе энергию как некоторое количество неделимых порций. Вы, вероятно, слышали, что фотоны вылетают порциями и что энергия их равна постоянной Планка, умноженной на частоту. Это правда, но так как частота света может быть любой, то нет никакого закона, по которому порция энергии обязана иметь некоторую определенную величину.

Для нас энергия — это не то, что можно пересчитать, а всего лишь математическая величина, абстракция, — обстоятельство довольно странное. В квантовой механике выявляется, что сохраняемость энергии тесно увязана с другим важным свойством мира — с независимостью от абсолютного времени. Мы можем поставить опыт в некоторый момент, а потом еще раз в другой момент; он будет протекать одинаково. Абсолютно ли верно это утверждение или нет — мы не знаем. Но если мы примем, что оно абсолютно верно, и добавим принципы квантовой механики, то из этого можно вывести принцип сохранения энергии. Это довольно тонкая и интересная вещь, которую нелегко пояснить. Другие законы сохранения также связаны между собой: сохранение импульса в квантовой механике — с утверждением, что неважно, где происходит опыт, его итог от этого не меняется. И подобно

тому, как независимость от места связана с сохранением импульса, а независимость от времени — с сохранением энергии, точно так же от поворота наших приборов тоже ничего не должно изменяться; независимость от ориентации в пространстве имеет отношение к сохранению момента количества движения.

Кроме этого, существуют еще три закона сохранения; они точные, насколько ныне нам известно, и понять их намного легче, так как по своей природе они близки к простому подсчету.

Первый из них — сохранение заряда; он просто означает, что если подсчитать, сколько есть положительных зарядов, и из этого вычесть количество отрицательных, то число это никогда не изменится. Вы можете избавиться от положительных зарядов вместе с отрицательными, но не создадите никогда чистого избытка одних над другими.

И прочие два закона похожи на этот. Один называют сохранением числа барионов. Имеется некоторое количество удивительных частиц (примеры: нейтрон и протон), называемых барионами. В любой реакции, где бы в природе она ни происходила, если подсчитать, сколько барионов было в начале процесса (считая антибарион за -1 барион), то в конце их число окажется тем же. Другой закон — сохранение числа лептонов. Группа частиц, называемых лептонами, включает электрон, мюон и нейтрино. Антиэлектрон, т. е. позитрон, считается за -1 лептон. Подсчет общего числа лептонов в реакции обнаруживает, что на входе и на выходе реакции это число одинаково, по крайней мере, насколько нам сейчас известно.

Вот вам шесть законов сохранения: три замысловатых, связанных с пространством и временем, а три простых, связанных с обычным счетом. К сохраняемости энергии доступность и полезность энергии не имеет никакого отношения. В атомах морской воды немало энергии движения, так как температура моря довольно высока, но нет никакой возможности направить эту энергию в определенное русло, не отобрав ее откуда-нибудь еще. Иначе говоря, хотя нам известен тот факт, что энергия сохраняется, но не так-то

просто сохранить энергию, пригодную для человека. Законы, управляющие количеством пригодной для человека энергии, называются законами термодинамики и включают понятие, называемое энтропией необратимых термодинамических процессов.

Наконец, остановимся на том, откуда мы сегодня можем получать необходимый запас энергии. Энергией нас снабжают Солнце и дожди, уголь, уран и водород. Впрочем, и дожди, и уголь, в конце концов, без Солнца были бы невозможны. Хотя энергия сохраняется, природа, по всей видимости, этим ничуть не интересуется; она освобождает из Солнца множество энергии, но только одна двухмиллиардная часть ее падает на Землю. Природа сохраняет энергию, но в действительности о ней не заботится, расточая ее направо и налево. Мы уже получаем энергию из урана, мы можем получать ее и из водорода, но пока это получение связано со взрывами, с большой опасностью. Если бы мы смогли научиться управлять термоядерными реакциями, то энергия, которую можно получать, тратя по 10 л воды в секунду, равнялась бы всей электроэнергии, производимой сейчас за это время в Соединенных Штатах. Шестисот литров речной воды в минуту хватило бы, чтобы снабжать энергией всю страну! Именно физикам придется придумать, как избавить нас от нужды в энергии. И это, бесспорно, достижимо.

ГЛАВА II

МЕТОДОЛОГИЯ НАУЧНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Введение

Чтобы физика могла быть полезной другим наукам в отношении теории, а не только своими приборами и изобретениями, эти науки должны

снабдить физика описанием объекта исследования этих наук на физическом языке.

Если биолог спросит: «*Почему лягушка прыгает?*», то физик не сможет ответить. Но если биолог расскажет, что такое лягушка, что в ней столько-то молекул, что вот в этом месте у нее нервы и т. д., то это уже совсем иное дело.

Если геолог более, или менее толково объяснит, что такое Земля, а астроном — что такое звезды, тогда физик может попробовать разобраться и в этом.

Чтобы понять химию, мы должны точно знать, из каких атомов состоят интересующие нас вещества, иначе мы ничего не проанализируем. Конечно, это лишь одно из ограничений.

Существует и другой *тип* задач в других науках, который в физике отсутствует. Назовем его, не имея лучшего термина, вопросом истории. *С чего все пошло? Как все стало таким, как оно есть?* Если, например, все в биологии будет нами понято, возникнет естественный вопрос: *Откуда взялись все биологические существа на Земле?* Этим занимается теория эволюции — важная часть биологии. В геологии нам хочется знать не только, как образуются горы, но и как вначале возникла сама Земля, солнечная система и т. д. Это, естественно, приводит нас к желанию узнать, из какого рода материи складывалась тогда Вселенная. Как появились звезды? Каковы были начальные условия? А это уже проблема астрономии и астрономической истории. Сейчас многое прояснилось в происхождении звезд, элементов, из которых мы состоим, и даже чуточку стало ясней происхождение самой Вселенной [1].

Физика не изучает вопросы истории. Мы не задаем вопрос: «Вот законы физики, как они возникли?» Физики считают, что законы физики со временем не меняются. Конечно, это не исключено, но если выяснится, что это так, то исторические вопросы физики переплетутся с остальной историей

Вселенной, и тогда физик будет обсуждать те же проблемы, что и астрономы, геологи и биологи.

Вместе с тем, в физике существует проблема, общая многим наукам, и до настоящего времени не решенная. Ни один физик еще не смог математически безупречно проанализировать этот вопрос, несмотря на его важность для сопредельных наук. Это — анализ *циркуляции*, или *вихревой жидкости*. Если проследить эволюцию звезды, то рано или поздно мы подойдем к такому моменту, когда в звезде начинается конвекция. С этого момента начинается процесс циркуляции, и мы уже знаем, что будет дальше. Через несколько миллионов лет произойдет взрыв звезды, но причина этого для нас остается загадкой. Мы не умеем анализировать погоду, это тоже связано с циркуляцией в атмосфере. Мы не знаем также картины движений, которые происходят внутри Земли. В простейшей форме задача такова: пропустим через очень длинную трубку на большой скорости воду. Спрашивается: какое нужно давление, чтобы прогнать сквозь трубку данное количество воды? И никто, основываясь только на первичных законах и на свойствах самой воды, не умеет ответить на этот вопрос. Если вода течет неторопливо или когда сочится вязкая жижа вроде меда, то мы прекрасно все умеем. Ответ вы можете найти, например, в любом вашем учебнике. А вот с настоящей, мокрой водой, брызжущей из шланга, справиться мы не в силах.

Это — центральная проблема, которую в один прекрасный день нам понадобится решить, а мы это не умеем [13,14]. Может быть проблема в том, что наука просто не в состоянии решить некоторые проблемы, ведь научный аппарат познания, это всё-таки *«человеческая придумка»*.

Поэт сказал однажды: «Весь мир в бокале вина». Мы, вероятно, никогда не поймем, какой смысл он в это вкладывал, ибо поэты пишут не для того, чтобы быть понятыми. Но бесспорно, что, внимательно взглянув в бокал вина, мы поистине откроем целый мир. В нем и физические явления (искрящаяся жидкость, испарение, меняющееся в зависимости от погоды и вашего дыхания, блеск стекла) и атомы (о которых нам говорит уже наше

воображение). Наш ограниченный ум для удобства делит этот бокал вина, этот мир на части: физику, биологию, геологию, астрономию, психологию и т. д., но ведь природа на самом деле никакого деления не знает!

Как показано в работах [15] успешность выполнения научного исследования в наибольшей степени зависит от умения выбрать наиболее результативные методы исследования, поскольку именно они позволяют достичь поставленной цели. Методы научного познания принято делить на общие и специальные. Общие методы научного познания обычно делят на три большие группы: 1) методы эмпирического исследования (наблюдение, сравнение, измерение, эксперимент); 2) методы, используемые как на эмпирическом, так и на теоретическом уровне исследования (абстрагирование, анализ и синтез, индукция и дедукция, моделирование и др.); 3) методы теоретического исследования (восхождение от абстрактного к конкретному и др.).

Методы эмпирического исследования

Наблюдение представляет собой активный познавательный процесс, опирающийся прежде всего на работу органов чувств человека и его предметную материальную деятельность. Это наиболее элементарный метод, выступающий, как правило, в качестве одного из элементов в составе других эмпирических методов. В научных исследованиях наблюдения должны приводить к результатам, которые не зависят от воли, чувств и желаний субъектов. Чтобы стать основой последующих теоретических и практических действий, эти наблюдения должны содержать информацию об объективных свойствах и отношениях реально существующих предметов и явлений, поэтому наблюдение должно удовлетворять ряду требований, важнейшими из которых являются: 1) планомерность, 2) целенаправленность, 3) активность, 4) систематичность. Как средство познания наблюдение дает первичную информацию о явлениях и процессах в форме совокупности эмпирических утверждений.

Наблюдение и сравнение — наиболее распространенный метод познания. Недаром говорится, что "все познается в сравнении". Позволяет установить сходство и различие предметов и явлений действительности. В результате наблюдения и сравнения устанавливается то общее, что присуще двум или нескольким объектам, а выявление общего, повторяющегося в явлениях, как известно, есть ступень на пути к познанию закономерностей и законов.

Для того чтобы сравнение было плодотворным, оно должно удовлетворять двум основным требованиям. Первое требование: сравниваться должны лишь такие явления, между которыми может существовать определенная объективная общность. Второе требование: для познания объектов их сравнение должно осуществляться по наиболее важным, существенным (в плане конкретной познавательной задачи) признакам. С помощью сравнения информация об объекте может быть получена двумя различными путями. Во-первых, она может выступать в качестве непосредственного результата сравнения. Во-вторых, очень часто получение первичной информации не выступает в качестве главной цели сравнения, этой целью является получение вторичной или производной информации, являющейся результатом обработки первичных данных. Наиболее распространенным и наиболее важным способом такой обработки является умозаключение по аналогии.

Измерение в отличие от наблюдения и сравнения является более точным познавательным средством. Измерение — есть процедура определения численного значения некоторой величины посредством единицы измерения. Ценность этой процедуры в том, что она дает точные, количественно определенные сведения об окружающей действительности. Важнейшим показателем качества измерения, его научной ценности является точность, которая зависит от усердия ученого, от применяемых им методов, но главным образом — от имеющихся измерительных приборов.

В ряду эмпирических методов научного познания измерение занимает не менее важное место, чем наблюдение и сравнение.

Частным случаем наблюдения является эксперимент, т.е. такой метод научного исследования, который предполагает вмешательство в естественные условия существования предметов и явлений или воспроизведение определенных сторон предметов и явлений в специально созданных условиях с целью изучения их без осложняющих процесс сопутствующих обстоятельств. Экспериментальное изучение объектов по сравнению с наблюдением имеет ряд преимуществ: 1) в процессе эксперимента становится возможным изучение того или иного явления в "чистом виде"; 2) эксперимент позволяет исследовать свойства объектов действительности в экстремальных условиях; 3) важнейшим достоинством эксперимента является его повторяемость.

Любой эксперимент может осуществляться как непосредственно с объектом, так и с его моделью. Использование моделей позволяет применять экспериментальный метод исследования к таким объектам, непосредственное оперирование с которыми затруднительно или даже невозможно. Поэтому моделирование является особым методом исследования широко распространенным в науке.

Методы теоретического исследования

Как на эмпирическом, теоретическом уровне, так и в эксперименте широко используют такие методы исследований, как абстрагирование, анализ, синтез, индукцию и дедукцию.

Абстрагирование носит в умственной деятельности универсальный характер, ибо каждый шаг мысли связан с этим процессом или с использованием его результата. Сущность этого метода состоит в мысленном отвлечении от несущественных свойств, связей, отношений, предметов и в одновременном выделении, фиксировании одной или нескольких интересующих исследователя сторон этих предметов. Различают процесс

абстрагирования и результат абстрагирования, называемый абстракцией. Обычно под результатом абстрагирования понимается знание о некоторых сторонах объектов. Процесс абстрагирования — это совокупность операций, ведущих к получению такого результата (абстракции). Примерами абстракций могут служить бесчисленные понятия, которыми оперирует человек не только в науке, но и в обыденной жизни: дерево, дом, дорога, жидкость и т.п. Процесс абстрагирования в системе логического мышления тесно связан с другими методами исследования и, прежде всего, с анализом и синтезом.

Анализ является методом научного исследования путем разложения предмета на составные части.

Синтез представляет соединение полученных при анализе частей в нечто целое. Методы анализа и синтеза в научном творчестве органически связаны между собой и могут принимать различные формы в зависимости от свойств изучаемого объекта и цели исследования. В зависимости от степени познания объекта, от глубины проникновения в его сущность применяется анализ и синтез различного рода.

Прямой или эмпирический анализ и синтез применяется на стадии поверхностного ознакомления с объектом. При этом осуществляется выделение отдельных частей объекта, обнаружение его свойств, простейшие измерения, фиксация непосредственно данного, лежащего на поверхности общего. Этот вид анализа и синтеза дает возможность познать явление, но для проникновения в его сущность он недостаточен.

Возвратный или элементарно-теоретический анализ и синтез широко используется как мощное орудие достижения моментов сущности исследуемого явления. Здесь операции анализа и синтеза осуществляются не механически. Они базируются на некоторых теоретических соображениях, в качестве которых может выступать предположение о причинно-следственной связи различных явлений, о действии какой-либо закономерности.

Наиболее глубоко проникнуть в сущность объекта позволяет структурно-генетический анализ и синтез. При этом идут дальше предположения о некоторой причинно-следственной связи. Этот тип анализа и синтеза требует вычленения в сложном явлении таких элементов, таких звеньев, которые представляют самое центральное, самое главное в них, их "клеточку", оказывающую решающее влияние на все остальные стороны сущности объекта.

Для исследования сложных развивающихся, как правило, биологических и социальных объектов применяется исторический метод. Он используется только там, где так или иначе предметом исследования становится история объекта.

С точки зрения философии, важным методом теоретического исследования является переход от абстрактного к конкретному. Переход от абстрактного к конкретному представляет собой всеобщую форму движения научного познания, закон отображения действительности в мышлении. Согласно этому методу процесс познания как бы разбивается на два относительно самостоятельных этапа.

На первом этапе происходит переход от чувственно-конкретного образа объекта к его абстрактным определениям. Единый объект расчленяется, описывается при помощи множества понятий и суждений. Он как бы "испаряется", превращаясь в совокупность зафиксированных мышлением абстракций, односторонних определений.

Второй этап процесса познания и есть восхождение от абстрактного к конкретному. Суть его состоит в движении мысли от абстрактных определений объекта, т.е. от абстрактного в познании, к конкретному в познании. На этом этапе как бы восстанавливается исходная целостность объекта, он воспроизводится во всей своей многогранности — но уже в мышлении.

Оба этапа познания теснейшим образом взаимосвязаны. Восхождение от абстрактного к конкретному невозможно без предварительного

"анатомирования" объекта мыслью, без восхождения от конкретного в действительности к абстрактным его определениям. Таким образом, можно сказать, что рассматриваемый метод представляет собой процесс познания, согласно которому мышление восходит от конкретного в действительности к абстрактному в мышлении и от него — к конкретному в мышлении.

§ II.1. Измерение пространственных и временных величин

Единицы и стандарты пространства и времени

Принцип науки состоит в следующем: пробный камень всех наших знаний - это опыт. Опыт, эксперимент — это единственный судья научной «истины». А в чем же источник знаний? Откуда приходят те законы, которые мы проверяем с помощью опыта? Да из того же опыта; он помогает нам выводить законы, в нем таятся намеки на них. А сверх того нужно еще воображение, чтобы за намеками увидеть что-то большое и главное, чтобы отгадать неожиданную, простую прекрасную картину, встающую за ними и потом поставить опыт, который убедил бы нас в правильности догадки. Этот процесс воображения настолько труден, что происходит разделение труда: бывают *физики-теоретики*, они воображают, соображают и отгадывают новые законы, но опытов не ставят, и бывают *физики-экспериментаторы*, чье занятие — ставить опыты, воображать, соображать и отгадывать.

Всякое измерение физической величины представляет собой прямое или косвенное сравнение измеряемой величины с эталоном, в результате мы получаем численное значение физической величины.

Таким образом, для того чтобы в результате измерений можно было получить значение физической величины, мы должны, во-первых, выбрать эталон данной физической величины (т. е. образец, для которого эта величина принята за единицу), во-вторых, установить способ сравнения данной величины с эталоном и, наконец, установить способ сложения эталонов.

Очевидно, что математика играет исключительно важную роль в физике. Без нее современная физика немыслима. Язык математических формул, обеспечивает замечательную простоту и компактность описания, необходимую для правильного изложения физических законов и их следствий. Поэтому, вполне правомерно сказать «математика – это язык физики». Физика изучает всё многообразие форм движения материи и взаимодействий материальных объектов. Задача физики состоит в экспериментальном исследовании различных форм движения материи и взаимодействий материальных объектов, с целью обобщения полученных экспериментальных данных в виде законов, на основании которых далее в каждом конкретном случае может быть предсказан, например, характер возникающего движения. Для этого необходимо знать не только свойства материальных объектов, движение которых рассматривается, но и характер тех сил, которые проявляются в результате их взаимодействия, в том или ином конкретном случае. Каждый шаг в изучении природы — это всегда только приближение к истине, вернее, к тому, что мы считаем истиной.

II.1.1. Геометрия, физика пространства и времени.

Связь физики с математикой. Размерные измерения

Геометрия для физики имеет особое и принципиальное значение. Но прежде мы должны решить вопрос - применять евклидову или какую-либо другую геометрию для описания окружающего нас мира? А это, безусловно, является вопросом о физических свойствах Вселенной, то есть, можем ли мы в физических измерениях предполагать, что всегда справедливы аксиомы и теоремы Евклида? Или, не вдаваясь в сложные математические вычисления, мы можем высказать только несколько простых истин об экспериментально определенных, на основании аксиом и теорем Евклида, свойствах пространства. Сложный вопрос, поскольку даже утвердительный ответ на вопрос о том, что измеренное отношение длины окружности к диаметру физического круга действительно равняется $3,14159\dots$, является скорее

вопросом эксперимента, а не математического умозаключения.

Одной из наиболее известных теорем математики является теорема Пифагора: в прямоугольном треугольнике квадрат гипотенузы равен сумме квадратов прилежащих к ней сторон (катетов) (рис. 20).

Выполняется ли эта математическая истина также в реальном мире, изучаемом физикой? Точно ли описывают физический мир аксиомы Евклидовой геометрии, из которых логически выводится теорема Пифагора? Это может решить только опыт.

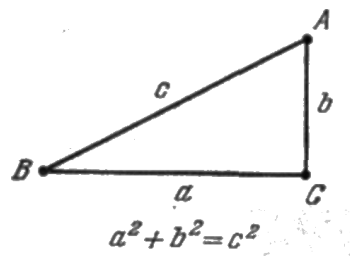


Рис. 20. Геометрическая иллюстрация теоремы Пифагора

А может ли быть иначе? Одного умозаключения тут недостаточно, и для ответа мы должны обратиться к опыту. Приведем здесь некоторые соображения, отметив, что они имеют несколько неполный характер, так как мы пока не можем пользоваться метрикой трехмерного пространства, обладающего кривизной. Вначале вообразим, в каком положении находились бы двумерные разумные существа, живущие в такой Вселенной, которая представляет собой поверхность шара. Математики «двумерного пространства» могли бы дать этим разумным существам описание свойств и других пространств, с тремя и даже большим числом измерений, но им так же трудно было бы представить в своем воображении такие вещи, как и нам — нарисовать себе четырехмерное пространство[12].

Как же эти двумерные разумные существа могут установить, что живут на поверхности, обладающей кривизной? Чтобы убедиться в этом, им нужно проверить, что для данной поверхности теряют силу хотя бы некоторые аксиомы геометрии на плоскости, а для этого надо экспериментально

установить, выполняются ли определенные теоремы евклидовой геометрии на той поверхности, на которой они живут.

Эти двумерные разумные существа будут проводить «прямые» линии как линии кратчайших расстояний между любыми двумя точками B и C на поверхности шара (рис. 21).

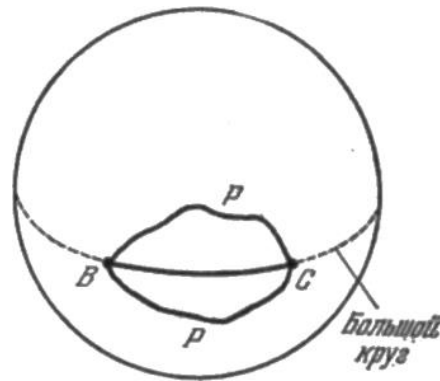


Рис. 21. Кратчайшее «прямолинейное» расстояние между точками B и C на шаровой поверхности проходит по дуге большого круга, соединяющей эти точки, а не по какому-либо другому пути P [12]

Мы считали бы такую линию дугой большого круга. Они могут строить прямоугольные треугольники и проверять на них, выполняется ли теорема Пифагора. Для очень маленького треугольника, каждая из сторон которого мала по сравнению с радиусом шара, теорема будет выполняться с большой, но не с абсолютной точностью. Для большого треугольника обнаружится значительное отклонение от этой теоремы.

Если B и C — точки на экваторе шара, то «прямая» линия, соединяющая их, является дугой BC экватора (рис. 22). Кратчайшим путем из точки C на экваторе к северному полюсу A является линия постоянной долготы (меридиан), пересекающая экватор BC под прямым углом.

Кратчайшим путем из A в B является отрезок другого меридиана, который также пересекает экватор BC под прямым углом. Получается прямоугольный треугольник, в котором $b=c$. Очевидно, что на поверхности шара теорема Пифагора не выполняется, потому что c^2 не может быть здесь равно $a^2 + b^2$, а сумма внутренних углов треугольника ABC всегда больше 180° . Измерения, сделанные на искривленной поверхности ее двумерными

обитателями, дают им возможность убедиться, что эта поверхность действительно обладает кривизной.

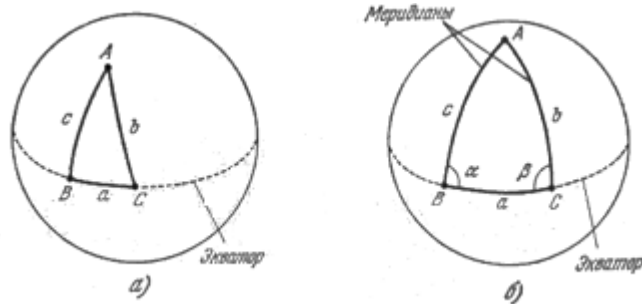


Рис. 22. Двумерные существа могли бы строить треугольники с заданными вершинами A, B, C к отрезками «прямых» линий в качестве сторон. Они нашли бы, что для маленьких прямоугольных треугольников $a^2 + b^2 \approx c^2$ и сумма углов треугольника немного больше 180° (а). Если бы они рассматривали большие треугольники, то сумма углов все более превышала бы 180° (б). Здесь точки B и C находятся на экваторе, а точка A — полюс шара, причем оба угла α и β прямые. Очевидно, что $a^2 + b^2 \neq c^2$, потому что $c = a + b$ [12]

Однако эти обитатели всегда могут сказать, что законы геометрии на плоскости точно описывают их двумерный мир, а причина указанного несоответствия связана со свойствами линеек, применяемых для измерения кратчайшего расстояния и определения «прямой» линии. Они могут показать, что метровые линейки не имеют постоянной длины, а растягиваются и сжимаются, когда их переносят в различные места поверхности. Только в результате непрерывных измерений, выполненных различными способами и давших одинаковый результат, становится очевидно, что наиболее простое объяснение нарушения евклидовой геометрии заключается в том, что поверхность имеет кривизну. Аксиомы геометрии на плоскости не являются в этом искривленном двумерном мире самоочевидными истинами; они вообще уже не являются истинами. Мы видим, что вопрос о том, какова истинная геометрия Вселенной, представляет собой физическую проблему, подлежащую экспериментальному исследованию. Описывая измерения, выполненные в нашем собственном трехмерном мире, мы обычно не задаем себе вопроса о том, справедлива ли евклидова геометрия, потому что евклидова геометрия является настолько, хорошим приближением к геометрии Вселенной, что при

практических измерениях не обнаруживаются какие-либо отклонения от нее. Это не означает, что применимость евклидовой геометрии самоочевидна или что эта геометрия совершенно точно выполняется в мировом пространстве. Великий математик XIX в. Карл Фридрих Гаусс высказал предположение, что необходимо проверить отсутствие кривизны трехмерного пространства, следующее из геометрии Евклида, измеряя сумму внутренних углов большого треугольника (рис. 23); он понимал, что если трехмерное пространство обладает кривизной, то сумма углов достаточно большого треугольника должна заметно отличаться от 180° .

Гаусс использовал (1821—1823) геодезические приборы для точного измерения треугольника, образованного вершинами гор Брокен, Хохехаген и Инзельберг в Германия.

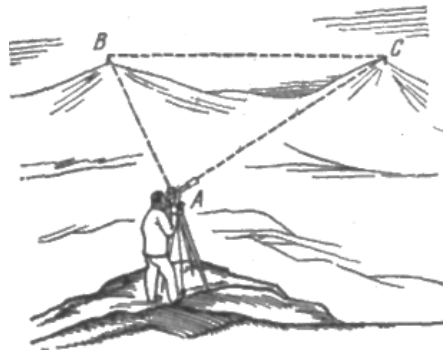


Рис. 23. Гаусс измерял углы треугольника, вершины которого находились на вершинах трех гор, и в пределах точности своих измерений не обнаружил отклонения суммы углов от 180° [17]

Наибольшая сторона треугольника имела длину около 100 км. Измеренные внутренние углы были равны:

$$86^\circ 13' 58,366''$$

$$53^\circ 6' 45,642''$$

$$40^\circ 39' 30,165''$$

$$\text{Сумма } 180^\circ 00' 14,173''$$

В работах Гаусса нет данных по поводу оценки точности этих значений; вероятно, последние два десятичных знака не являются достоверными. Поскольку на каждой из трех вершин геодезические приборы устанавливались по местной плоскости горизонта, эти три горизонтальные

плоскости не были параллельными. Вычисленную поправку, названную сферическим избытком и равную 14,853 дуговой секунды, надо вычесть из полученной суммы углов. Исправленная сумма, равная $179^{\circ}59',320''$, отличается от 180° на 0,680 дуговой секунды. Гаусс считал, что эта величина находится в пределах ошибок измерений, и сделал вывод, что в пределах точности этих измерений пространство является евклидовым.

Из приведенного выше примера следует, что евклидова геометрия дает правильное описание свойств маленького треугольника на обыкновенной двумерной сферической поверхности, а отклонения от евклидовой геометрии становятся все более значительными по мере увеличения размеров. Для того чтобы убедиться, что наше трехмерное физическое пространство действительно является плоским, нам надо произвести измерения с очень большими треугольниками, вершины которых образованы Землей и удаленными звездами или даже галактиками. Однако мы сталкиваемся с такой трудностью: наше положение определяется положением Земли, и мы еще не имеем возможности передвигаться в космическом пространстве с масштабными линейками, чтобы измерять стороны и углы астрономических треугольников.

Целесообразно, в этой связи, сделать ещё одно замечание *о связи физики с математикой*. Язык математики имеет особые правила и если следовать им, то можно будет извлекать из анализа физических законов с помощью математики абсолютно правильные выводы. Например: квадратный корень из 2 равен 1,414... или $\sin 2\alpha = 2 \cdot \sin \alpha \cdot \cos \alpha$. Но, вместе с тем, необходимо строго следить за тем, чтобы не смешивать такие истины с точными утверждениями относительно самого *физического мира*. Необходимо правильно представлять себе истинную роль математики в физике, и к этому вопросу мы еще будем неоднократно возвращаться.

Действительно, ведь все величие математики в том и состоит, что в ней мы не знаем, о чем толкуем. Ее законы, ее доказательства, ее логика не зависят от того, чего они касаются, — и в этом своя, особая красота. Когда

вы имеете другую совокупность объектов, подчиняющихся той же системе аксиом, что и евклидова геометрия, то вы можете выдвинуть новые определения и делать выводы, сообразуясь с правильной логикой, — все следствия окажутся правильными, и совершенно неважно, чего они касаются. А в природе? Когда вы проводите линию или провешиваете ее при помощи луча света и теодолита (как это делается на геодезических съемках) — следует ли природа Евклиду? Нет, вы делаете приближение; крест на объективе имеет определенную толщину, а геометрическая линия - никакой.

Из этого следует, что применять, или нет, в расчётах пространственных характеристик объектов при съёмке евклидову геометрию - это вопрос физики, а не математики. Конечно, с экспериментальной (а не математической) точки зрения вам нужно знать, применимы ли законы Евклида к тому роду геометрии, которую вы используете, измеряя окрестности; вы предполагаете, что да, применимы. И, действительно, они прекрасно работают; прекрасно, но не точно, потому что ваши съемочные линии - это не настоящие геометрические линии. Приложимы, или нет, абстрактные евклидовы прямые к линиям, провешиваемым на опыте и есть ли это дело самого опыта; на этот вопрос чистым рассуждением не ответить.

Чистая математика имеет, дело с абстрактными объектами и понятиями, подчиняющимися определенной системе аксиом. Единственное требование, предъявляемое в чистой математике к ее понятиям и аксиомам, сводится к их логической непротиворечивости. Все свои результаты чистая математика получает из этих аксиом путем логических рассуждений, основанных на правилах формальной логики. Содержание этих результатов, очевидно, не может выйти за пределы логических связей между различными объектами и понятиями чистой математики. В этом смысле чистая математика является логически замкнутой дисциплиной. Такая замкнутость и логическая согласованность придают чистой математике эстетическую привлекательность и доставляют чувство глубокого удовлетворения всякому уму, воспитанному в духе математической строгости.

Надо, однако, заметить, что строго замкнутая сама в себе математика оторвана от реальной действительности и не может быть использована в других науках и практической деятельности человека. Чтобы математика стала мощным средством при описании и изучении явлений природы, каким она в действительности является, необходимо установить связи между абстрактными математическими объектами и понятиями - с одной стороны - и реальными объектами и явлениями природы - с другой. Математические понятия и объекты должны появляться не как чисто логические категории, а как абстракции каких-то реальных объектов или процессов природы. Так, точка является абстракцией физического тела достаточно малых размеров, прямая линия - абстракцией достаточно тонкого твердого стержня или светового пучка в однородной среде. Вопрос о справедливости математики сводится к справедливости ее аксиом. Справедливость же самих аксиом может быть установлена опытным и только опытным путем.

Точно таким же образом вы не можете назвать $F=ma$ определением, вывести из него все чисто математически и сделать механику математической теорией: механика - это описание природы. Выдвигая подходящие постулаты, всегда можно создать математическую систему вроде евклидовой, но вы не можете создать математики мира; рано или поздно вам пришлось бы отвечать на вопрос: выполняются ли эти аксиомы на объектах природы? И вы немедленно завязли бы среди этих запутанных, «нечистых» реальных предметов, - правда, добиваясь все большей и большей точности приближений.

Опыт с математическими объектами нельзя осуществить в чистом виде, поскольку эти объекты являются идеализациями и не встречаются в природе. Всякий опыт выполняется с реальными телами. Математическую строгость, которой, и не без оснований, так гордятся математики, надо понимать в смысле логической согласованности ее выводов, но не в смысле обоснования математических аксиом.

Одной математической строгости недостаточно для физики, как и для всякой другой опытной науки, имеющей дело с реальными объектами и явлениями природы. Всякое теоретическое Исследование, даже выполненное математически строго, никогда не может считаться и физически строгим. Во-первых, такие исследования всегда основываются на определенных законах, справедливость которых, в конце концов, доказывается опытным путем, а опыты и физические измерения неизбежно сопровождаются ошибками, т. е. выполняются с определенной точностью. Вне пределов этой точности физический закон может оказаться неверным. Во-вторых, всякий реальный физический объект характеризуется бесконечным разнообразием свойств. Учесть все эти свойства невозможно не только потому, что большинство из них нам просто неизвестно, но и потому, что это практически неосуществимо. При построении теории физика заменяет реальные объекты их идеализированными моделями, приблизительно правильно передающими не все свойства реальных объектов, а только те из них, которые существенны в рассматриваемом круге, вопросов. Какие свойства реальных объектов существенны, а какие не играют заметной роли — на этот вопрос, в конце концов, может ответить только опыт, которому принадлежит решающее слово в вопросе о правильности всякой физической теории и пределах ее применимости. Если физический закон применен вне области, где он справедлив, а идеализированная модель правильно передает не все свойства реальных объектов, существенные для рассматриваемого круга явлений, то возникающие вследствие этого пороки теории, понятно, не могут быть исправлены никакой строгостью математических рассуждений и расчетов.

Последнее замечание имеет и практическую ценность. Конечно, после того как идеализированная модель построена, не будет ошибкой производить все дальнейшие расчеты математически абсолютно точно, хотя бы при этом и использовались физические законы, верные только приближенно. Однако сплошь и рядом такие расчеты очень громоздки и даже практически не осуществимы из-за их сложности. Между тем точность уже обесценена

ошибками физических законов и несовершенствами идеализированной модели, положенной в основу расчета. Можно и нужно перейти к приближенным расчетам. Такие расчеты столь же хороши, что и «точные», если их ошибки не превосходят ошибок, обусловленных неточностью применяемых физических законов и несовершенствами идеализированных моделей.

Размерные измерения

Многие понятия и открытия, которыми по справедливости так гордится математика, не имеют никакого смысла, когда речь заходит о применении этих понятий к реальным объектам. Сюда относится, например, понятие иррационального числа. Лишено содержания утверждение, что физическая величина имеет иррациональное значение. Такое утверждение не может быть проверено. Одних только рациональных чисел достаточно, чтобы представить результаты измерений, выполненных со сколь угодно высокой степенью точности. Кроме того, понятие физической величины может утратить смысл, если к ее измерению предъявить требование неоправданно высокой точности. Так, например, совсем не ясно, о чем идет речь, если поставить задачу об измерении длины твердого стержня с точностью до размеров электрона или даже атома. *Принципиально неограниченная точность размерных измерений (длин) имеет смысл только для абстрактных прямолинейных отрезков геометрии, а не для реальных тел, имеющих атомистическую структуру.*

Как было показано выше, «пространство», «время», «движение» - всеобщие формы существования «материи», они не существуют вне «материи» и независимо от неё.

Поскольку материальные объекты характеризуются протяжённостью и формой, которые определяются расстояниями между частями объекта и их ориентацией, то *пространственными характеристиками* являются

координаты сторон объекта относительно других тел, расстояния между ними, углы между различными пространственными направлениями.

Временные характеристики материальных объектов и процессов - «моменты» времени, в которые происходят явления, продолжительности (длительности) процессов. Отношения между этими пространственными и временными характеристиками материальных объектов и процессов называются метрическими.

Существуют также и топологические пространственно-временные характеристики материальных объектов и процессов - «соприкосновение» различных объектов, число направлений. С чисто пространственными отношениями имеют дело лишь в том случае, когда можно отвлечься от свойств и движения тел и их частей; с чисто временными - в случае, когда можно отвлечься от многообразия сосуществующих объектов. Иными словами, «пространство» и «время» можно рассматривать как атрибутивные характеристики «материи», подлежащие измерению.

§ II.2. Системы координат. Системы отсчета

II.2.1. Понятие о материальной точке

Реальные движения тел настолько сложны, что, изучая их, нужно отвлечься от несущественных (для рассматриваемого движения) деталей. С этой целью используются понятия, применимость которых зависит от того, какое именно движение тел изучается. Среди этих понятий большое значение имеет понятие о материальной точке [16].

Материальной точкой называется тело исчезающее малых размеров; в задачах механики о движении реальных тел понятие материальной точки применимо к такому телу, размерами которого можно пренебречь по сравнению с размерами, характеризующими движение этого тела.

Рассмотрим движение некоторой системы A материальных точек относительно системы S . Пусть для данных перемещений системы A систему

S можно считать твердым телом, тогда с телом S можно жестко связать три единичных вектора \mathbf{n}_x , \mathbf{n}_y , \mathbf{n}_z , имеющих общее начало в некоторой точке O этого тела (для определенности будем считать выбранный базис ортогональным - см. рис. 24).

Положение любой материальной точки системы A относительно системы S зададим радиусом-вектором \mathbf{r} этой точки.

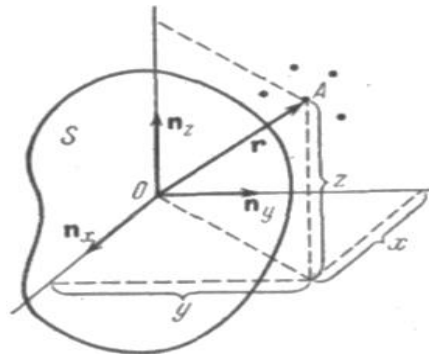


Рис. 24. Система координат

Разложив вектор \mathbf{r} по трем осям Ox , Oy , Oz , которые определяются ортами \mathbf{n}_x , \mathbf{n}_y , \mathbf{n}_z , получим

$$\mathbf{r} = x \cdot \mathbf{n}_x + y \cdot \mathbf{n}_y + z \cdot \mathbf{n}_z \quad (II.1)$$

где x , y , z - проекции радиуса-вектора на указанные оси. Таким образом, при определении положения материальной точки ей ставятся в соответствие три вещественные координаты x , y , z , называемые декартовыми координатами. Систему координат, жестко связанную с телом S , называют системой отсчета S . Заметим, что в формуле (II.1) неявно пренебрегается влиянием процесса измерения положения точки на само это положение. Это допущение оправдывается при рассмотрении движений макроскопических тел; для атомных явлений эта привычная гипотеза неверна.

Чтобы определить положение всех точек системы A относительно системы S , нужно задать радиусы-векторы этих точек. Пусть система A состоит из N материальных точек. Тогда аналогично (II.1)

$$\mathbf{r}_i = x_i \cdot \mathbf{n}_x + y_i \cdot \mathbf{n}_y + z_i \cdot \mathbf{n}_z \quad (i=1, 2, \dots, N) \quad (II.2)$$

где \mathbf{r}_i - радиус-вектор i -той точки, а x_i , y_i , z_i — декартовы координаты i -той точки.

II.2.2. Примеры систем отсчета

Для измерения пространственных и временных величин пользуются *системами отсчёта*. В качестве пространственной системы отсчета можно взять произвольное твердое тело и связать с ним координатные оси, например, декартовой прямоугольной системы координат, реализованные в виде трех взаимно перпендикулярных твердых стержней, как это показано выше (рис. 24).

Для изучения движения планет солнечной системы относительно системы Солнце - звезды можно в течение сравнительно длительного промежутка времени систему Солнце-Звезды считать твердым телом. Несмотря на то, что радиус Земли примерно $6 \cdot 10^6$ м, а радиус Солнца $7 \cdot 10^8$ м Землю и Солнце можно считать материальными точками, поместив начало системы координат в центр Солнца. Направив оси на неподвижные по отношению к Солнцу звезды, получим гелиоцентрическую систему отсчета Коперника. Дело в том, что размеры Земли и Солнца весьма малы по сравнению с расстоянием между центрами Земли и Солнца, составляющим примерно $1,5 \cdot 10^{11}$ м. Но при изучении вращения Земли вокруг своей оси представление о Земле как материальной точке уже неприменимо. Действительно, максимальным размером, характеризующим это движение, является длина окружности, по которой движется какая-либо точка поверхности Земли, находящаяся на экваторе. Очевидно, что радиусом Земли нельзя пренебречь по сравнению с длиной отрезка, на которую переместился объект, который мы считаем материальной точкой.

Совокупность нескольких тел, каждое из которых можно считать материальной точкой, называют системой материальных точек. Например, нашу Галактику можно представлять как систему очень большого числа материальных точек-звезд; в ряде задач газ, состоящий из молекул, также можно представлять себе как систему большого числа материальных точек-молекул.

Из приведенных примеров и из определения материальной точки видно, что это понятие не связано с представлением об атомистическом строении вещества.

Важную роль в механике играет понятие абсолютно твердого тела или, кратко говоря, твердого тела. Так называется система материальных точек, расстояния между которыми не меняется при произвольных перемещениях этой системы. Конечно, размеры реальных тел остаются практически неизменными в определенных условиях, и в течение определенных интервалов времени. Например, годовое угловое смещение большинства звёзд составляет примерно $0,01''$. Следовательно, система Солнце - «неподвижные» звезды может быть принята с известной степенью точности за твердое тело, причем для сравнительно длительных интервалов времени. Под положением здесь понимается относительное положение, т. е. положение тела относительно других тел.

Понятие абсолютного положения, т. е. положения тела в каком-то «абсолютном пространстве» безотносительно к другим телам, лишено содержания.

Тело или система тел, относительно которых определяется положение остальных тел, называется пространственной системой отсчета.

Утверждение, что два различных не одновременных события произошли в одном и том же месте пространства, лишено содержания, если не указана система отсчета, в которой события рассматриваются. Например, если пассажир, находящийся в движущемся железнодорожном вагоне взял из своего чемодана какую-то вещь и спустя некоторое время положил ее обратно, то можно сказать, что он взял и положил эту вещь в одном и том же месте, если за систему отсчета принять движущийся вагон. Но те же два события будут происходить в различных местах, если их рассматривать в системе отсчета, связанной с полотном железной дороги. Например, первое событие внутри вагона могло произойти в Москве, а второе - в Ленинграде.

II.2.3. Системы координат

Существуют два вида систем координат: *правая* и *левая*. Их различают с помощью правила буравчика. Будем ввинчивать буравчик с правой нарезкой, вращая его ручку в плоскости XU кратчайшим путем от положительного конца оси X к положительному концу оси U . В правой системе координат поступательное перемещение буравчика будет происходить в положительном, в левой - в отрицательном направлении оси Z .

На рис. 25 представлена правая система, а на рис. 26 — левая. Обе системы отличаются друг от друга примерно так же, как правая рука отличается от левой.

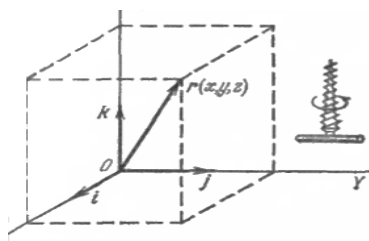


Рис. 25. Правая система координат

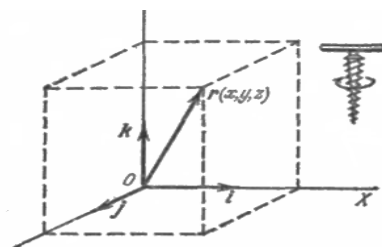


Рис. 26. Левая система координат

Правая система никакими вращениями не может быть совмещена с левой. Но правая система переходит в левую, если изменить на противоположное направление одной из координатных осей. То же самое произойдет, если изменить на противоположные направления всех трех осей. Последняя операция называется *инверсией координатных осей* или *отражением в начале координат*. Например, изображением правой системы в плоском зеркале будет левая система, и наоборот. В физике применяется исключительно правая система.

Координаты x , y , z , которыми определяется положение точки в избранной системе отсчета, являются какими-то числами. Количественное определение этих координат, равно как и количественное определение всякой физической величины, сводится, в конце концов, к указанию принципиального способа их измерения. При этом имеются в виду именно принципиальные, а не практические способы измерения. Эти измерения должны лишь разъяснить смысл, точнее, принципиальный способ получения

x , y , z , равно как и всяких чисел, с помощью которых количественно характеризуются все физические величины. Поэтому мы можем предполагать, что такие способы измерения являются *идеальными*, а самые измерения выполняются абсолютно точно. Координаты x , y , z являются длинами, а потому их нахождение сводится к измерению длин, т. е. к определению тех чисел, с помощью которых характеризуются длины.

II.2.4. Несколько слов о стандарте длины. Измерение длины

Разумно в качестве стандарта использовать какую-то естественную единицу длины, например радиус Земли или некоторую его долю. Именно таким образом возник метр. Первоначально он определялся как $(\pi/2) \cdot 10^{-7}$ доля радиуса Земли. Однако такое определение нельзя считать ни особенно точным, ни удобным. Поэтому и течение долгого времени по международному соглашению в качестве эталона метра принималась длина между двумя Метками, сделанными на особом бруске, который хранится в специальной лаборатории во Франции. Только много позднее поняли, что такое определение метра не столь уж точно, как это необходимо, и не так уж универсально и постоянно, как этого хотелось бы. Поэтому сейчас принят новый стандарт длины как некоторое заранее установленное число длин волн определенной спектральной линии.

Когда мы говорим об измерении длин, то имеем в виду следующую измерительную операцию. Некоторый твердый стержень условно принимается за эталон, а его длина - за единицу длины. При измерении длины тела в каком-либо направлении определяется число, показывающее, сколько раз в этом направлении в теле укладывается выбранный эталон. Это число и называется длиной тела в рассматриваемом направлении. Если оно не целое, то предварительно длину эталона следует разделить на более мелкие части: десятые, сотые и пр. Используя их наряду с самим эталоном, можно представить длину всякого тела в виде десятичной дроби или целого

числа с десятичной дробью. Измерение длины непосредственным прикладыванием эталона или его частей называется *прямым измерением*.

Прямые измерения не всегда возможны. Так, они невозможны при измерении расстояний до удаленных тел, например планет, звезд и других небесных объектов. Они невозможны и при измерении очень малых длин, например таких, с которыми имеет дело физика атома, атомного ядра или элементарных частиц. Во всех этих случаях применяют *косвенные методы*. Правильность измерений длины *косвенными методами* должна контролироваться прямыми методами (разумеется, в тех случаях, когда последние применимы).

За пределами же применимости прямых методов остаются одни только косвенные методы. В этом случае, прямые измерительные операции, с помощью которых первоначально было введено количественное понятие длины, становятся чисто умозрительными, а косвенные методы фактически играют роль основных принципиальных измерительных операций, которыми раскрывается смысл самих длин, или, точнее, тех чисел, которыми длины характеризуются.

Примером косвенного метода может служить *триангуляция*, применяемая для измерения расстояний до удаленных предметов. Прямым методом измеряют длину «базы» AB , с концов которой делают «засечки» удаленного объекта C , т. е. измеряют, углы между базой AB и прямыми AC и BC . По этим данным искомое расстояние до объекта C может быть найдено геометрическим построением или вычислено по формулам геометрии. Если база AB настолько велика, что ее длина не может быть найдена прямым измерением, то можно выбрать более короткую базу и затем найти, длину базы AB описанным косвенным методом. Принципиально это ничего не меняет, важно лишь уяснить теоретическую основу метода. В методе предполагается, что сторонами треугольника ABC являются прямые линии, подчиняющиеся *аксиомам геометрии Евклида*. Но какими материальными объектами реализуются эти стороны? Такими объектами являются световые

лучи, приходящие от объекта C к точкам A и B . Следовательно, в основе рассматриваемого способа лежит гипотеза, что световые лучи прямолинейны, т. е. подчиняются тем же аксиомам геометрии Евклида, что и геометрические прямые линии. Но эта гипотеза не очевидна. Доказать или опровергнуть ее можно только опытным путем. При этом имеются в виду световые лучи в вакууме, а не лучи в атмосфере, где они действительно искривляются из-за изменения показателя преломления от точки к точке. Но такое искривление лучей может быть учтено и действительно учитывается, когда точность измерений этого требует.

Как же можно убедиться в применимости или неприменимости геометрии Евклида к реальному миру в указанном выше смысле? Прямой метод состоит в том, что надо подвергнуть экспериментальной проверке следствия, выводимые из аксиом геометрии Евклида. Одним из таких следствий является, например, теорема, утверждающая, что сумма внутренних углов треугольника равняется 180° . Великий математик Гаусс (1777—1855) измерял в 1821—23 гг. со всей возможной тщательностью внутренние углы треугольника, образованного тремя удаленными горными вершинами. Длины сторон треугольника были порядка 100 км; Он нашел, что в пределах ошибок измерений не наблюдалось нарушений указанной теоремы. Этот метод не годится в масштабах Солнечной системы и бо́льших, так как все измерения производятся Земли, и мы не можем непосредственно измерить все три внутренних угла треугольника, вершинами которого помимо Земли являются, например, какие-либо две планеты или звезды. Здесь мы судим о применимости геометрии Евклида на основании косвенных данных — по согласованности различных результатов, полученных с использованием такой геометрии. Например, можно предварительно вычислить, движение планет Солнечной системы на много лет вперед и проверить, полученные предсказания. Если бы они не оправдались, то одной из причин могла бы быть неприменимость геометрии Евклида к областям пространства порядка размеров Солнечной системы.

Наоборот, согласие с опытом (что на самом деле имеет место) указывает на то, что сомневаться в применимости геометрии Евклида в областях такого размера нет оснований. Не вдаваясь в этот вопрос, ограничимся замечанием, что, по-видимому, нет существенных нарушений геометрии Евклида в областях порядка размеров нашей Галактики ($\sim 10^{20}$ м) и даже Метагалактики, т. е. части Вселенной, доступной исследованию с помощью современных наиболее мощных телескопов ($\sim 10^{26}$ м). Точно так же нет оснований ожидать существенных нарушений геометрии Евклида и в субатомных областях размером, скажем, порядка 10^{-15} м.

Световые лучи при определении положения удаленных тел выполняют и другую важную функцию. Они служат теми материальными объектами, с помощью которых конструируется сама система отсчета. Действительно, твердые стержни не могут быть неограниченно длинными, а потому они не пригодны в качестве координатных осей во всем пространстве. Эту роль берут на себя световые лучи, являющиеся продолжениями в нужных направлениях координатных осей, первоначально реализованный твердыми стержнями.

При прямых измерениях длины тела в каком-либо направлении определяется число, показывающее, сколько раз в этом направлении в теле укладывается выбранный эталон (за эталон принимается некоторый твердый стержень, а его длина - за единицу длины). Это число и называется длиной тела в рассматриваемом направлении. Если оно не целое, то предварительно длину эталона следует разделить на более мелкие части: десятые, сотые и пр. Используя их наряду с самим эталоном, можно представить длину всякого тела в виде десятичной дроби или целого числа с десятичной дробью.

Косвенные методы также играют роль измерительных операций, раскрывающих смысл понятия длины тел, или, точнее, тех чисел, которыми эти длины характеризуются. Как было показано выше, примером косвенного метода измерения длины может служить *триангуляция*, применяемая для измерения расстояний до удаленных предметов.

II.2.5. Измерение времени

Как и всякая физическая величина, время количественно характеризуется некоторыми числами. Важно выяснить, с помощью каких принципиальных измерительных операций эти числа могут быть получены и, тем самым, будет установлен точный смысл самих этих чисел.

Обычно под временем в количественном смысле этого слова понимают показания каких-то часов. То есть, говорят не о самом времени, а о промежутке времени между двумя последовательными событиями или моментами времени. Он характеризуется разностью показаний часов в рассматриваемые моменты времени. Даже когда говорят просто о времени, не указывая оба момента, являющиеся границами рассматриваемого промежутка времени, то предполагают, что один из этих моментов фиксирован и условно считается начальным. От него и ведется отсчет времени.

Часы здесь должны пониматься в широком смысле слова, как некоторое тело или систему тел, в которых совершается периодический процесс, служащий для измерения времени. Примерами таких процессов могут и служить колебание маятника с постоянной амплитудой, и вращение Земли вокруг собственной оси относительно Солнца или звезд, и колебания атома в кристаллической решетке, и колебания электромагнитного поля, представляемого достаточно узкой спектральной линией, и пр.

Так, если между какими-либо двумя событиями Земля при вращении относительно звезд сделала один оборот, то говорят, что промежуток времени между этими двумя событиями составляет *звездные сутки*. Если при этом она совершила 10 оборотов, то соответствующий промежуток времени будет 10 звездных суток, и т.д. Если в течение *звездных суток* маятник совершил приблизительно 86 164 колебания, то говорят, что период одного колебания составляет одну *секунду*, и т.д. От звездных суток следует отличать *солнечные сутки*. Так называется промежуток времени, в течение

которого Земля делает один оборот при вращении вокруг собственной оси относительно Солнца. Ввиду того, что Земля движется вокруг Солнца не по круговой, а по эллиптической орбите, это ее движение не совсем равномерно. Это значит, что солнечные сутки изо дня в день несколько изменяются в течение года. Поэтому при измерении времени пользуются, так называемыми, *средними солнечными сутками*. Они составляют $24 \text{ часа} = 24 \cdot 60 = 1440 \text{ минут} = 1440 \cdot 60 = 86\,400 \text{ секунд}$.

К часам предъявляют требования, чтобы они шли «равномерно». Но что значит, что часы идут равномерно? Говорят, это означает, что периодический процесс, служащий для отсчета времени, должен повторяться через строго одинаковые промежутки времени. Однако убедиться в одинаковости следующих друг за другом промежутков времени можно только в том случае, когда мы уже располагаем равномерно идущими часами. Выйти из этого порочного логического круга можно только путем определения, так как никакого априорного представления о равномерном течении времени не существует, поэтому надо условиться считать какие-то часы по определению равномерно идущими. Такие часы должны рассматриваться как эталонные или основные часы, по которым должны градуироваться все остальные.

В принципе любые часы могут быть приняты как эталонные. Однако так поступать не целесообразно. Эталонные часы должны быть достаточно «хорошими», то есть, прежде всего, обладать высокой воспроизводимостью. Это означает, что если изготовить с возможной тщательностью много «одинаковых» эталонных часов, то они с большой точностью должны идти одинаково, независимо от того, изготовлены ли они одновременно, или между моментами их изготовления прошло длительное время. Например, песочные часы дают несравненно худшую воспроизводимую, чем маятниковые часы. Наилучшая воспроизводимая была достигнута только после изобретения *кварцевых, молекулярных и атомных часов*.

Наконец, за единицу времени могут быть приняты либо средний тропический год, либо некоторая доля его. Для того чтобы разделить эталон времени — средний тропический год — на равные части, применяются те или иные часы. Чаще всего часы - это устройство, в котором происходит какой-либо периодический процесс (т. е. процесс, повторяющийся через равные промежутки времени). Сосчитав число периодов процесса, происходящих в часах в течение среднего тропического года, мы можем разделить год на известное число равных частей и пользоваться продолжительностью одного периода, т. е. известной долей среднего тропического года, как единицей времени. За единицу времени в физике принята 1 секунда, составляющая определенную с высокой точностью долю среднего тропического года.

Часы представляют собой, таким, образом, физический прибор, служащий при измерении времени той же цели, какой служит линейка с нанесенными на ней делениями (расстояние между которыми составляет известную долю эталона длины) при измерении длины. Как и всякий физический измерительный прибор, часы должны удовлетворять известным требованиям, и прежде всего происходящий, в них процесс должен быть точно повторяющимся.

Для разделения эталона времени — среднего тропического года — на равные части, кроме часов с маятником, сейчас применяют, другие типы часов, например кварцевые часы, в которых периодическим процессом служат упругие колебания пластинки, вырезанной из пьезоэлектрического кристалла кварца (эти колебания поддерживаются при помощи схемы с электронными лампами). В последнее время были созданы молекулярные и атомные часы, в которых используются периодические колебания, происходящие в атомах или молекулах; чтобы число этих колебаний можно было считать (с помощью специальных электрических устройств), выбирают такие колебания которым соответствуют спектральные линии, лежащие в области радиоволн.

§ II.3. Измерение механических величин

Механика — раздел физики, в котором изучается простейшая форма движения материи — механическое движение, т. е. перемещение одних им или частей тела относительно других. Эти движения возникают в результате действия на данное тело или данную часть тела сил со стороны других тел или других частей тела. Задача механики состоит в экспериментальном исследовании различных движений и обобщении полученных экспериментальных данных в виде законов движения, на основании которых далее в каждом конкретном случае может быть предсказан характер возникающего движения. Для этого необходимо знать не только свойства тел, движение которых рассматривается, но и характер тех сил, которые действуют в том или ином конкретном случае. Но вопросы о природе сил, вызывающих механические движения, выходят за рамки механики. На эти вопросы механика ответить не в состоянии, они изучаются в других разделах физики — в электродинамике, молекулярной физике и т. д. Поэтому независимо от природы сил, вызывающих механическое движение, изучение этих движений должно рассматриваться как задача механики. Наметить границы механики как раздела физики на основании каких-либо признаков, касающихся природы сил, вызывающих движение, невозможно; любое такое разделение всегда оказалось бы более или менее произвольным [16].

К задачам механики с одинаковым основанием могут быть отнесены как движения тела под действием упругих сил, сил трения и сил всемирного тяготения, так и движения электрически заряженного тела под действием сил со стороны других электрически заряженных тел (неподвижных или движущихся). Однако относить к механике все задачи о движении электрически заряженных тел невозможно, потому что среди этих задач встречаются такие, которые не могут быть решены путем применения только

законов механики, а требуют применения также законов, лежащих в основе других разделов физики, в частности электродинамики.

Ввиду исключительной роли, которую играют законы Ньютона в механике, приведем их в том виде, в каком они были сформулированы самим Ньютоном (перевод акад. А. Н. Крылова). Формулировке основных законов Ньютон предпосылает восемь определений, из которых, для нас здесь важны первые четыре.

Определение 1. Количество материи (масса) есть мера таковой, устанавливаемая пропорционально плотности и объему её.

Определение 2. Количество движения есть мера такового, устанавливаемая пропорционально скорости и массе.

Определение 3. Врожденная сила материи есть присущая ей способность сопротивления, по которой всякое отдельно взятое тело, поскольку оно предоставлено самому себе, удерживает свое состояние покоя или равномерного прямолинейного движения.

Определение 4. Приложенная сила есть действие, производимое над телом, чтобы изменить его состояние покоя или равномерного прямолинейного движения.

Законы Ньютона

Закон 1. Всякое тело продолжает удерживаться в своем состоянии покоя или равномерного и прямолинейного движения, пока и поскольку оно не понуждается приложенными силами изменить это состояние.

Закон 2. Изменение количества движения пропорционально приложенной движущей силе и происходит по направлению той прямой, по которой эта сила действует.

Закон 3. Действию всегда есть равное и противоположное противодействие, иначе — взаимодействия двух тел друг на друга между собою равны и направлены в противоположные стороны.

(Понятие массы у Ньютона отличается неясностью, поскольку им не было дано определение плотности. Кроме того, представление, массы как произведения объема тела на плотность содержащегося в нем вещества возможно только для макроскопических тел, но не для элементарных и атомных частиц. Поэтому «ньютоново» определение массы не удержалось в науке, и было заменено другими определениями.)

II.3.1. Закон инерции. Инерциальная система отсчета.

Силы. Кинематика и динамика

I. В качестве первого закона Ньютон *принял закон, инерции, открытый еще Галилеем.* Согласно этому закону тело (материальная точка), не подверженное внешним воздействиям, либо находится в покое, либо движется прямолинейно и равномерно. Такое тело называется свободным, а его движение - свободным движением или движением по инерции.

Свободных тел, строго говоря, не существует. Они являются физическими абстракциями. Однако можно поставить тело в такие условия, когда внешние воздействия, на него по возможности устранены или практически компенсируют друг друга. Представив себе, что эти воздействия беспредельно уменьшаются, мы и приходим в пределе к представлению о свободном теле и свободном движении.

Здесь, однако, возникает следующая трудность. Как убедиться в том, что тело не подвержено внешним воздействиям? Об этом нельзя судить по отсутствию ускорений. Нужны какие-то другие независимые способы. Иначе закон инерции потерял бы всякое содержание. Вполне удовлетворительного ответа на этот вопрос не существует. В отсутствии внешних воздействий мы убеждаемся по отсутствию растягивающих пружин или веревок, которые тянут тело, по отсутствию тел, которые давят на него, и т. д. Но тело может испытывать воздействия не только со стороны тел, с которыми оно соприкасается. Оно может подвергаться воздействиям также со стороны различного рода силовых полей, возбуждаемых другими телами. Поэтому

вопрос сводится к тому, как убедиться в том, что воздействиям со стороны силовых полей тело не подвергается.

Все силы, встречающиеся в природе, известные в настоящее время, сводятся к силам гравитационного притяжения, электромагнитным силам и силам, действующим между атомными ядрами и элементарными частицами (ядерные силы, слабые взаимодействия). От действия последних сил легко освободиться, так как они являются силами короткодействующими и проявляются лишь на расстояниях, меньших примерно 10^{-12} см.

Электромагнитные и гравитационные силы, напротив, являются силами далекодействующими. С расстоянием они убывают медленно. Если это статические силы, то они убывают обратно пропорционально квадрату расстояния. Если же они переменные (электромагнитные волны), то убывание происходит еще медленнее — обратно пропорционально расстоянию. Только благодаря электромагнитным волнам (свет, радиоизлучение, рентгеновское излучение), исходящим от планет, звезд, пульсаров, галактик и пр., мы и знаем о существовании этих небесных объектов. Поэтому нет оснований утверждать, что удаленные источники не возбуждают заметных электромагнитных и гравитационных полей в рассматриваемой нами области пространства. Вместе с тем, в отсутствие электромагнитных полей всегда можно убедиться, так как они действуют по-разному на положительные и отрицательные заряды, из которых состоят тела. Под действием таких полей возникло бы некоторое разделение положительных и отрицательных зарядов, которое можно было бы обнаружить на опыте. Заряженный шарик, помещенный в одну и ту же точку пространства, двигался бы по-разному в зависимости от того, заряжен он положительно или отрицательно. Все имеющиеся факты не противоречат утверждению, что удаленные тела Вселенной не возбуждают сколько-нибудь заметных статических электромагнитных полей в малых областях пространства (порядка размеров Солнечной системы или Галактики).

О гравитационных полях этого нельзя сказать с той же уверенностью. Но если бы такие поля и существовали, то с ними можно было бы не считаться. Дело в том, что всем телам, независимо от их состава, одно и то же гравитационное поле сообщает в точности одинаковое ускорение. Статическое гравитационное поле удаленных тел Вселенной в малых областях пространства можно считать практически однородным. Можно ввести систему отсчета, свободно падающую в таком однородном гравитационном поле. На явлениях, происходящих в такой системе отсчета, наличие этого однородного гравитационного поля никак не сказывается. Здесь все происходит в точности так же, как в кабине космического корабля, движущегося в космическом пространстве. В такой; кабине космонавты не чувствуют наличия поля тяготения (невесомость). Переменные же гравитационные поля (гравитационные волны) слишком слабы. Попытки их экспериментального обнаружения стали предприниматься лишь в последнее время. Еще нельзя с уверенностью утверждать, что существование таких, волн подтверждено экспериментально.

2. Приступая к решению задач механики, необходимо, прежде всего, рассмотреть методы описания движений. Раздел механики, в котором рассматриваются только методы описания движений, но не ставятся вопросы о законах движения, называется, кинематикой. В кинематике выбор системы отсчета не является существенным, поскольку все системы отсчета кинематически эквивалентны. Именно закон инерции с особой остротой ставит вопрос о выборе системы отсчета. Одно и то же движение выглядит по-разному в разных системах отсчета. Если в какой-либо системе отсчета тело движется прямолинейно и равномерно, то в системе отсчета, движущейся относительно первой ускоренно, этого уже не будет. Отсюда следует, что закон инерции не может быть справедлив во всех системах отсчета. Без указания системы отсчета он просто, теряет смысл. Классическая механика; постулирует, что существует система отсчета, в которой все свободные тела движутся прямолинейно и равномерно. Такая

система называется инерциальной системой отсчета. Содержание закона инерции, в сущности, сводится к утверждению, что существует по крайней мере одна инерциальная система отсчета.

Это утверждение является обобщением громадной совокупности опытных фактов. Точно так же только опытным путем можно установить, какие системы отсчета являются инерциальными, а какие не инерциальными. Допустим, например, что речь идет о движении звезд, и других астрономических объектов в доступной нашему наблюдению части Вселенной. Тогда, можно утверждать, что система отсчета, в которой Земля принимается неподвижной (такую систему мы будем называть земной), не будет инерциальной. Действительно, в такой системе звезды совершают суточные вращения на небесном своде. Так как расстояние до звезд очень велико, то при этом развиваются очень большие центростремительные ускорения, направленные к Земле. Между тем, каждая звезда, ввиду ее громадной удаленности от других небесных тел, практически является свободной. Свободное движение звезды в земной системе отсчета совершается по кругу, а не по прямой линии. Оно не подчиняется закону инерции, а потому земная система отсчета не будет инерциальной. Надо испытать на инерциальность другие системы отсчета. Попробуем взять гелиоцентрическую систему отсчета, иначе называемую системой Коперника. Это есть координатная система, начало которой помещено в центре Солнца (точнее, в центре масс Солнечной системы), а координатные оси являются прямыми, направленными на три удаленные звезды и не лежащими в одной плоскости. Материальными объектами, с помощью которых реализуются эти оси, являются световые лучи, приходящие от звезд в Солнечную систему. Благодаря относительному движению звезд углы между координатными осями в системе Коперника не остаются постоянными, а медленно изменяются с течением времени. Однако ввиду колоссальности расстояний до звезд изменения направлений координатных осей происходят настолько медленно, что, как правило, их можно не

принимать во внимание. Система Коперника практически является инерциальной системой, по крайней мере при изучении движений, происходящих в масштабе нашей планетной системы, а также всякой другой системы, размеры которой малы по сравнению с расстояниями до тех. трех звезд, которые в системе Коперника выбраны в качестве опорных. Это доказывалось опытами, большинство из которых, являются косвенными. Например, опытами Фуко (маятник Фуко). Эти же опыты доказывают неинерциальность земной системы отсчета.

3. Неинерциальность. земной системы отсчета объясняется тем, что Земля вращается вокруг собственной оси и вокруг Солнца, т. е. движется ускоренно относительно системы Коперника. Впрочем, оба эти вращения происходят медленно. Поэтому по отношению к громадному кругу явлений земная система отсчета ведет себя практически как инерциальная система. Обычные, сравнительно грубые наблюдения и опыты над движением тел не позволяют обнаружить отступления от инерциальности земной системы отсчета. Для этого требуются точные и тонкие опыты. Вот почему при установлении основных законов динамики можно начать с изучения движения тел относительно Земли, отвлекаясь от ее вращения, т. е. принять Землю за приблизительно инерциальную систему отсчета.

4. Если три звезды, используемые в системе Коперника для фиксирования направлений координатных осей, принадлежат нашей Галактике, то, разумеется, такая система может играть роль инерциальной или, точнее, приблизительно инерциальной системы отсчета только тогда, когда речь идет о движении объектов, малых по сравнению с размерами Галактики, например, о движении Солнечной системы или ее частей. Но при рассмотрении движений всей Галактики или нескольких галактик это будет уже не так. Тогда для построения (приблизительно) инерциальной системы отсчета можно использовать какие-либо другие четыре астрономических объекта, расстояния между которыми весьма велики по сравнению с размерами области пространства, внутри которой совершается движение

рассматриваемых тел. Центр одного из этих астрономических объектов можно принять за начало координат, а остальные три объекта использовать для фиксирования направления координатных осей.

5. Законы движения и их применение к отдельным конкретным задачам изучает динамика. Динамика в виде частного случая включает в себя статику, изучающую условия, при которых тела останутся в покое. В зависимости от свойств тел, движение которых изучается, характера изучаемых движений и содержания вопросов, на которые должен быть получен ответ, механика делится на механику точки, механику твердых (недеформируемых) тел и механику упругих тел (последняя включает в себя механику жидкостей и газов).

II.3.2. Измерение массы и плотности

В своем повседневном опыте человек выделил такие свойства вещей, как форму, цвет, размеры, тяжесть и многое другое. Эти свойства не зависели от человека, пассивно присутствовали всегда и воспринимались вполне естественно. Толкование массы как количества вещества в единице объема было дано ещё в древности и вплоть до XVIII века вполне соответствовало научным представлениям того времени. Позднее, с таким понятием массы, было связано понятие плотности.

Измерение массы

Особым свойством, связанным с массой, предстала перед человеком инерция тел. Вероятно человек почувствовал и оценил это свойство, когда стал пользоваться предметами, как орудиями труда. Если камень можно поднять, не особо задумываясь над его тяжестью, то для броска требуется сила. Небольшой предмет легко оттолкнуть, а от большого, можно оттолкнуться. Необходимость количественной оценки инерции тел (измерения) возникла с изобретением метательных машин. От массы (тяжести) снаряда, выпущенного катапультой, зависела не только его разрушительная сила, но и дальность полета.

Всякое тело оказывает сопротивление при попытках привести его в движение или изменить величину или направление его скорости. Это свойство тел и называли инертностью. У разных тел инертность проявляется в разной степени. Так, сообщить одно и то же ускорение большому камню значительно труднее, чем маленькому мячику. Толкование массы как меры инертности тела впервые было дано Ньютоном.

Поскольку толкование массы как количества вещества в единице объема во многих случаях нас устраивает, то это понятие можно использовать для измерения масс, но для этого необходимо условиться, массу какого тела считать равной единице. Такое тело называется эталоном массы. Тогда массы всех остальных тел определятся однозначно. В частности, все они окажутся положительными, так как знаки всех масс одинаковы, а масса эталонного тела положительна.

В физике в качестве основной единицы массы принят *килограмм*. Килограмм есть масса эталонной гири из сплава иридия с платиной, хранящейся в Севре (Франция) в Международном бюро мер и весов. Приблизительно килограмм равен массе кубического дециметра чистой воды при температуре 4°C . Тысячная доля килограмма называется *граммом*. В отличие от длины и времени, для которых установлены естественные единицы, единица массы определена, таким образом, как масса некоторого случайно выбранного тела. Но и для массы было бы лучше установить естественную единицу. Например, можно было бы основным эталоном массы считать массу какой-либо элементарной частицы, например, протона.

Измерение плотности

Плотность – это физическая величина, производная от массы и определяемая для однородного вещества его массой в единице объема. Обычно обозначается символом ρ .

При определенных физических условиях можно использовать и понятие *относительная плотность*. Для жидких и твердых веществ

относительная плотность обычно определяется по отношению к плотности дистиллированной воды при 4°C, для газов – по отношению к плотности сухого воздуха или водорода при нормальных условиях. Для неоднородных веществ можно вводить понятие средняя плотность, которая определяется отношением массы тела m к его объему V , т.е. $\rho = m/V$. Единицей плотности в СИ является $кг/м^3$.

Измерение плотности основывается на методах измерения массы и объема: взвешивание, гидростатическое взвешивание (*весы Мора*), и т.п. Приборы для измерения плотности называют «*плотномерами*».

Плотность жидкостей и твердых тел мало изменяется под действием внешнего давления.

Зависимость плотности от температуры при постоянном давлении выражается уравнением:

$$\rho_2 = \frac{\rho_1}{1 + \beta(t_2 - t_1)} \quad (II.3)$$

где ρ_1 и ρ_2 – соответственно плотность при температуре t_1 и t_2 ;

β – это средний коэффициент объемного теплового расширения в интервале от t_1 до t_2 .

В промышленности наибольшее распространение получили:

- 1) механические плотномеры (поплавковые, весовые, гидростатические);
- 2) рефрактометрические и поляризационные;
- 3) кондуктометрические;
- 4) радиоизотопные и ультразвуковые.

Диапазон значений плотности веществ и сред исключительно широк. Значения плотности некоторых широко используемых веществ и материалов приведены в *таблице II.1*.

В данной справочной таблице представлены плотности различных материалов и сред, данные структурированы по следующим группам:

Таблице II.1

Металлы черные

Наименование материала	Плотность материалов, кг/м³
Сталь 10 ГОСТ 1050-88	7856
Сталь 20 ГОСТ 1050-88	7859
Сталь 40 ГОСТ 1050-88	7850
Сталь 60 ГОСТ 1050-88	7800
С235-С375 ГОСТ 27772-88	7850
Ст3пс ГОСТ 380-2005	7850
Чугун ковкий КЧ 70-2 ГОСТ 1215-79	7000
Чугун высокопрочный ВЧ35 ГОСТ 7293-85	7200
Чугун серый СЧ10 ГОСТ 1412-85	6800
Чугун серый СЧ20 ГОСТ 1412-85	7100
Чугун серый СЧ30 ГОСТ 1412-85	7300
Цветные металлы и сплавы.	
Наименование материала	Плотность материалов, кг/м³
Алюминий и сплавы алюминиевые	
Силумин АК12Ж ГОСТ 1583-93	2700
Сплав АК12 ГОСТ 1583-93	2710
Сплав АК5М ГОСТ 1583-93	2640
Сплав АК7 ГОСТ 1583-93	2700
Сплав АО9-1 ГОСТ 14113-78	2700
Баббиты оловянные и свинцовые	
Б83 ГОСТ 1320-74	7380
Б87 ГОСТ 1320-74	7300
БН ГОСТ 1320-74	9550
Магний и сплавы магниевые	
Сплав МЛ10...МЛ19 ГОСТ 2856-79	1810
Сплав ВМЛ5	1890
Сплав ВМЛ9	1850
Медь и медные сплавы	
Бронза оловянная БрО10С10	8800
Бронза оловянная БрО19	8600
Бронза оловянная БрОС10-10	9100
Бронза оловянная БрОА10-1	8750
Бронза БрА10ЖЗМч2 ГОСТ 493-79	8200
Бронза БрА9ЖЗЛ ГОСТ 493-79	8200
Бронза БрМц5 ГОСТ 18175-78	8600
Латунь Л60 ГОСТ 15527-2004	8800
Латунь ЛА ГОСТ 1020-97	8500
Медь М0, М1, М2, М3 ГОСТ 859-2001	8940
Медь МСр1 ГОСТ 16130-90	8900
Титан и титановые сплавы	
ВТ1-0 ГОСТ 19807-91	4500
ВТ14 ГОСТ 19807-91	4500
ВТ20Л ГОСТ 19807-91	4470

Плотность неметаллических конструкционных материалов	
Неметаллических конструкционные материалы	
Наименование материала	Плотность материалов, кг/м³
Фторопласты.	
Ф-4 ГОСТ 10007-80 Е	2100
Фторопласт - 1 ГОСТ 13744-87	1400
Фторопласт - 2 ГОСТ 13744-87	1700
Фторопласт - 3 ГОСТ 13744-87	2710
Фторопласт - 4Д ГОСТ 14906-77	2150
Термопласты	
Дакрил-2М ТУ 2216-265-057 57 593-2000	1190
Полиметилметакрилат ЛПТ ТУ 6-05-952-74	1180

Полиметилметакрилат суспензионный ЛСОМ ОСТ 6-01-67-72	1190
Винипласт УВ-10 ТУ 6-01-737-72	1450
Поливинилхлоридный пластикат ГОСТ 5960-72	1400
Полиамид ПА6 блочный Б ТУ 6-05-988-87	1150
Полиамид ПА66 литьевой ОСТ 6-06-369-74	1140
Капролон В ТУ 6-05-988	1150
Капролон ТУ 6-06-309-70	1130
Поликарбонат	1200
Полипропилен ГОСТ 26996-86	900
Полиэтилен СД	960
Лавсан литьевой ТУ 6-05-830-76	1320
Лавсан ЛС-1 ТУ 6-05-830-76	1530
Стиролпласт АБС 0809Т ТУ 2214-019-002 03521-96	1050
Полистирол блочный ГОСТ 20282-86	1050
Сополимер стирола МСН ГОСТ 12271-76	1060
Полистирол ударопрочный УПС-0505 ГОСТ 28250-89	1060
Стеклопластик ВПС-8	1900
Стеклотекстолит конструкционный КАСТ-В ГОСТ 10292-74	1850
Винилискожа-НТ ГОСТ 10438-78	1440
Резина БЖ ТУ 38-005-1166-98	1050
Резина ВР-10 ТР 18-962	1800
Стекло листовое ГОСТ 111-2001	2500
Стекло органическое техническое ТОСН ГОСТ 17622-72	1180

Прочие металлы.	
Наименование материала	Плотность материала ρ, кг/м³
Вольфрам ВА ГОСТ 18903-73	19300
Вольфрам ВТ-7 ГОСТ 18903-73	19300
Золото Зл 99,9 ГОСТ 6835-2002	19300
Индий ИНО ГОСТ 10297-94	7300
Кадмий КдО ГОСТ 1467-93	8640
Олово О1пч ГОСТ 860-75	7300
ПаладийПд 99,8 ГОСТ 13462-79	12160
Платина Пд 99,8 ГОСТ 13498-79	21450
Свинец С0 ГОСТ 3778-98	11400
Серебро 99,9 ГОСТ 6836-2002	11500
Цинк Ц1 ГОСТ 3640-94	7130

Прочие материалы.	
Наименование материала	Плотность материалар, кг/м³
Древесина, пробка	480
Древесина, лиственница	660
Древесина, липа	530
Древесина, ель	450
Древесина, сосна	520
Древесина, береза	650
Древесина, буд	690
Бумага	700-1200
Резина	900-2000
Кирпич	1400-2100
Фарфор	2300
Бетон	2000-2200
Цемент	2800-3000

Различные жидкости.	
Наименование жидкости	Плотность жидкости, кг/м³
Жидкий водород	70
Эфир	740

Бензин	750
Ацетон	795
Керосин	800
Спирт метиловый	810
Нефть	820...920
Масло подсолнечное	915
Масло оливковое	920
Вода	1000
Вода морская	1025
Глицерин	1260
Серная кислота	1840
Ртуть	13600
Различные газы.	
Наименование газа	Плотность газар, кг/м³
Водород	0,090
Гелий	0,178
Водяной пар	0,598
Метан	0,717
Аммиак	0,771
Неон	0,900
Азот	1,250
Этилен	1,260
Воздух	1,293
Кислород	1,429
Аргон	1,784
Углекислый газ	1,977
Хлор	3,214
Криптон	3,743
Ксенон	5,851

II.3.3. Измерение скорости, ускорения

Теперь поговорим о движении материальных объектов. Свяжем, для простоты, с каждым материальным объектом точку, если, как сказано выше, объект мал по сравнению с тем расстоянием, которое он проходит.

Например, если говорить об автомобиле, прошедшем 100 км, то какая разница имеется в виду его мотор, или багажник. Конечно, небольшая разница есть, но обычно мы просто говорим «автомобиль» и то, что он не является абсолютной точкой, не имеет значения. Для наших целей не нужна абсолютная точность. Ради простоты забудем на время также и о том, что наш мир трехмерный, а сконцентрируем свое внимание на движении в одном направлении (автомобиль движется по прямой дороге). Мы еще вернемся к понятию трех измерений, когда поймем, как описывается движение в одном измерении. Вы, вероятно, скажете, что это тривиально. Действительно, это так. Как описать движение в одном измерении, скажем движение

автомобиля. Это проще простого. Приведу один из многих возможных способов. Чтобы определить положение автомобиля в различные моменты времени, мы измеряем расстояние его от начальной точки и записываем наши наблюдения. В *таблице II.2* буква s означает расстояние автомобиля от начальной точки в метрах, а t — время в минутах. Первая строка — нулевое расстояние и нулевой момент времени. Автомобиль еще не начал двигаться. Через минуту после начала движения он проходит уже 380 м. Через две минуты он продолжает двигаться. Заметьте, что за вторую минуту он прошел большее расстояние, чем за первую, — автомобиль ускоряет свое движение, но между третьей и четвертой минутами что-то произошло, более того, на пятой минуте он остановился. По-видимому, у светофора, потому что дальше он опять набирает скорость и к концу шестой минуты проходит 4050 м, к концу седьмой -5550 м, а к концу восьмой -7050 м. Но в течение девятой минуты опять происшествие - автомобиль прошел всего лишь 450 м и остановился. Возможно водитель нарушил правила движения и был остановлен полицейским.

Таблица II.2

Расписание движения автомобиля

t , мин,	s , м	t , мин,	s , м
0	0	5	3150
1	380	6	4050
2	1350	7	5550
3	2550	8	7050
4	2850	9	7500

Это один способ описать движение. Есть и другой способ — графический. Если по горизонтали откладывать время, а по вертикали — расстояние, то получим кривую, подобную изображенной на *рис. 27*.

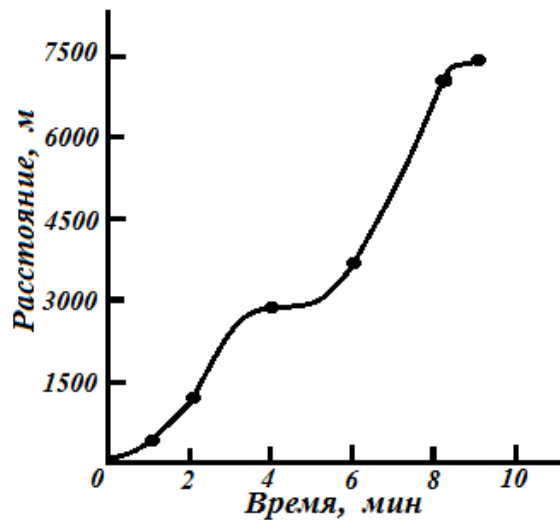


Рис. 27. График зависимости расстояния, пройденного машиной, от времени

Из рисунка видно, что с увеличением времени расстояние тоже увеличивается, сначала очень медленно, а затем все быстрее и быстрее. В районе четырех минут происходит замедление, а затем расстояние опять увеличивается в течение нескольких минут, и, наконец, на девятой минуте машина останавливается. Все эти сведения можно получить прямо из графика, не используя таблицы. Конечно, для построения нашего графика необходимо знать, где находится автомобиль не только каждую минуту, но и каждые полминуты, а может быть, и еще точнее. Кроме того, мы предполагаем, что машина где-то находится в любой момент времени.

Неравномерное движение автомобиля, как мы видим, выглядит достаточно сложно. Рассмотрим более простое движение: например, падающий шар. В *таблице II.3* даны значения времени в секундах и расстояния в метрах. За нулевой момент выберем момент начала падения.

Через 1 сек после начала падения шарик пролетает 5 м, через 2 сек — 20 м, через 3 сек — 45 м. Если отложить эти числа на графике, то получим параболическую кривую зависимости расстояния от времени для падающего тела (*рис. 28*), которая описывается формулой

$$s = 5 \cdot t^2. \quad (II.4)$$

Таблица II.3

Расписание движения падающего тела

$t, \text{сек}$	$S, \text{м}$
0	0
1	5
2	20
3	45
4	80
5	125
6	180

Эта формула позволяет вычислить расстояние для любого момента времени. Очевидно, что для первого графика (см. рис. 27) тоже должна быть какая-то формула. Действительно это так. Ее можно записать в таком абстрактном виде:

$$s = f(t). \quad (II.5)$$

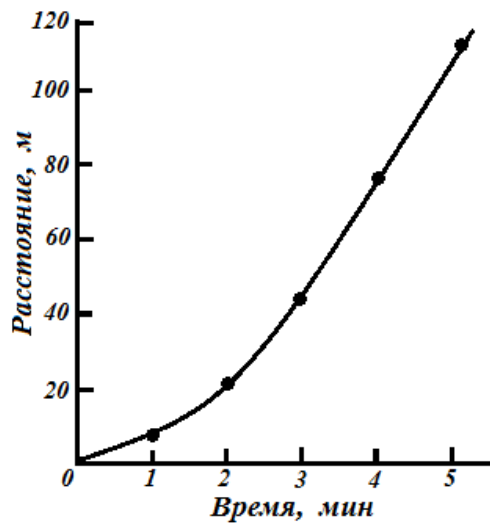


Рис. 28. График, зависимости расстояния, пройденного падающим шаром, от времени

Это означает, что s — величина, зависящая от t , или, как говорят математики, s есть функция t . Однако мы не знаем, что это за функция, точнее, мы не можем записать ее через какие-то известные нам функции.

Из этих двух примеров видно, что любое движение можно писать в общей и простой форме. Казалось бы, нет ничего хитрого! Однако хитрости все же есть, и не одна!

Во-первых, вспомним о том, что мы обсуждали выше. Пространство и Время, очень глубокие философские понятия, которые, даже в таких простых

случаях, необходимо внимательно анализировать, что, как мы видим, не так-то легко. И теория относительности показывает, что понятия Пространство и Время не так просты, как это кажется на первый взгляд. Впрочем, сейчас нам не нужна излишняя скрупулезность в определении этих понятий.

Возможно, вы скажете: «Странно, мне всегда говорили, что в науке все должно определяться точно». Это не так. Мы не можем определить точно все без исключения! Если бы мы пытались это сделать, то получилось бы нечто похожее на спор двух «философов», где один говорит: «Вы сами не знаете, о чем говорите»; а второй отвечает: «А что такое «знать»? Что такое «говорить»? Что такое «вы», наконец?» Ну и так до бесконечности. Так что для пользы дела лучше сначала условиться, что мы будем говорить хотя бы приблизительно об одних и тех же вещах.

Во-вторых, мы уже достаточно много знаем о времени, но и здесь есть некоторые тонкости, которые мы еще обсудим в дальнейшем. Другая хитрость, к которой мы прибегли, это то, что наблюдаемая нами движущаяся точка всегда находится в каком-то определенном месте (т.е. где-то локализована). Разумеется, когда мы смотрим на нее, она находится в определенном месте; но можно ли это утверждать в те моменты, когда мы отвернулись. Например, известно, что при изучении движения атомов так думать нельзя. Невозможно посадить метку на атом и наблюдать за его движением. С этой тонкостью имеют дело в квантовой механике. Но сначала давайте рассмотрим те проблемы, которые возникают задолго до введения этих усложнений, а уж после этого учтем те поправки, на которые нас вынуждают новейшие сведения о природе вещей.

II.3.4. Измерение фундаментальных механических сил

Понятие массы у Ньютона отличается неясностью, поскольку им не было дано определения-плотности. Кроме того, представление, массы как произведения объема тела на плотность содержащегося в нем вещества возможно только для макроскопических тел, но не для элементарных и

атомных частиц. Поэтому ньютоново определение массы не удержалось в науке и было заменено другими определениями.

Аристотель и его последователи рассматривали силу как причину движения. Они считали, что с прекращением действия силы прекращается и движение тела. Сила необходима для поддержания движения. Установление первого закона Ньютона означало, что такое представление о силе является неправильным, так как для поддержания (равномерного) движения никаких «сил» не требуется. Силу стали рассматривать как причину изменения количества движения тела. А так как это изменение вызывается другими телами, то можно дать следующее определение силы. *Сила есть мера интенсивности взаимодействия тел, проявляющаяся в изменении их количества движения.*

Ниже мы подробно разберем содержание законов Ньютона и связанных с ними понятий, хотя и не будем следовать той системе изложения, которая была принята самим Ньютоном.

Момент количества движения

Для точного определения «момента количества движения» введем понятие изолированной или замкнутой системы. Так называют систему тел, настолько удаленных от всех остальных тел, что они практически не оказывают никакого действия на рассматриваемую систему тел. То есть, тела системы могут взаимодействовать только между собой.

Рассмотрим теперь изолированную систему, состоящую из двух материальных точек. Скорости точек должны быть малы по сравнению со скоростью света. В результате взаимодействия материальных точек их скорости меняются. Пусть v_1 - скорость точки 1, v_2 - скорость точки 2, а Δv_1 и Δv_2 - приращения этих скоростей за один и тот же промежуток времени Δt . Величины Δv_1 и Δv_2 имеют противоположные направления и связаны между собой соотношением

$$m_1 \Delta v_1 = - m_2 \Delta v_2, \quad (II.6)$$

где величины m_1 и m_2 постоянны, имеют одинаковые знаки и совершенно не зависят от характера взаимодействия между материальными точками *1* и *2*.

Например, взаимодействие может происходить путем столкновения материальных точек между собой. Его можно осуществить, сообщив точкам электрические заряды или поместив между ними маленькую пружинку и т.д. Продолжительность времени можно менять произвольным образом. Векторы скорости при этом будут меняться. Произведение масс тел на скорость их движения называют *моментом количества движения*. Поскольку масса скалярная величина, а скорость – *вектор*, то *момент количества движения* – *вектор*. Однако коэффициенты, а точнее, их отношение, останутся одними и теми же. Эти результаты надо рассматривать как опытные факты, подтвержденные бесчисленным множеством примеров. То есть, коэффициенты m_1 и m_2 являются некоторыми характеристиками самих материальных точек системы. Их называют *массами* или, точнее, *инертными массами* материальных точек *1* и *2*.

Таким образом, *отношение масс двух материальных точек равно взятому с противоположным знаком отношению приращений скоростей этих точек в результате взаимодействия между ними*. При этом предполагается, что рассматриваемые точки образуют изолированную систему и движутся с нерелятивистскими скоростями.

Измерение механических сил

Прежде чем мы научимся измерять силы, мы должны ответить на вопрос: Что такое сила? Если тело ускоряется, стало быть, на него что-то действует. А как найти это «что-то»? Для этого нужно установить «законы для действующих сил». Первые законы для сил тяготения были установлены Кеплером и Ньютоном.

Что за силы действуют на тело вблизи поверхности Земли? Это сила тяжести, направленная вертикально вниз, пропорциональная массе тела и для высот, много меньших чем радиус Земли R , почти не зависящая от высоты.

Она равна

$$F = GmM/R^2 = mg, \quad (II.7)$$

где $g = GM/R^2$ – так называемое *ускорение силы тяжести*. Если тело до падения двигалось горизонтально с постоянной скоростью, то это движение и будет продолжаться с постоянной скоростью, однако движение в вертикальном направлении нам более интересно. По второму закону Ньютона

$$mg = m(d^2x/dt^2). \quad (II.8)$$

После сокращения массы m получаем, что ускорение в направлении x постоянно и равно g . Это хорошо известное движение свободно падающего тела.

Рассмотрим другой пример. *Груз на пружине*.

Поскольку сила тяжести компенсируется начальным натяжением пружины, то имеет смысл говорить только об *избыточной* силе. Если потянуть грузик вниз, то пружина растянется и потянет его вверх, если же толкать грузик вверх, то пружина сожмётся, и будет толкать его вниз.

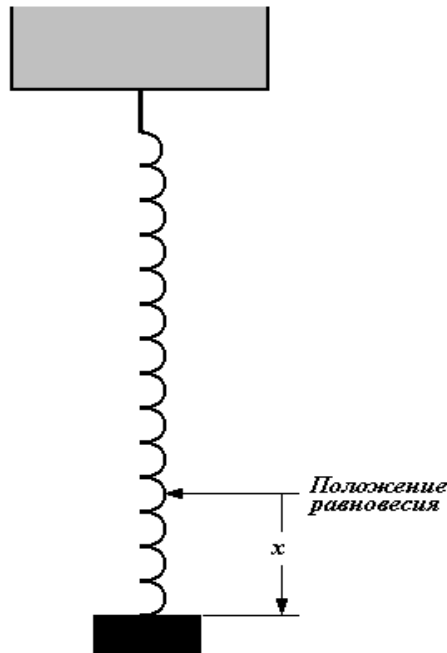


Рис 29. Груз на пружине

То есть, если вывести грузик из положения равновесия, то возникнут

колебания грузика около положения равновесия. Возникает вопрос, могут ли уравнения Ньютона правильно описать эти движения? Если применить закон Ньютона для такого периодического осциллятора, то получим следующее уравнение:

$$-kx=m(dv_x/dt), \quad (II.9)$$

т.е. здесь мы встречаемся с таким положением, когда x -компонента скорости изменяется с быстротой, пропорциональной x . Предположим, пока, для простоты, что k/m равно единице. То есть, будем решать уравнение

$$-x=dv_x/dt. \quad (II.10)$$

Чтобы пойти в наших рассуждениях дальше, нужно сначала разобраться в том, что такое v_x (то, что это быстрота изменения положения, нам, разумеется, уже известно).

Смысл динамических уравнений

Нам известно, что v_x – это скорость, с которой тело движется в точке x в некоторый момент времени t . Для определенности предположим, что в момент $t=0$, $x=1$, а его скорость $v_x=0$. В любом положении, за исключением $x=0$ (положение равновесия) на груз действует *сила* и поэтому он движется. Если $x>0$, то эта сила направлена вверх, если $x<0$, вниз. Следовательно, сила есть вектор. Она получается как результат произведения массы груза на производную скорости по времени t . Иными словами, производная импульса $dp_x/dt=m(dv_x/dt)$ материальной точки по времени равна действующей на нее силе. Это положение называется вторым законом Ньютона. Масса, умноженная на ускорение, равна действующей силе. Фактическое содержание второго закона Ньютона, подчеркнем это еще раз, состоит в том, что сила F зависит только от координат и скорости материальной точки.

Груз на спиральной пружине является простейшим примером, подтверждающим второй закон Ньютона. Если немного оттянуть тело вниз из положения равновесия, а затем отпустить, то возникнут колебания груза вверх и вниз. При подходящих параметрах системы колебания будут затухать

слабо. Мгновенное положение тела характеризуется координатой x - смещением тела из положения равновесия. Функция $x(t)$ почти не отличается от синусоиды и представляется уравнением

$$x = A \cdot \cos 2\pi t/T, \quad (II.11)$$

где A и T - постоянные, называемые *амплитудой* и *периодом* колебаний. Дважды дифференцируя это выражение, находим скорость и ускорение:

$$\begin{aligned} \dot{x} &= -\frac{2 \cdot \pi \cdot A}{T} \cdot \sin \frac{2\pi \cdot t}{T}, \\ \ddot{x} &= -\left(\frac{2\pi}{T}\right) \cdot A \cos \frac{2\pi \cdot t}{T}. \end{aligned} \quad (II.12)$$

Сравнивая последнее выражение с первым, получим уравнение

$$\ddot{x} = -\left(\frac{2\pi}{T}\right)^2 x, \quad (II.13)$$

или после умножения на массу тела

$$F_x = m \ddot{x} = kx, \quad (II.14)$$

где

$$k = \left(\frac{2\pi}{T}\right)^2 \cdot m. \quad (II.15)$$

Величина силы (F_x) зависит только от удлинения пружины x — переменного параметра, определяющего положение внешних сил, оказывающих действие на рассматриваемое тело. Если к пружине подвесить тело другой массы, то изменится и период колебаний T . Однако опыт показывает, что отношение m/T , а с ним и коэффициент k остаются без изменения. Значит, сила F определяется только растяжением пружины и совершенно не зависит от того, каким телом это растяжение вызвано.

Сила натяжения пружины F_x пропорциональна ее удлинению x . Как показали более точные исследования, этот результат является приближенным. Им можно пользоваться, когда удлинение пружины не очень велико. Он называется *законом Гука*. Величина k называется коэффициентом упругости или жёсткости пружины. Для конкретной пружины коэффициент k постоянен, но может меняться от пружины к пружине.

Эти опытные факты могут служить подтверждением второго закона Ньютона и обоснованием иного способа измерения силы, наряду с взвешиванием.

Измерение сил трения

Итак, чтобы по-настоящему понять законы Ньютона, необходимо обсудить свойства сил.

Начнём с конкретной силы. Рассмотрим сопротивление, которое воздух оказывает летящему самолету. Каков закон этой силы? (Мы обязаны найти его; ведь закон существует для каждой силы!) Едва ли только он будет прост. Стоит представить себе торможение воздухом самолета — свист ветра в крыльях, вихри, порывы, дрожание фюзеляжа и множество других сложностей, — чтобы понять, что этот закон вряд ли выйдет простым и удобным. Тем замечательней тот факт, что у этой силы очень простая закономерность:

$$F \approx c \cdot v^2 \quad (II.16)$$

где c — константа.

Каково же положение этого закона среди других? Подобен ли он закону $F = m \cdot a$? Отнюдь. Во-первых, он эмпирический, и получен он грубыми измерениями в аэродинамической трубе. Но вы возразите: «Что ж, закон $F = m \cdot a$ тоже получен измерениями и является эмпирическим». Поэтому, очевидно, различие не в эмпиричности, а в том, насколько мы понимаем, что этот закон трения есть результат множества влияний. Чем больше мы станем его изучать, чем точнее мерить, тем *сложней* (а не *проще*) представится он нам.

Иными словами, все глубже вникая в закон торможения самолета, мы все ясней будем понимать его «фальшь». Чем глубже взгляд, чем аккуратней измерения, тем усложнённой становится истина; она не предстанет перед нами как итог простых фундаментальных процессов (впрочем, мы и с самого начала об этом догадывались). На очень слабых скоростях (самолету,

например, они даже недоступны) закон меняется: торможение уже зависит от скорости почти линейно: Или, к примеру, торможение шара (или пузырька воздуха или чего-нибудь еще) за счет трения о вязкую жидкость (наподобие меда), - оно тоже при малых скоростях пропорционально скорости, а на больших, когда образуются вихри (не в меде, конечно, а в воде или воздухе), опять возникает примерная пропорциональность квадрату скорости (*II.16*). При дальнейшем росте скорости и это правило не годится. Можно, конечно, говорить: «Ну, здесь слегка меняется коэффициент». Но ведь это просто уловка.

Есть и другие сложности: можно ли, скажем, эту силу делить на части - на силу трения крыльев, фюзеляжа, хвоста и т. д.? Конечно, когда нужно узнать вращательные моменты, действующие на части самолета, то так делать можно, но тогда уже надо иметь специальный закон трения для крыльев и т. д. И выясняется тот удивительный факт, что сила, действующая на крыло, зависит, от другого крыла, т. е. если убрать самолет и оставить в воздухе одно, крыло; то сила будет совсем не такой, какой она была бы, если бы в воздухе был весь самолет; Причина, конечно, в том, что ветер, бьющий в нос самолета, стекает на крылья и меняет силу торможения. И хотя кажется чудом, что существует такой простой, грубый эмпирический закон, пригодный для создания самолетов, но он не из тех законов физики, которые называют *основными*: по мере углубления он становится все сложнее и сложнее. Какое-нибудь изучение зависимости коэффициента c от формы носа самолета сразу разрушает его простоту. Никакой простой зависимости не остается. То ли дело — закон тяготения: он прост, и дальнейшее его углубление только подчеркивает это.

Мы только что говорили о двух типах трения, возникающих в результате быстрого движения в воздухе или медленного в меде. Но есть еще вид трения — сухое, или трение скольжения: о нем говорят тогда, когда одно твердое тело скользит по другому. Чтобы продолжать движение, такому телу нужна сила. Ее называют силой трения. Происхождение её — вопрос очень

запутанный. Обе соприкасающиеся поверхности неравномерны, если разглядывать их на атомном уровне. В точках соприкосновения атомы сцепляются; при нажиме на тело сцепка рвётся и возникают колебания (во всяком случае, происходит нечто похожее). Прежде думали, что механизм трения несложен: поверхность покрыта неровностями и трение есть результат подъема скользящих частей на эти неровности; но это неправильно, ведь тогда бы не было потерь энергии, а на самом деле энергия на трение тратится. Механизм потерь иной: неровности при скольжении сминаются, возникают колебания и движение атомов, и тепло растекается по обоим телам. И здесь крайне неожиданным оказывается, что эмпирически это трение можно приближенно описать простым законом. Сила, нужная для того, что бы преодолеть трение и тащить один предмет по поверхности другого, зависит от силы, направленной по нормали (по перпендикуляру) к поверхностям соприкосновения. В довольно хорошем приближении можно считать, что сила трения пропорциональна нормальной силе с более или менее постоянным коэффициентом:

$$F = \mu \cdot N, \quad (II.17)$$

где μ — коэффициент трения (рис. 30).

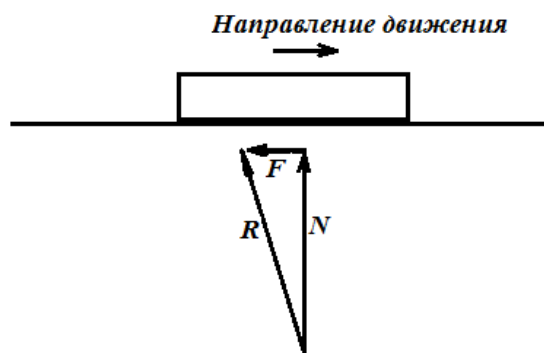


Рис. 30. Соотношение между силой трения и нормальной составляющей давления при скольжении

Хотя коэффициент μ не очень постоянен, эта формула оказывается хорошим эмпирическим правилом, позволяющим прикидывать, какая сила понадобится в тех или иных практических или инженерных обстоятельствах. Только когда нормальная сила или быстрота движения очень уж велика,

закон отказывает: выделяется чересчур много тепла. Важно понимать, что у любого из этих эмпирических законов есть ограничения, вне которых они не работают.

Приближенную справедливость формулы (II.17) можно засвидетельствовать простым опытом. Положим брусок весом W на плоскость, наклоненную под углом θ . Поднимем плоскость круче, пока брусок под тяжестью собственного веса не соскользнет с нее. Составляющая веса вниз вдоль плоскости $W \cdot \sin\theta$ равна силе трения F , раз брусок скользит равномерно. Слагающая веса, нормальная к плоскости, это $W \cdot \cos\theta$; она и есть нормальная сила N . Формула превращается в $W \cdot \sin\theta = \mu W \cdot \cos\theta$, откуда $\mu = \sin\theta / \cos\theta = \operatorname{tg}\theta$. Согласно этому закону, при определенном наклоне плоскости брусок начинает скользить. Если брусок нагрузить дополнительным весом, то все силы в формуле возрастут в той же пропорции, и W из формулы выпадет. Если величина μ не изменилась, то нагруженный брусок опять соскользнет при таком же наклоне. Определив из опыта угол θ , убедимся, что при большем весе бруска скольжение все равно начинается на том же угле наклона. Даже если вес возрос многократно, это правило соблюдается. Мы приходим к заключению, что от веса коэффициент трения не зависит.

Когда проделываешь этот опыт, легко заметить, что при правильном угле наклона в брусок скользит не непрерывно, а с остановками: на одном месте он застрянет, а на другом рванется вперед. Такое поведение есть признак того, что коэффициент трения только грубо можно считать постоянным: он меняется от места к месту. Столь же неуверенное поведение наблюдается и при изменении нагрузки бруска. Различия в трении возникают от разной гладкости или твердости частей поверхности, от грязи, ржавчины и прочих посторонних влияний. Таблицы, в которых перечислены коэффициенты трения «стали по стали», «меди по меди» и прочее, — все это сплошное надувательство, ибо в них этими мелочами пренебрегают, а ведь они-то и определяют значение μ . Трение «меди о медь» и т. д. — это на самом деле трение «о загрязнения, приставшие к меди».

В опытах описанного типа трение от скорости почти не зависит. Многие верят, что трение которое нужно преодолеть чтобы привести предмет в движение (статическое), больше силы, необходимой для поддержания уже возникшего движения (трение скольжения). Но на сухих металлах трудно заметить какую-либо разницу. Мнение это порождено, вероятно, опытами, в которых присутствовали следы масла или смазки, а может быть, там бруски закреплялись пружинкой или чем-нибудь гибким, как бы привязываясь к опоре.

Очень трудно добиться точности в количественных опытах по трению, и до сей поры трение не очень хорошо проанализировано, несмотря на огромное значение такого анализа для техники. Хотя закон $F = \mu N$ для стандартных поверхностей почти точен, причину такого вида закона на самом деле не понимают. Чтобы показать, что μ мало зависит от скорости, нужны особо тонкие эксперименты, потому что от быстрых колебаний нижней поверхности видимое трение сильно падает. В опытах на больших скоростях надо заботиться, чтобы тела не дрожали, а то видимое трение сразу уменьшается. Во всяком случае, этот закон трения относится к тем законам, которые поняты не до конца и не становятся понятней, несмотря на огромные усилия. Оценить коэффициент трения между двумя веществами сейчас практически никому не под силу.

Раньше было уже сказано, что попытки измерить μ при скольжении чистых веществ (меди по меди) ведут к сомнительным результатам, потому что соприкасающиеся поверхности — не чистая медь, а смеси окислов и прочих загрязнений. Если мы хотим получить совершенно чистую медь, если мы вычистим и отполируем поверхности, дегазируем вещество в вакууме и соблюдем все необходимые предосторожности, то все равно μ мы не получим, потому что два куска меди слипнутся, и тогда хоть ставь плоскость торчком!

Коэффициент μ , для умеренно жестких поверхностей обычно меньший единицы, тут вырастает до нескольких единиц! Причина такого неожиданного поведения вот в чем: когда соприкасаются атомы одного сорта, то они не могут

«знать», что они принадлежат разным кускам меди. Будь там между ними другие атомы (атомы, окислов, смазки, тонких поверхностных слоев загрязнений), тогда атомам меди было бы «ясно», находятся ли они на одном куске или на разных. Вспомните теперь, что именно из-за сил притяжения между атомами меди, *медь* является твердым веществом, и вам станет понятно, почему невозможно правильно определить коэффициент трения для чистых, металлов.

То же явление наблюдается в простом домашнем опыте со стеклянной пластинкой и бокалом. Поставьте бокал на пластинку, накиньте на него петлю и тяните; он неплохо скользит и коэффициент трения чувствуется; конечно, этот коэффициент слегка нерегулярен, но все же это коэффициент. Увлажните теперь пластинку и ножку бокала и потяните; вы почувствуете, что они слиплись. Внимательно взглядевшись, можно обнаружить даже царапины. Дело в том, что вода может удалять жир и прочие вещества, засоряющие поверхность; остается чистый контакт стекло—стекло. Этот контакт настолько хорош, что разорвать его не так-то просто: нарушить его трудней, чем вырвать кусочки стекла, вот и возникают царапины.

§ II.4. Измерение электрических и магнитных величин

По своей природе различают силы упругого взаимодействия, силы трения, гравитационные. Законы Ньютона просты, поэтому «*ньютоновские*» силы фундаментальны.

Поговорим теперь о других фундаментальных силах. Называем мы их фундаментальными потому, что законы их действия также фундаментально просты.

II.4.1. Силы электростатического взаимодействия

Измерять силы, обусловленные действием электрического и магнитного полей принципиально можно измерять так же как и гравитационные [17]. Например, силы взаимодействия между неподвижными

электрическими зарядами можно измерить мысленно прикрепив к двум заряженным телам динамометры и подобрав растяжение динамометров так, чтобы тела покоились. Эти же измерения позволят определить величину зарядов (по силам взаимодействия зарядов) и установить единицу электрического заряда. Но можно поступить, как показано в опытах, и по другому. Например, при помощи двух разноименно заряженных параллельных пластин, находящихся на малом по сравнению с размерами пластин расстоянии друг от друга (плоский конденсатор), можно создать электрическое поле, напряженность которого почти во всем пространстве между пластинами будет практически одинакова по величине и направлению, так мы создадим однородное электрическое поле. Измеряя при помощи динамометров, прикрепленных к пластинам, силу, действующую на известный электрический заряд, мы можем определить напряженность электрического поля в любой точке пространства между пластинами.

Таким образом, при помощи динамометров, используя соотношение

$$F = e \cdot E \quad (II.17)$$

можно определить силу, действующую на электрически заряженное тело со стороны электрического поля.

Так как в случае однородного электрического поля напряженность электрического поля E связана с электрическим напряжением U между двумя точками, расположенными на прямой, совпадающей с направлением поля, соотношением

$$U = E \cdot l \quad (II.18)$$

где l - расстояние между точками, то напряжение на плоском конденсаторе также выражается указанным соотношением. Поэтому в случае однородных полей измерение напряженности поля может быть заменено измерением напряжения, например, при помощи электростатических приборов - электрометров, электростатических вольтметров, представляющих собой в принципе также динамометры, измеряющие силы взаимодействия между электрическими зарядами на электродах прибора (величина же этих зарядов

пропорциональна приложенному к прибору напряжению).

Все тела несут в себе электрические заряды, поскольку состоят из атомов, а атомы состоят из электронов и протонов. Если два тела заряжены, то между ними действует электрическая сила. Если величины зарядов равны соответственно q_1 и q_2 , то сила изменяется обратно пропорционально квадрату расстояния между зарядами

$$F = (const) \cdot \frac{q_1 q_2}{r^2}. \quad (II.19)$$

Для разноименных зарядов этот закон похож на закон тяготения, но для *одноименных* зарядов сила становится отталкивающей и ее знак (направление) меняется. Сами заряды q_1 и q_2 могут быть и положительными и отрицательными. На практике, пользуясь формулой, можно получить правильный знак силы, если поставить возле q их знаки. Сила направлена вдоль отрезка, соединяющего заряды. Коэффициент в формуле зависит, конечно, от выбора единиц силы, заряда и длины. Обычно заряд измеряют в *кулонах*, промежуток — в *метрах*, а силу, по-прежнему, — в *Ньютонах*.

Чтобы получить силу в *Ньютонах*, константа (по историческим причинам ее пишут в виде $(1/4)\pi\epsilon_0$) должна принимать численное значение

$$(1/4)\pi\epsilon_0 = 8,99 \cdot 10^9 \text{ Ньютон} \cdot \text{м}^2 / \text{кулон}^2, \quad (II.20)$$

т. е.

$$\epsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12} \text{ кулон}^2 / \text{ньютон} \cdot \text{м}^2 \quad (II.21)$$

В природе самый важный из всех зарядов — это заряд отдельного электрона, он равен $1,6 \cdot 10^{-19}$ кулон.

На самом деле электрические силы намного сложнее, чем следует из этой формулы, потому что формула относится к покоящимся телам.

Рассмотрим более общий случай. Анализ фундаментальных электрических сил связан с новым и очень важным понятием, поэтому теория этих сил намного сложнее, чем это следует из закона обратных квадратов. Закон этот действует лишь тогда, когда взаимодействующие тела находятся в

покое. Когда же электрические тела начинают двигаться, то нужен усовершенствованный метод анализа этих движений.

Как оказалось, для анализа сил такого типа очень полезен подход, основанный на введении понятия «поля». Чтобы пояснить мысль на примере, электрических сил, положим, что в точке P находится заряд q_1 , а в точке R — заряд q_2 . Опыт показал, что сила, действующая между зарядами, в самом общем случае, имеет вид

$$F = (const) \cdot \frac{q_1 q_2 r}{4\pi\epsilon_0 r^3}. \quad (II.22)$$

Чтобы проанализировать эту силу при помощи понятия поля, мы говорим, что заряд q_1 в точке P создает в точке R такие «условия», при которых заряд q_2 , попадая в R «ощущает» действие силы. Это один из мыслимых путей описания действия силы. Может быть он выглядит странно: мы говорим, что действие силы F на заряд q_2 в точке R можно разбить на две части - на q_2 и E , причем величина E существует в точке R безотносительно к тому, есть ли там заряд или нет (лишь бы все прочие заряды были на своих местах). Величина E есть «условие», созданное зарядом q_1 , а F - ответ, отклик заряда q_2 на E . Величину E называют *электрическим полем*. Это - вектор. Формула для электрического поля E , созданного в точке R зарядом q_1 , находящимся в точке P , такова: заряд q_1 , умноженный на постоянную $1/4\pi\epsilon_0$, деленный на r^2 (r - расстояние от P до R); поле действует по направлению радиус-вектора (вектор направления радиус-вектора — это радиус-вектор, деленный на свою длину). Таким образом, выражение для E таково:

$$E = \frac{q_1 \mathbf{r}}{4\pi\epsilon_0 r^3}. \quad (II.23)$$

А затем мы пишем

$$F = q_2 E, \quad (II.24)$$

т. е. связываем силу, поле и заряд в поле. В чем же суть всего этого? Суть в том, что анализ разделяется на две части. Одна часть говорит, что один заряд *создает* поле, а другая - что поле *действует* на другой заряд. Позволяя нам

рассматривать две части независимо, это разделение упрощает во многих случаях расчеты трудных задач. Когда зарядов много, то вначале мы рассчитываем суммарное электрическое поле, создаваемое этими зарядами в r , а потом, зная величину заряда, помещенного в r , находим силу, действующую на него.

В случае тяготения мы можем сделать то же самое, если ввести понятие *гравитационного поля*. Ведь сила взаимного притяжения масс определяется как $F = -Gm_1m_2/r^3$. Анализ полностью совпадает: сила притяжения, действующая на m_2 в поле тяготения, создаваемого другим телом, равна произведению массы тела на это поле C . Сила, действующая на m_2 равна массе m_2 умноженной на поле C созданное массой m_1 есть $C = -Gm_1/r^3$ и направлено по радиусу, как и электрическое поле.

Такое разделение на две части не так уж тривиально, как могло бы показаться на первый взгляд. Оно было бы тривиальным, было бы просто иной записью того же самого, если бы законы действия сил были совсем просты, но они очень сложны, и оказывается, что поле настолько реально, что почти не зависит от объектов, создающих его. Можно колебать заряд, и влияние этого (поле) скажется на расстоянии. Если колебания прекратятся, в поле все равно будут ощущаться следы этих колебаний, потому что взаимодействие двух частиц не происходит мгновенно. Оттого и желательно уметь запоминать, что здесь раньше происходило. Если сила действия на заряд зависит от того, где другой заряд был вчера и каким он тогда был, то должна быть возможность проследить за тем, что было вчера; в этом и состоит сущность поля. Чем сложнее силы, тем реальней поле, и наша техника разделения становится все менее и менее искусственной.

Желая анализировать силы при помощи полей, мы нуждаемся в законах двойного рода. Первые - это отклик на поле. Они дают нам уравнения движения. Например, закон отклика массы на поле тяжести состоит в том, что сила равна массе, умноженной на поле тяжести, или если тело еще и заряжено, то отклик заряда на электрическое поле равен заряду,

умноженному на электрическое поле. Вторая часть анализа природы в таких положениях - это формулировка законов, определяющих напряженность поля и способ его возникновения. Эти законы иногда называют уравнениями поля. В нужный момент мы с ними познакомимся, а пока скажем о них лишь несколько слов.

Вот вам для начала самое замечательное свойство поля, оно абсолютно точно и легко усваивается. Общее электрическое поле, создаваемое группой источников, есть векторная сумма полей, создаваемых по отдельности первым, вторым и т. д. источниками. Иными словами, когда поле создано множеством зарядов и если отдельное поле первого есть E_1 а второго $-E_2$ и т. д., то мы должны просто сложить эти векторы, чтобы получить общее поле.

Принцип этот выражается в виде

$$E = E_1 + E_2 + E_3 + \dots \quad (II.25)$$

или, в согласии с определением поля,

$$E = \sum_i \frac{q_i r_i}{4\pi\epsilon_0 r_i^3}. \quad (II.26)$$

Можно ли эти методы применить к тяготению? Силу притяжения двух масс m_1 и m_2 Ньютон выразил в виде $F = -Gm_1m_2/r^2$. Но в соответствии с понятием поля можно сказать, что m_1 создает поле C во, всем окружающем пространстве и сила, притягивающая m_2 , равна

$$F = m_2 C. \quad (II.27)$$

Но аналогии с электричеством

$$C_i = -\frac{Gm_i r_i}{r_i^3}, \quad (II.28)$$

и тогда поле тяжести нескольких масс равно

$$C = C_1 + C_2 + C_3 + \dots \quad (II.29)$$

Рассматривая движение планет, мы по существу используем именно этот принцип. Мы складываем все векторы сил, чтобы обнаружить общую силу, действующую на планету.

Уравнения (II.26) и (II.27) выражают так называемый принцип суперпозиции, или наложения полей. Этот принцип провозглашает, что общее поле нескольких источников есть сумма полей, создаваемых каждым из них. Насколько нам ныне известно, закон этот в электричестве наверняка выполняется даже тогда, когда заряды движутся, и закон сил усложняется. Бывают иногда кажущиеся нарушения, но внимательный анализ всегда доказывает, что просто забыли какой-нибудь из движущихся зарядов. Но в отличие от электрических зарядов для сильных полей тяжести он не совсем точен. В теории тяготения Эйнштейна доказывается, что уравнение Ньютона (II.29) соблюдается лишь приближенно.

Принципиально так же решаются задачи измерения напряженности магнитных полей и сил, действующих со стороны этих полей на движущиеся электрические заряды.

Отметим здесь, что пока у нас нет возможности дать точную формулировку закона о силах взаимодействия зарядов, движущихся друг относительно друга в произвольных направлениях, это будет сделано ниже, но можем привести формулы для случаев, когда поля нам известны.

Поскольку мы знаем, что действие силы на заряженный предмет зависит от его движения, то:

- во-первых, когда предмет неподвижен, сила, действующая на него, считается пропорциональной заряду с коэффициентом, называемым электрическим полем;

- во-вторых, когда тело движется, сила изменяется, и дополнительная поправка к силе, оказывается линейно зависящей от скорости и направленной поперек скорости \mathbf{v} и поперек другой векторной величины - магнитной индукции \mathbf{B} .

В частности, параллельные проводники с постоянными токами, текущими в одном направлении, притягиваются, а в противоположном - отталкиваются. При этом сила $d\vec{F}$, с которой магнитное поле действует на

элемент $d\vec{l}$ проводника с током, находящегося в магнитном поле, прямо пропорциональна силе тока I в проводнике и векторному произведению элемента длины $d\vec{l}$ проводника на магнитную индукцию \vec{B} :

$$d\vec{F} = I d\vec{l} \times \vec{B}. \quad (II.30)$$

Это закон Ампера — закон взаимодействия постоянных токов. Установлен Андре Мари Ампером в 1820. Закон, определяющий силу, с которой магнитное поле действует на малый отрезок проводника с током.

Направление силы $d\vec{F}$ определяется по правилу вычисления векторного произведения, которое удобно запомнить при помощи правила левой руки:

- руку вытягиваем вдоль направления тока;
- ладонь разворачиваем навстречу магнитным линиям (перпендикулярно);
- отогнутый на 90° большой палец покажет направление силы Ампера.

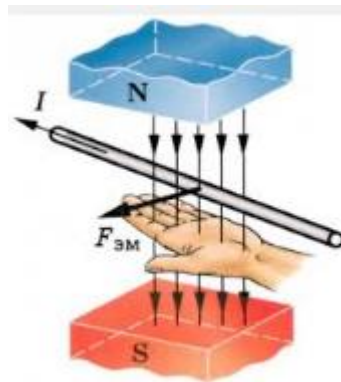


Рис. 31. Рисунок, поясняющий правило левой руки

Направление магнитного поля провода с током по правилу буравчика или правило правой руки:



Рис. 32. Рисунок, поясняющий правило правой руки

Следовательно, при помощи динамометров можно измерять и силы взаимодействия между электрическими токами, текущими в жестких отрезках проводов, но только для этого нужно прикрепить динамометры к отрезкам проводов. Поместив жесткий отрезок провода в магнитное поле, созданное электромагнитом, и пропуская по нему ток определенной величины можно, при помощи прикрепленных к отрезку провода динамометров, определить величину и направление силы F , действующей на ток со стороны магнитного поля. При этом нужно проводники, подводящие ток к отрезку провода, взять достаточно мягкими и расположить их так, чтобы с их стороны на жесткий отрезок провода не действовали упругие силы. Длину жесткого провода следует взять достаточно малой, то есть такой, чтобы магнитное поле, действующее на все точки провода, можно было считать одинаковым. Величина силы Ампера вычисляется по формуле:

$$dF = IBdl \sin \alpha, \quad (II.31)$$

где α — угол между векторами магнитной индукции и тока.

Очевидно, что сила Ампера максимальна когда элемент проводника с током расположен перпендикулярно линиям магнитной индукции $\alpha = 90^\circ, \sin \alpha = 1$.

Поскольку сила, обусловлена движением электрических зарядов в отрезке провода, то её можно выразить через величину и скорость зарядов, образующих ток I .

$$\mathbf{F} = e \cdot [\mathbf{v} \cdot \mathbf{H}] \quad (II.32)$$

Если же электрический заряд движется в пространстве, где одновременно существуют и электрическое и магнитное поля, то на него действуют одновременно две силы: со стороны электрического поля и со стороны магнитного поля.

Составляющие электрического поля \mathbf{E} и магнитной индукции \mathbf{B} суть соответственно (E_x, E_y, E_z) и (B_x, B_y, B_z) , а составляющие скорости \mathbf{v} суть (v_x, v_y, v_z) , то составляющие суммарной электрической и магнитной сил, действующих на движущийся заряд q , таковы:

$$\begin{aligned} F_x &= q(E_x + v_y B_z - v_z B_y), \\ F_y &= q(E_y + v_z B_x - v_x B_z), \\ F_z &= q(E_z + v_x B_y - v_y B_x). \end{aligned} \quad (II.33)$$

Если случайно магнитное поле имеет только компоненту B_y , а скорость - только v_x , то у магнитной силы остается составляющая вдоль z , поперек \mathbf{B} и y .

Результирующая сила, действующая на заряд, может быть определена по формуле

$$\mathbf{F}_L = e \left\{ \mathbf{E} + \frac{1}{c} [\mathbf{v} \cdot \mathbf{H}] \right\}, \quad (II.34)$$

– сила Лорентца.

Такое объединение двух сил, действующих со стороны электрического и магнитного полей, в единую силу Лорентца не является формальным.

Специально подчеркнём здесь, что сила, определяемая этим выражением, является по своей природе единой силой, и, наоборот, разделение ее на две силы, из которых одна действует со стороны электрического, а другая – со стороны магнитного поля, носит условный характер.

Таким образом, изучая движение электронов в магнитных полях, можно установить связь между ускорением и силой, действующей на электрон со стороны магнитного поля. Количественные связи между

электрическими и магнитными силами этими силами можно продемонстрировать в опытах с электронной трубкой (рис. 33). На одном конце трубки помещен источник, испускающий поток электронов, а внутри имеется устройство, разгоняющее электроны до большой скорости и посылающее часть их на светящийся экран на другом конце трубки.

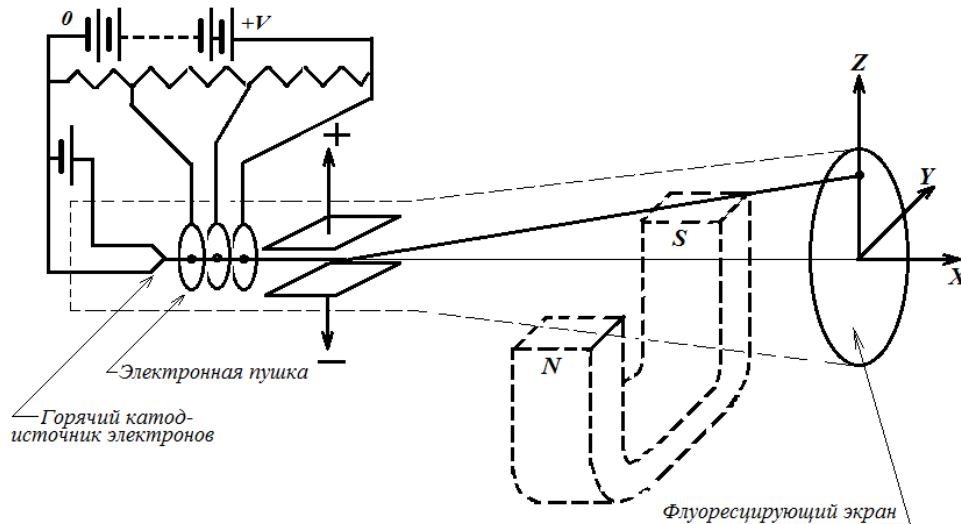


Рис. 33. Электронная трубка

Световое пятно в центре экрана, в месте ударов электронов, позволяет проследить за их путем. На пути к экрану пучок проходит сквозь узкую щель между параллельными металлическими пластинами, расположенными, допустим, плашмя. К пластинам подведено напряжение, позволяющее любую из них заряжать отрицательно. Напряжение создает между пластинами электрическое поле.

В первой части опыта отрицательное напряжение подается на нижнюю пластину, т. е. на ней образуется избыток электронов. Одноименные заряды отталкиваются, и поэтому светящееся пятно на экране взлетает внезапно вверх. (Можно сказать и иначе: электроны «чувствуют» поле и отвечают отклонением вверх.) Затем переключим напряжение и зарядим отрицательно уже верхнюю пластину. Световое пятно на экране опустится вниз, показывая, что электроны пучка отталкиваются электронами верхней пластины. (Иначе говоря, электроны «ответили» на изменение направления поля.)

Во второй части опыта напряжение на пластины уже не подается, а вместо этого проверяется влияние магнитного поля на электронный пучок. Для этого необходим подковообразный магнит, достаточно широкий, чтобы «оседлать» практически всю трубку. Предположим, что мы подвели магнит снизу к трубке, обхватили им ее и направили полюсы кверху (в виде буквы U). Мы замечаем, что пятно на экране смещается, скажем, кверху, когда магнит приближается снизу. Выходит, что магнит отталкивает пучок. Но не так все просто: если мы перевернем магнит, не переставляя его сторон, и приблизим его к трубке сверху, то пятно снова сдвинется вверх, т. е. вместо отталкивания наступило притяжение. А теперь вернем магнит в первоначальное положение, когда он обхватывал трубку снизу. Да, пятно по-прежнему отклоняется кверху; но повернем магнит на 180° вокруг вертикальной оси, чтобы он имел вид буквы U , но уже с переставленными полюсами.

Пятно сместится вниз и остается там, даже если мы перевернем трубку на 180° . Чтобы понять такое своеобразное поведение, нужно придумать какую-то иную комбинацию сил. Объясняется все это вот как. Вдоль магнита, от полюса к полюсу, тянется магнитное поле. Оно направлено всегда от одного определенного полюса (который можно снабдить какой-нибудь меткой) к другому. Вращение магнита вокруг его оси не меняет направления поля, а перестановка полюсов местами меняет. Например, если электроны летят горизонтально по оси x , а магнитное поле тоже горизонтально, но направлено по оси y , то магнитная сила, действующая на движущийся электрон, направлена по оси z (вверх или вниз, это уже зависит от того, как направлено поле - по оси y или против нее).

При помощи подобных опытов можно определить удельный заряд электрона и других электрически заряженных частиц, например протонов (ядер водорода), α -частиц (ядер гелия). В этих опытах вместо электронно-лучевой трубки нужно пользоваться источниками, испускающими соответственно протоны или α -частицы с не слишком большими скоростями.

Отметим, кстати, что опыты по определению удельного заряда различных частиц являются одним из важнейших методов определения природы этих частиц (так называемая, «*масс спектрография*»).

§ II.5. Возможности измерения псевдосил, сил ядерного взаимодействия, молекулярные сил и других физических величин

Выше нами рассмотрены примеры действующих «*упругих сил*».

Силы трения также проявляются в результате действия «*упругих сил*» и зависят от скорости относительного движения соприкасающихся поверхностей и состояния соприкасающихся поверхностей. Гравитационные и электромагнитные силы обусловлены наличием *полей* или полевого взаимодействия и действуют на расстоянии. Соответственно способы измерения сил, как мы видели выше, распадаются на две отдельные задачи: 1) измерение полей, возникающих в том или ином конкретном случае, и 2) измерение сил, действующих на данное тело со стороны данного поля.

Для измерения сил должны быть установлены, во-первых, эталон силы, а во-вторых, способ сравнения других сил с этим эталоном.

Выше мы упоминали, что взяв какую-то вполне определенную пружину (например, из стальной проволоки, имеющей форму цилиндрической спирали), растянутую до известной длины, можно получить некий эталон силы. За эталон, при этом, мы примем ту силу, с которой эта пружина, при фиксированном растяжении, действует на прикрепленное к любому из ее концов тело. Сравнение сил с эталоном и есть измерение.

Располагая способом измерения сил, можно установить, при каких условиях возникают силы, и найти их величины в любых конкретных случаях. Например, изучая упругие силы, можно установить, что растянутая цилиндрическая пружина создает силу, которая при не слишком больших растяжениях пружины пропорциональна величине растяжения (закон Гука).

Такой прибор для измерения сил называют динамометром (в соответствии с размерностью силы в системе СГС – дина). Закон Гука

упрощает калибровку динамометров, так как достаточно отметить только растяжение, соответствующее наибольшей силе (не выходящей за указанные выше пределы), и всю шкалу динамометра разделить на равные части. Точно так же и для любых других типов деформации можно установить зависимость величины возникшей упругой силы от характера и величины деформации.

Аналогично можно измерять и силы трения. Если к движущемуся телу прикрепить динамометр и установить то растяжение динамометра, при котором тело будет двигаться прямолинейно и равномерно, то сила трения будет равна по величине и противоположна по направлению силе, действующей со стороны динамометра (конечно, при условии, что никакие другие силы на тело не действуют).

Например, общеизвестный метод взвешивания тел на пружинных весах позволяет измерить притяжения этих тел Землей (правда, только приближенно, так как Земля, на которой покоится тело при взвешивании, движется относительно выбранной «неподвижной» системы координат и это несколько искажает результаты измерений).

Проверив *второй закон Ньютона* на опыте, мы можем на основании этого закона для данного тела по известным силам найти ускорение тела, или, наоборот, по известным ускорениям найти сумму действующих на него сил, если хотя бы один раз для этого тела мы одновременно определим и действующую силу, и сообщаемое силой ускорение.

Так как, для установления способа измерения массы тела используется тот же второй закон Ньютона (величина массы определяется одновременным измерением силы и ускорения), то второй закон Ньютона содержит, с одной стороны, утверждение, что ускорение пропорционально силе, а с другой, - определение массы тела как отношения силы, действующей на тело, к сообщаемому этой силой ускорению.

Здесь следует подчеркнуть, что Ньютон сформулировал закон для упругих сил, сил тяготения, но почти ничего не знал о природе более

сложных силах, например о силах между атомами. Однако он открыл одно правило, одно общее свойство всех сил, которое составляет третий его закон:

«Сила действия равна силе противодействия».

Теперь, опираясь на накопленный опыт познания, мы можем отметить то, что не заметил Ньютон, мы можем обобщить его формулировку с учетом всех видов взаимодействий, известных сегодня науке. В соответствии с третьим законом Ньютона любые два тела, скажем две частицы, будут *«толкать»* друг друга в противоположных направлениях с одинаковой силой. Ньютон имел в виду, только лишь известные в те времена, взаимодействия: силы тяготения и упругости. Однако сейчас мы можем утверждать, что закон справедлив и для других видов взаимодействий, установленных наукой на сегодняшний день.

Чем ещё интересен третий закон Ньютона? Пусть взаимодействующие частицы имеют разную массу. Что же из этого следует? Согласно Второму закону, сила равна скорости изменения импульса со временем, так что скорость изменения импульса частицы 1, в соответствии с Третьим законом, будет равна скорости изменения импульса частицы два, т.е.

$$dp_1/dt = - dp_2/dt. \quad (II.35)$$

То есть, *полное изменение* импульса частицы 1 равно и противоположно *полному изменению* импульса частицы 2. То есть, скорость изменения суммы полного импульса обеих частиц равно нулю

$$d(\mathbf{p}_1 + \mathbf{p}_2)/dt = 0. \quad (II.36)$$

Необходимо, однако, помнить, что в нашей задаче о системе, состоящей из двух взаимодействующих тел, мы предполагали отсутствие каких-либо других сил, за исключением внутренних. Таким образом, мы получили, что при наличии одних только внутренних сил в системе взаимодействующих тел, полный импульс системы взаимодействующих частиц остается неизменным. Это утверждение выражает собой *закон сохранения импульса*. Из него следует, что если мы измеряем или подсчитываем величину $m_1\mathbf{v}_1 + m_2\mathbf{v}_2 + m_3\mathbf{v}_3 + \dots$, то есть сумму импульсов всех

частиц, то для любых сил, действующих между ними, как бы сложны они ни были, мы должны получить одинаковый результат, как до действия сил, так и после, поскольку полный импульс остается постоянным.

Таким образом, закон сохранения полного импульса в отсутствии внешних сил можно записать в виде

$$m_1\mathbf{v}_1 + m_2\mathbf{v}_2 + m_3\mathbf{v}_3 + \dots = \text{const.} \quad (II.37)$$

Поскольку для каждой частицы второй закон Ньютона имеет вид

$$\mathbf{F} = d(m\mathbf{v})/dt, \quad (II.38)$$

то для любой составляющей полной силы, в любом заданном направлении, например x ,

$$F_x = d(mv_x)/dt. \quad (II.39)$$

Точно такие же формулы можно написать и для y, z компонент.

Если, однако, существуют внешние силы, силы внешние по отношению к изолированной системе частиц, то сумма всех этих внешних сил будет равна скорости изменения полного импульса всех частиц системы.

Псевдосилы

Очередной тип сил, который нам предстоит рассмотреть, — это «псевдосилы».

Примером псевдо- (как бы-, вроде-) силы является хорошо известная «центробежная сила». Наблюдатель во вращающейся системе координат (во вращающемся ящике) обнаружит таинственные силы, не вызываемые ни одним из известных источников сил; они отбрасывают предметы к стенке ящика. А объясняются они просто тем, что у наблюдателя; нет ньютоновой системы координат — простейшей из всех.

«Псевдосилы» обнаруживаются на любопытном опыте, состоящем в том, что мы толкаем с ускорением кувшин с водой, по столу. Тяжесть действует на воду вниз, но из-за горизонтального ускорения есть еще и «псевдосила» в горизонтальном направлении, назад по отношению к ускорению. Сумма силы, тяжести и «псевдосила» образует угол с

вертикалью, во время ускорения поверхность воды перпендикулярна к этой сумме сил, т. е. наклонена под углом к столу, и вода приподнята к задней стенке кувшина. Когда мы перестаем толкать кувшин, когда он замедляется вследствие трения, «псевдосила» меняет свое направление и вода приливает к передней стенке кувшина (рис. 34).

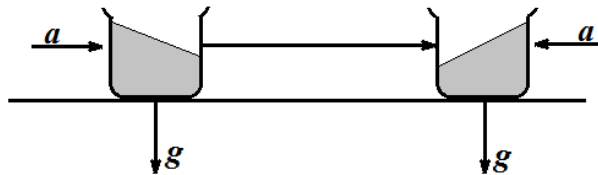


Рис. 34. Иллюстрация к «псевдосилам»

Очень важным свойством «псевдосилы» следует считать то, что они всегда пропорциональны массам; то же справедливо и для тяжести. Существует поэтому возможность, что тяжесть — это тоже «псевдосила». Не может ли стать, что тяготение вызывается отсутствием правильной системы координат? Ведь мы всегда можем получить силу, пропорциональную массе, стоит только представить, что тело ускоряется.

Например, человек, помещенный в ящик, который стоит на земле, обнаруживает, что его что-то прижимает к полу с силой, пропорциональной его массе. Если бы земли не было вовсе, а ящик все еще покоился, то человек плавал бы в пространстве. С другой стороны, если бы опять не было земли, а ящик кто-то тащил бы вверх с ускорением g , то человек в ящике, анализируя физику этого явления, обнаружил бы «псевдосилу», прижимающую его к полу точно так же, как это делает тяжесть.

Эйнштейн выдвинул знаменитую гипотезу, что ускорение вызывает имитацию (подобие) тяготения, что силы ускорения («псевдосилы») нельзя отличить от сил тяготения; нельзя сказать, какая часть данной силы — тяжесть, а какая — «псевдосила».

Казалось бы, ничто не мешает считать тяжесть «псевдосилой», говорить, что нас прижимает вниз оттого, что нас ускоряет вверх; но как быть с жителями Новой Зеландии, на другой стороне Земли — их-то куда

ускоряет? Эйнштейн понял, что тяготение можно считать *«псевдосилой»* одновременно только в одной точке; его рассуждения привели к предположению, что геометрия мира сложнее обычной геометрии Евклида. Наше обсуждение вопроса чисто качественное и не претендует ни на что, кроме общей идеи.

Чтобы пояснить в общих чертах, как тяготение может быть результатом действия *«псевдосил»*, мы приведем чисто геометрический пример, ничего общего не имеющий с истинным положением вещей.

Предположим, что мы с вами обитаем в двумерном мире и ничего о третьем измерении не знаем. Мы бы считали, что живем на плоскости, а на самом деле, предположим, жили бы на шаре; пускай теперь мы бросили предмет вдоль нашей поверхности, не действуя больше на него никакими силами. Как бы он двигался? Нам, казалось бы, что он движется по прямой линии, но поскольку третьего измерения нет и он должен был бы оставаться на поверхности шара, то он двигался бы по кратчайшему расстоянию на сфере, т. е. по окружности большого круга. Бросим точно так же другой предмет, но в ином направлении; он направится тоже по дуге большого круга. Мы думаем, что находимся на плоскости, и надеемся поэтому, что расстояние между двумя предметами будет расти линейно с течением времени. Но тщательные наблюдения вдруг обнаружат, что на достаточно большом расстоянии предметы снова начнут сближаться, как если бы они притягивали друг друга. Но они не притягиваются один к другому; все дело в геометрии, это с нею происходит что-то «чудное». Хотя эта картинка и не касается геометрии Евклида (не показывает нам, что в ней есть «чудного»), но она показывает, что, заметно исказив геометрию, можно все тяготение отнести за счет *«псевдосилы»*. В этом и состоит общая идея теории тяготения Эйнштейна.

Итак, хотя окружающий нас мир действительно огромен и сложен, но по мере того, как развивались научные теории, многие его особенности стали

выглядеть для нас значительно проще и понятнее. Мы уже достигли понимания большого числа принципиальных и важных законов природы. В частности, о ряде областей физической науки можно сказать, что мы понимаем рассматриваемые в них явления. Некоторые из этих разделов физики перечисляются ниже. Вместе с теорией относительности и квантовой механикой их можно отнести к числу величайших достижений человеческого ума:

1. Законы классической механики дают нам возможность рассчитывать с исключительной точностью движение различных тел Солнечной системы (включая кометы и астероиды); знание этих законов позволило предсказать существование новых планет и открыть их. Эти законы подсказывают нам, как могли образоваться звезды и галактики, вместе с законами излучения они дают хорошее объяснение наблюдаемой связи между массой и яркостью звезд. Астрономические применения законов классической механики — это наиболее красивые, но не единственные примеры их успешного применения. Мы постоянно используем эти законы в повседневной жизни и в технических науках.

2. Законы квантовой механики дают очень хорошее представление о характере явлений атомного масштаба. Для простых атомов предсказания, сделанные на основании этих законов, согласуются с опытными данными с точностью до одной стотысячной, а иногда и лучше. Если применять законы квантовой механики к крупномасштабным земным или космическим явлениям, то они окажутся с отличной точностью тождественными законам классической механики. В принципе квантовая механика представляет собой надёжную теоретическую основу для всей химии, металловедения и значительной части физики, но зачастую мы не в состоянии довести до конца решение ее уравнений с помощью уже имеющихся (или даже более совершенных) вычислительных машин. В некоторых областях физики почти все задачи представляются в настоящее время настолько сложными, что даже

их теоретический анализ, основанный на общих принципах квантовой механики, оказывается чересчур трудным.

3. Законы классической электродинамики отлично описывают все особенности электрических и магнитных явлений, за исключением явлений атомного масштаба. Классическая электродинамика является теоретической основой электротехники и техники средств связи. Закономерности электрических и магнитных явлений атомного масштаба точно описываются квантовой электродинамикой.

4. В качестве более частного примера из другой области науки укажем, что в настоящее время, по-видимому, становится понятным действие генетического кода, и мы обнаружили, что запас информации в клетке простого организма превосходит запас информации в лучших современных серийных вычислительных машинах. Этими вопросами занимается молекулярная биология.

Ядерные силы

Закончим эту главу кратким обзором ныне известных сил, отличающихся от вышеперечисленных, *-ядерных сил*. Эти силы действуют внутри ядра атома, и, хотя их много изучали, никто ни разу еще не смог рассчитать силу, действующую между двумя ядрами; и фактически закон ядерных сил сейчас не известен. Эти силы имеют крайне незначительную протяженность действия - они действуют только на размерах ядра около 10^{-13} см. Поскольку частицы столь малы, а расстояния так коротки, нам нечего надеяться на законы Ньютона - здесь действуют только законы квантовой механики. Анализируя ядра, мы больше не говорим о силах; мы заменяем понятие силы понятием энергии взаимодействия двух частиц (позже об этом будет сказано подробнее). Любые формулы, которые можно написать для ядерных сил, представляют довольно грубые приближения, в которых опущены многие детали взаимодействия; выглядят они примерно так: силы внутри ядер убывают не обратно квадрату расстояния, а отмирают

экспоненциально за некоторым расстоянием r_0 (порядка 10^{-13} см) как $F=(1/r^2) \cdot \exp(-r/r_0)$. Иначе говоря, чуть частицы удалятся, как силы тут же исчезают, хотя ближе 10^{-13} см они очень велики. По-видимому, законы ядерных сил сложны до чрезвычайности. Мы их не понимаем, и вся задача анализа фундаментального механизма, стоящего за ними, не решена. Попытки решить, эту задачу привели к открытию множества необычных частиц, например π -мезонов, но происхождение сил все равно остается темным [18].

Молекулярные силы

Другой вид известных сил, отличающихся от вышперечисленных, - *молекулярные силы*. Это силы, действующие между атомами и ими, в конечном счете, объясняется трение. Однако, классической физике так и не удалось удовлетворительно объяснить молекулярные силы.

Чтобы их полностью понять, понадобилась *квантовая механика*. Силу, действующую между двумя атомами, эмпирически можно изобразить примерно так, как показано на рис. 35, где эта сила F представлена как функция расстояния r между атомами.

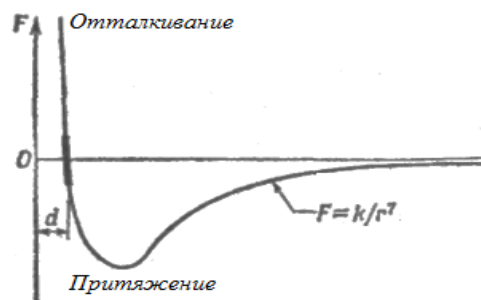


Рис. 35. Сила, действующая между двумя атомами, как функция расстояния между ними.

Бывают и другие случаи: в молекуле воды, например, отрицательные заряды размещены главным образом на атоме кислорода и центры положительных и отрицательных зарядов оказываются не в одной точке, поэтому соседние молекулы испытывают действие сравнительно больших сил. Называют эти силы *диполь-дипольными*. Но во многих системах заряды

сбалансированы куда лучше, в частности в газообразном кислороде они почти симметричны. В этом случае, хоть минус- и плюс-заряды рассеяны по молекуле, распределение их таково, что центры минус- и плюс-зарядов совпадают. Молекулы, центры которых не совпадают, называются *полярными*; произведение заряда на промежуток между центрами: называется *дипольным моментом*. У неполярных молекул центры зарядов совпадают. Для них для всех оказывается, что, хотя суммарный общий заряд равен нулю, сила на больших расстояниях ощущается как притяжение и изменяется обратно пропорционально седьмой степени удаления, т. е. $F = k/r^7$, где k — постоянная, зависящая от типа молекул. Почему это так, вы узнаете тогда, когда выучите квантовую механику. У диполей силы притяжения еще заметнее. И наоборот, если атомы или молекулы тесно сблизить, они очень сильно отталкиваются; именно по этой причине мы не проваливаемся на нижний этаж!

Эти молекулярные силы можно увидеть почти непосредственно и в опыте со скольжением бокала по стеклу, и в опыте с двумя тщательно отшлифованными и пригнанными плоскими поверхностями. Примером таких поверхностей могут служить плитки Иоганссона, которыми пользуются в машиностроении как стандартами для точных измерений длин. Если, прижав одну из плиток к другой, осторожно поднять верхнюю плитку, то нижняя тоже поднимется. Ее поднимут молекулярные силы, демонстрируя прямое притяжение атомов одной плитки к атомам другой.

И все же эти молекулярные силы притяжения не являются фундаментальными в том смысле, в каком фундаментальное тяготение; они возникают в итоге невероятно сложного взаимодействия всех электронов и ядер одной молекулы со всеми электронами и ядрами другой. Никакой простой формулы, которая бы учитывала все эти сложности, нельзя получить, так что это явление *не фундаментальное*.

Именно потому, что молекулярные силы притягивают на большом удалении и отталкивают на малом (см. рис. 35), и существуют твердые тела;

их атомы скреплены воедино взаимным притяжением, но держатся все же на расстоянии друг от друга (если их сблизить, сразу включается отталкивание). На том расстоянии d , где кривая на рис. 35 пересекает ось r , сила равна нулю, т. е. наступает равновесие; на этом расстоянии и располагается молекула от молекулы. Если молекулы сблизить теснее, чем на расстояние d , то возникает отталкивание, изображенное частью кривой выше оси r . Но даже для ничтожного сближения требуются огромные силы, потому что кривая круто идет вверх на расстояниях, меньших d . А стоит чуть развести молекулы, как начинается слабое притяжение, возрастающее по мере удаления. Если же их резко потянуть, то они навсегда отделятся и связь разорвется.

Когда молекулы лишь *слегка* сводят или *слегка* разводят от положения равновесия d , то маленький участок кривой близ этого положения можно считать за прямую линию. Поэтому часто обнаруживается, что при небольших сдвигах *сила пропорциональна смещению*. Этот принцип известен как *закон Гука*, или *закон упругости*; он утверждает, что силы, стремящиеся после деформации тела вернуть его в начальное состояние, пропорциональны этой деформации. Закон, конечно, соблюдается лишь тогда, когда деформации малы; когда они велики, тело либо разорвется, либо сломается, смотря по характеру деформаций. Величина силы, до которой закон Гука еще действует, зависит от материала; скажем, у теста или замазки она очень мала, у стали — относительно велика. Закон Гука легко можно продемонстрировать на длинной стальной пружине, подвешенной вертикально. Грузик на нижнем конце пружины слегка раскручивает витки проволоки и тем самым немного оттягивает вниз каждый виток, приводя в общем на большом числе витков к заметному смещению. Если измерить общее удлинение пружины, скажем от гирьки весом 100г , то окажется, что каждые добавочные 100г груза вызовут примерно такое же удлинение, что и первые 100 г . Это постоянство отношения силы к смещению нарушается, когда пружина перегружена; тогда закон Гука больше не выполняется.

ГЛАВА III

ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЙ ЭКСПЕРИМЕНТ– ГЛАВНЫЙ МЕТОД НАУЧНОГО ПОЗНАНИЯ

Введение

По мере углубления знаний о «Материи» и «Движении» углубляются и изменяются научные представления о «Пространстве» и «Времени». Поэтому понять физический смысл и значение вновь открываемых закономерностей изменения «Материи» и процессов, происходящих в «Пространстве» и «Времени» можно только путём установления связей материальных процессов с общими закономерностями взаимодействия и движения материи.

В этой связи, экспериментальное исследование пространственно-временных отношений представляет собой главный метод научного познания. Всякое научное исследование, от творческого замысла до окончательного оформления научного труда, является процессом научного познания и осуществляется весьма индивидуально. Но все же можно определить и некоторые общие методологические подходы к проведению научных исследований, то есть изучению объекта исследования в научном смысле.

Современные методы познания стремятся проникнуть в сущность изучаемых явлений и процессов. Это возможно при условии целостного подхода к объекту исследования, рассмотрения этого объекта в статике и динамике.

Изучать в научном смысле — это значит вести поисковые исследования, как бы заглядывая в будущее. Реальные достижения науки и техники, являются важнейшими факторами научного исследования. Но в то же время научное исследование — это обоснованное применение научного предвидения, это хорошо продуманный расчет.

Изучать в научном смысле — это значит быть научно объективным. Нельзя отбрасывать факты в сторону только потому, что их трудно объяснить или найти им практическое применение. Дело в том, что сущность нового в науке не всегда видна самому исследователю. Новые научные факты и даже открытия из-за того, что их значение плохо раскрыто, могут долгое время оставаться в резерве науки и не использоваться на практике.

При научном исследовании важно все. Концентрируя внимание на основных или ключевых вопросах темы, нельзя не учитывать так называемые косвенные факты, которые на первый взгляд кажутся малозначительными. Часто бывает, что именно такие факты скрывают за собой начала важных открытий.

В науке мало установить какой-либо новый научный факт, важно дать ему объяснение с позиций современной науки, показать его общепознавательное, теоретическое или практическое значение.

Накопление научных фактов в процессе исследования — всегда творческий процесс, в основе которого всегда лежит замысел ученого, его идея. В философском определении идея представляет собой продукт человеческой мысли, форму отражения действительности. Идея отличается от других форм мышления и научного знания тем, что в ней не только отражен объект изучения, но и содержится сознание цели, перспективы познания и практического преобразования действительности.

Идеи рождаются из практики, наблюдений окружающего мира и потребностей жизни. В основе идей лежат реальные факты и события. Жизнь выдвигает конкретные задачи, но зачастую не сразу находятся продуктивные идеи для их решения. Тогда на помощь приходит способность исследователя предлагать новый, совершенно необычный аспект рассмотрения задачи, которую долгое время не могли решить при обычном подходе к делу или, как говорят, пытались решить ее "в лоб".

Развитие идеи до стадии решения задачи обычно совершается как плановый процесс научного исследования. Хотя в науке известны и

случайные открытия, но только планоное, хорошо оснащенное современными средствами научное исследование надежно позволяет вскрыть и глубоко познать объективные закономерности в природе. В дальнейшем идет процесс уточнения первоначального замысла, изменение, дополнение и развитие намеченной первоначальной схемы исследования [19].

§ III.1. Теоретические основы измерений

III.1.1. Физические свойства и величины

Свойство - философская категория, выражающая такую сторону объекта (явления или процесса), которая обуславливает его различие или общность с другими объектами, и обнаруживается в его отношениях к ним. Свойство - категория качественная. Для количественного описания различных свойств физических тел, явлений и процессов вводится понятие величины.

Величина - это мера объекта (явления, процесса или чего-либо другого), мера того, что может быть выделено среди других свойств и оценено тем или иным способом, в том числе и количественно. Величина не существует сама по себе, она имеет место лишь постольку, поскольку существует объект со свойствами, выраженными данной величиной.

Таким образом, понятие величина, это понятие большей общности, чем качество (свойство, атрибут) и количество.

Существует два вида величин: *реальные и идеальные*.

Идеальные величины (числовые значения величин, графики, функции, операторы и т.п.) главным образом относятся к математике и являются обобщением (математической моделью) конкретных реальных понятий. Они вычисляются тем или иным способом.

Реальные величины, в свою очередь, подразделяются, на *физические* и *нефизические*. При этом, *физическая величина* в общем случае может быть

определена как величина, свойственная материальным объектам (телам, процессам, явлениям), изучаемым в естественных (физика, химия) и технических науках. К *нефизическим величинам* следует отнести величины, присущие общественным (нефизическим) наукам - философии, социологии, экономике и т.п.

Стандарт ГОСТ 16263-70 трактует *физическую величину*, как численное выражение конкретного свойства физического объекта, в качественном отношении общее для многих физических объектов, а в количественном, абсолютно индивидуальное для каждого из них. Индивидуальность в количественном отношении здесь понимается в том смысле, что свойство может быть для одного объекта больше, в определенное число раз, или меньше, чем для другого.

Таким образом, *физические величины - это измеренные свойства физических объектов или процессов, с помощью которых они могут быть изучены.*

Физические величины (ФВ) целесообразно дополнительно классифицировать, как *измеряемые* и *оцениваемые*.

Измеряемые физические величины могут быть выражены количественно в виде определенного числа установленных единиц измерения. Возможность введения и использования единиц измерения, является важным отличительным признаком измеряемых ФВ.

Физические величины, для которых по тем или иным причинам не может быть введена единица измерения, могут быть только оценены. Под оценением в таком случае понимается операция приписывания данной величине определенного числа, проводимая по установленным правилам. Оценивание величины осуществляется при помощи шкал.

Нефизические величины, для которых единицы измерения и шкалы в принципе не могут быть введены, могут быть только оценены.

III.1.2. Классификация физических величин [20]

Для более детального изучения ФВ необходимо их классифицировать, выявив общие метрологические особенности их отдельных групп. Возможные классификации ФВ показаны на рис. 36.

По *видам явлений* они делятся на следующие группы:

- *вещественные*, т.е. описывающие физические и физико-химические свойства веществ, материалов и изделий из них. К этой группе относятся масса, плотность, электрическое сопротивление, емкость, индуктивность и др. Иногда указанные ФВ называют пассивными. Для их измерения необходимо использовать вспомогательный источник энергии, с помощью которого формируется сигнал измерительной информации. При этом пассивные ФВ преобразуются в активные, которые и измеряются;
- *энергетические*, т.е. величины, описывающие энергетические характеристики процессов преобразования, передачи и использования энергии. К ним относятся ток, напряжение, мощность, энергия. Эти величины называют активными. Они могут быть преобразованы в сигналы измерительной информации без использования вспомогательных источников энергии;
- *характеризующие* протекание процессов во времени. К этой группе относятся различного вида спектральные характеристики, корреляционные функции и др.

По *принадлежности к различным группам физических процессов* ФВ делятся на пространственно-временные, механические, тепловые, электрические и магнитные, акустические, световые, физико-химические, ионизирующих излучений, атомной и ядерной физики.

По *степени условной независимости от других величин* данной группы ФВ делятся на основные (условно независимые), производные (условно зависимые) и дополнительные. В настоящее время в системе СИ используется семь физических величин, выбранных в качестве основных: длина, время, масса, температура, сила электрического тока, сила света и

количества вещества. К дополнительным физическим величинам относятся плоский и телесный углы.

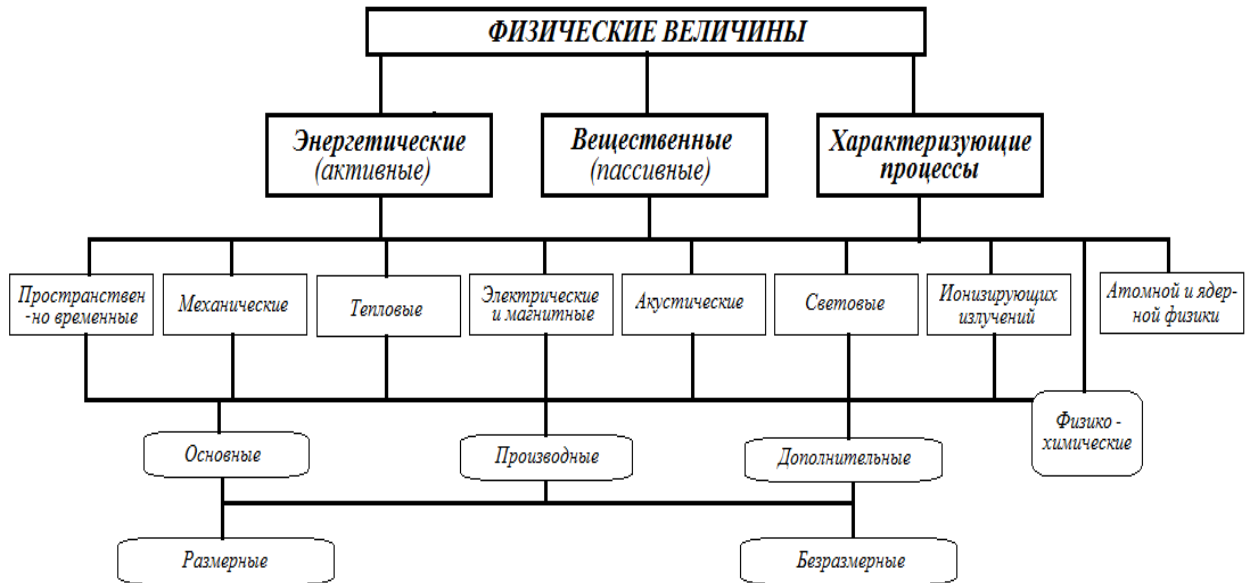


Рис. 36. Физические величины

По наличию размерности ФВ делятся на размерные, т.е. имеющие размерность, и безразмерные.

Физические объекты обладают неограниченным числом свойств, которые проявляются с бесконечным разнообразием. Это затрудняет их отражение совокупностями чисел с ограниченной разрядностью, возникающее при их измерении. Среди множества специфических проявлений свойств есть и несколько общих. Р. Кэмпбелл установил для всего разнообразия свойств X физического объекта наличие трех наиболее общих проявлений в отношениях эквивалентности, порядка и аддитивности. Эти отношения в математической логике аналитически описываются простейшими постулатами.

При сравнении величин выявляется отношение порядка (больше, меньше или равно), т.е. определяется соотношение между величинами. Примерами интенсивных величин являются твердость материала, запах и др.

Интенсивные величины могут быть обнаружены, классифицированы по интенсивности, подвергнуты контролю, количественно оценены монотонно возрастающими или убывающими числами.

На основании понятия "интенсивная величина" вводятся понятия физической величины и ее размера. *Размер физической величины* - количественное содержание в данном объекте свойства, соответствующего понятию ФВ.

III.1.3. Шкалы измерений

В практической деятельности необходимо проводить измерения различных физических величин, характеризующих свойства тел, веществ, явлений и процессов. Некоторые свойства проявляются только качественно, другие - количественно. Разнообразные проявления (количественные или качественные) того, или иного свойства объекта исследования, образуют множество, отображения элементов которого на упорядоченное множество чисел, или, в, более общем случае, условных знаков, образуют *шкалу измерения* этого свойства. Шкала измерений количественного свойства конкретной физической величины является шкалой этой физической величины. Таким образом, *шкала физической величины* - это упорядоченная последовательность значений ФВ, принятая по соглашению на основании результатов точных измерений. Термины и определения теории шкал измерений изложены в документе МИ 2365-96.

В соответствии с логической структурой проявления свойств различают пять основных типов шкал измерений.

1. Шкала наименований (шкала классификации). Такие шкалы используются для классификации эмпирических объектов, свойства которых проявляются только в отношении эквивалентности. Эти свойства нельзя считать физическими величинами, поэтому шкалы такого вида не являются шкалами ФВ. Это самый простой тип шкал, основанный на приписывании качественным свойствам объектов чисел, играющих роль имен. В шкалах наименований, в которых отнесение отражаемого свойства к тому или иному классу эквивалентности осуществляется с использованием органов чувств человека, наиболее адекватен результат, выбранный большинством

экспертов. При этом большое значение имеет правильный выбор классов эквивалентной шкалы - они должны надежно различаться наблюдателями, экспертами, оценивающими данное свойство. Нумерация объектов по шкале наименований осуществляется по принципу: "не приписывай одну и ту же цифру разным объектам". Числа, приписанные объектам, могут быть использованы для определения вероятности или частоты появления данного объекта, но их нельзя использовать для суммирования и других математических операций.

Поскольку данные шкалы характеризуются только отношениями эквивалентности, то в них отсутствует понятия нуля, "больше" или "меньше" и единицы измерения. Примером шкал наименований являются широко распространенные атласы цветов, предназначенные для идентификации цвета.

2. Шкала порядка (шкала рангов). Если свойство данного эмпирического объекта проявляет себя в отношении эквивалентности и порядка по возрастанию или убыванию количественного проявления свойства, то для него может быть построена шкала порядка. Она является монотонно возрастающей или убывающей и позволяет установить отношение больше/меньше между величинами, характеризующими указанное свойство. В шкалах порядка существует или не существует нуль, но принципиально нельзя ввести единицы измерения, так как для них не установлено отношение пропорциональности и соответственно нет возможности судить во сколько раз больше или меньше конкретные проявления свойства.

В случаях, когда уровень познания явления не позволяет точно установить отношения, существующие между величинами данной характеристики, либо применение шкалы удобно и достаточно для практики, используют условные (эмпирические) шкалы порядка. *Условная шкала* - это шкала ФВ, исходные значения которой выражены в условных единицах.

Например, шкала вязкости Энглера, 12-бальная шкала Бофорта для силы морского ветра.

Широкое распространение получили шкалы порядка с нанесенными на них реперными точками. К таким шкалам, например, относится шкала Мооса для определения твердости минералов, которая содержит 10 опорных (*реперных*) минералов с различными условными числами твердости: *тальк* - 1; *гипс* - 2; *кальций* - 3; *флюорит* - 4; *апатит* - 5; *ортоклаз* - 6; *кварц* - 7; *топаз* - 8; *корунд* - 9; *алмаз* - 10. Отнесение минерала к той или иной градации твердости осуществляется на основании эксперимента, который состоит в том, что испытуемый материал царапается опорным. Если после царапанья испытуемого минерала кварцем (7) на нем остается след, а после ортоклаза (6) - не остается, то твердость испытуемого материала составляет более 6, но менее 7. Более точного ответа в этом случае дать невозможно.

В условных шкалах одинаковым интервалам между размерами данной величины не соответствуют одинаковые размерности чисел, отображающих размеры. С помощью этих чисел можно найти вероятности, моды, медианы, квантили, однако их нельзя использовать для суммирования, умножения и других математических операций.

Определение значения величин при помощи шкал порядка нельзя считать измерением, так как на этих шкалах не могут быть введены единицы измерения. Операцию по приписыванию числа требуемой величине следует считать оцениванием. Оценивание по шкалам порядка является неоднозначным и весьма условным, о чем свидетельствует рассмотренный пример.

3. Шкала интервалов (шкала разностей). Эти шкалы являются дальнейшим развитием шкал порядка и применяются для объектов, свойства которых удовлетворяют отношениям эквивалентности, порядка и аддитивности. Шкала интервалов состоит из одинаковых интервалов, имеет единицу измерения и произвольно выбранное начало - нулевую точку. К таким шкалам относится летоисчисление по различным календарям, в

которых за начало отсчета принято либо сотворение мира, либо рождество Христово и т.д. Температурные шкалы Цельсия, Фаренгейта и Реомюра также являются шкалами интервалов.

На шкале интервалов определены действия сложения и вычитания интервалов. Действительно, по шкале времени интервалы можно суммировать или вычитать и сравнивать, во сколько раз один интервал больше другого, но складывать даты каких-либо событий просто бессмысленно.

4. Шкала отношений. Эти шкалы описывают свойства эмпирических объектов, которые удовлетворяют отношениям эквивалентности, порядка и аддитивности (шкалы второго рода - аддитивные), а в ряде случаев и пропорциональности (шкалы первого рода - пропорциональные). Их примерами являются шкала массы (второго рода), термодинамической температуры (первого рода).

В шкалах отношений существует однозначный естественный критерий нулевого количественного проявления свойства и единица измерений, установленная по соглашению. С формальной точки зрения шкала отношений является шкалой интервалов с естественным началом отсчета. К значениям, полученным по этой шкале, применимы все арифметические действия, что имеет важное значение при измерении ФВ.

Шкалы отношений - самые совершенные. Они описываются уравнением $Q = q[Q]$, где Q - ФВ, для которой строится шкала, $[Q]$ - ее единица измерения, q - числовое значение ФВ. Переход от одной шкалы отношений к другой происходит в соответствии с уравнением $q_2 = q_1[Q_1]/[Q_2]$.

5. Абсолютные шкалы. Некоторые авторы используют понятие абсолютных шкал, под которыми понимают шкалы, обладающие всеми признаками шкал отношений, но дополнительно имеющие естественное однозначное определение единицы измерения и не зависящие от принятой системы единиц измерения. Такие шкалы соответствуют относительным

величинам: коэффициенту усиления, ослабления и др. Для образования многих производных единиц в системе СИ используются безразмерные и счетные единицы абсолютных шкал.

Отметим, что шкалы наименований и порядка называют неметрическими (концептуальными), а шкалы интервалов и отношений - метрическими (материальными). Абсолютные и метрические шкалы относятся к разряду линейных. Практическая реализация шкал измерений осуществляется путем стандартизации как самих шкал и единиц измерений, так и, в необходимых случаях, способов и условий их однозначного воспроизведения.

§ III.2. Физические законы и размерности физических величин Системы единиц

III.2.1. Физические законы и размерности физических величин

Всякий количественный физический закон содержит в себе некоторое утверждение относительно связей между теми или иными физическими величинами.

Например, во втором законе Ньютона содержится утверждение, что ускорение тела пропорционально действующей на это тело силе.

В законе Кулона содержится утверждение, что сила взаимодействия между двумя точечными зарядами обратно пропорциональна квадрату расстояния между ними, и т. д.

Для того чтобы проверить на опыте эти утверждения, мы должны независимыми способами одновременно измерить все те величины, к которым относится наше утверждение. Пока мы не располагаем способами независимого измерения всех тех величин, которых касается это утверждение, мы не можем проверить его на опыте.

Так, положение, содержащееся во втором законе Ньютона, что ускорение пропорционально действующей силе, только тогда можно

рассматривать как утверждение, поддающееся проверке на опыте, если мы располагаем независимыми способами измерения ускорений и сил. Если же мы не располагаем независимым способом измерения силы, а определяем силы по тем ускорениям, которые они сообщают телу, то положение, что ускорение пропорционально силе, уже не является утверждением, поддающимся опытной проверке, а представляет собой определение силы, которое, как и всякое определение, в непосредственной опытной проверке не нуждается. Если мы определяем силу по ускорению, заранее считая ее пропорциональной ускорению, то нет смысла подвергать опытной проверке положение, что ускорения пропорциональны силам.

При формулировке всяких физических законов нужно ясно отдавать себе отчет, в какой мере те или иные положения представляют собой утверждения, нуждающиеся в проверке на опыте, и в какой мере они являются лишь определениями новых физических величин. Различать утверждения и определения необходимо потому, что утверждения и определения стоят в совершенно различной связи с опытом.

Утверждения можно и нужно проверять на опыте. Именно постольку, поскольку эти утверждения поддаются опытной проверке и подтверждаются на опыте, они представляют собой физические законы. Проверка состоит в том, что результаты нескольких независимых измерений различных физических величин удовлетворяют соотношению, выражаемому законом.

Определения же не поддаются опытной проверке такого рода. Правда, поскольку в определении всякой физической величины содержится способ ее измерения, этот способ должен, как указывалось, удовлетворять определенным требованиям. С этой точки зрения определения подлежат испытанию на опыте. Однако это испытание сводится к тому, что результаты многократных измерений одной и той же физической величины должны удовлетворять определенным требованиям: однозначности, повторяемости, должны «вести» себя как числа и т. д. Таким образом, испытание на опыте, которому подлежит определение, отличается от проверки на опыте, которой

должно быть подвергнуто утверждение. Если бы в физических законах речь шла всегда только о пропорциональности между физическими величинами, утверждение о том, что между данными величинами существует пропорциональность, оставалось бы правильным для любых масштабов единиц (конечно, при условии, что мы во всей серии измерений, используемых для проверки данного утверждения, применяем все время одни и те же единицы).

Действительно, замена во всех измерениях одних единиц другими изменит результаты всех измерений в одинаковое число раз, и если между какими-либо величинами существует пропорциональность в одной серии измерений, то она сохранится и во всякой другой серии измерений, произведенной при помощи других единиц.

Таким образом, пока речь идет только о пропорциональности между какими-либо величинами, все ограничения при выборе единиц включаются только в том, что каждую величину мы должны измерять все время в одних и тех же единицах. Выбор же самих единиц, служащих для измерения той или другой величины, остается произвольным.

Иначе обстоит дело, когда в физическом законе содержится утверждение не о пропорциональности, а о равенстве между какими-либо комбинациями физических величин. Ясно, что от пропорциональности между какими-либо величинами всегда можно перейти к равенству между ними, введя соответствующий коэффициент пропорциональности. Этот коэффициент пропорциональности мы могли бы определить из опыта, измерив один раз все физические величины, входящие в данный закон. Дальше мы могли бы утверждать, что результаты измерения нескольких различных физических величин должны удовлетворять определенному равенству.

Например, второй закон Ньютона представляет собой утверждение, что произведение массы на ускорение равно действующей силе. Мы утверждаем, что, измерив какими-либо независимыми способами массу тела, его

ускорение и действующую силу и перемножив числа, полученные в результате первых двух измерений, мы получим число, равное результату третьего измерения. Но в таком виде это утверждение справедливо только при определенном выборе единиц измерений, например, если мы будем измерять массу в граммах, ускорение в $см/сек^2$ и силу в *динах*. Если же мы будем измерять массу в килограммах, а ускорение и силу - по-прежнему в $см/сек^2$ и *динах*, то равенство между произведением массы на ускорение и силой, конечно, нарушится. Следовательно, в этом случае на выбор единиц измерений накладываются какие-то более жесткие требования, чем в том случае, когда речь идет только о пропорциональности между физическими величинами.

В том случае, когда мы пользуемся какой-либо одной абсолютной системой единиц, часто бывает удобно изменять масштабы единиц, например, измерять длину в одних случаях в сантиметрах, в других - в метрах, и т. д. Поэтому, прежде всего, необходимо выяснить, как изменяются результаты измерения тех или иных физических величин при таком изменении масштаба. Пока речь идет о результатах измерения тех величин, которые лежат в основе данной системы единиц, дело обстоит просто. Если, например, мы увеличиваем масштаб длины в *100* раз — переходим от сантиметров к метрам, - то числа, получающиеся в результате измерения всех длин, уменьшаются в *100* раз. Но когда мы производим измерения каких-либо других, не основных величин, например силы, работы и т. д., то влияние изменения масштабов на числа, получающиеся в результате измерения этих величин, не столь очевидно.

Числа, получающиеся в результате этих измерений, вообще говоря, изменяются при изменении масштабов основных единиц, так как в абсолютной системе единиц при изменении основных единиц изменяются и все производные единицы. Действительно, если, например, мы увеличим в *n* раз единицу длины, то во столько же раз увеличится и единица силы; если мы увеличим в *n* раз единицу времени, то единица силы уменьшится в n^2 раз.

Вместе с изменением единиц, служащих для измерения, изменятся, конечно, и числа, получающиеся в результате измерения: тех или иных физических величин.

Определения основных единиц

Метр - длина, равная $1650763,73$ длин волн (в вакууме) излучения, соответствующего переходу между уровнями $2p10$ и $5d5$, атома *криптона-86*.

Килограмм - единица массы - представлен массой международного прототипа килограмма.

Секунда - $1/31556925,9747$ часть тропического года для января 1900 г. в 12 часов эфемеридного времени.

Ампер - сила неизменяющегося тока, который, проходя по двум параллельным прямолинейным проводникам бесконечной длины и ничтожно малого кругового сечения, расположенным на расстоянии 1 м один от другого в вакууме, вызвал бы между этими проводниками силу, равную $2 \cdot 10^{-7}$ единиц силы Международной системы на каждый метр длины.

Градус Кельвина - единица измерения температуры по термодинамической температурной шкале, в которой для температуры тройной точки воды установлено значение $273,16^{\circ}\text{K}$ (точно).

Свеча - единица силы света, значение которой принимается таким, чтобы яркость полого излучателя при температуре затвердевания платины была равна 60 св на 1 см^2 .

III.2.2. Размерности физических величин. Правило размерностей

Очевидно, что при данном изменении масштабов результаты всех измерений одних и тех же физических величин изменятся одинаково. Другими словами, для всякой физической величины существует вполне определенная связь между изменениями масштабов основных единиц и изменениями чисел, получающихся в результате измерения этой физической величины. Размерность физической величины и выражает эту связь.

Размерность физической величины указывает, как изменяется число, выражающее результат измерения данной физической величины, при изменении масштабов применяемых единиц.

Для указания размерности физических величин пользуются символическими обозначениями, например $L^p M^q T^r$. Это означает, что в системе LMT число, выражающее результат измерения данной физической величины, уменьшится в n^p раз, если единицу длины увеличить в n раз, увеличится в n^q раз, если единицу массы увеличить в n раз, и, наконец, увеличится в n^r раз, если единицу времени увеличить в n раз.

Итак, размерность физической величины указывает, как в данной абсолютной системе единиц изменяются единицы, служащие для измерения этой физической величины, при изменении масштабов основных единиц.

Например, сила в системе LMT имеет размерность LMT^{-2} . Это значит, что при увеличении единицы длины в n раз единица силы также увеличивается в n раз. При увеличении единицы массы в n раз единица силы также увеличивается в n раз. И, наконец, при увеличении единицы времени в n раз единица силы уменьшается в n^2 раз.

Размерность всякой физической величины определяется, с одной стороны, установленным способом измерения данной физической величины, а с другой, - выбором системы единиц. Например, если мы измеряем скорость отношением пройденного пути к тому промежутку времени, за который этот путь пройден, то в системе LMT скорость будет иметь размерность LT^{-1} . Но если бы мы измеряли скорость по тому времени, в течение которого свободно падающее тело достигло бы измеряемой скорости, тогда за единицу скорости мы должны были бы принять такую скорость, которой свободно падающее тело достигло бы за единицу времени. Ясно, что в этом случае единица скорости изменилась бы так же, как единица времени, и размерность скорости в системе LMT была бы T .

Вместе с тем, как уже сказано, размерность физической величины зависит и от выбора системы единиц. Так, например, плотность, которую мы

определяем как отношение массы тела к его объему, в системе LMT имеет, очевидно, размерность $L^{-3}M$. Если же пользоваться системой единиц, в основу которой положены единицы длины, силы и времени, т.е. системой LFT , то размерность массы, а вместе с тем и плотности, будет зависеть от выбора способа измерения масс. Измеряя массу по отношению силы к сообщаемому этой силой ускорению, мы получим для массы размерность $L^{-1}FT^2$, а для плотности $-L^{-4}FT^2$.

Таким образом, в различных системах единиц размерность одной и той же физической величины, вообще говоря, различна. В частности, например, различны размерности силы тока в системах CGSE и CGSM. В первой системе размерность силы тока есть $L^{3/2}M^{1/2}T^{-2}$, а во второй $-L^{1/2}M^{1/2}T^{-1}$. Поэтому отношение величины силы тока в системах CGSE и CGSM имеет размерность LT^{-1} , т.е. совпадает с размерностью скорости. Это отношение называется электродинамической постоянной.

Специальные измерения показали, что электродинамическая постоянная $c = 2,99796 \cdot 10^{10}$ см/сек, т.е. совпадает со скоростью света в пустоте.

Правило размерностей

Эти жесткие требования, казалось бы, заключаются в том, что, формулируя какой-либо физический закон в виде равенства, мы должны тут же фиксировать и единицы, в которых следует измерять все входящие в этот закон величины. Однако эти требования можно значительно смягчить, если во всех равенствах, выражающих физические законы, размерности обеих частей равенства будут одинаковы. В таком случае требование сводится только к тому, чтобы для измерения всех величин, входящих в данное равенство, пользоваться одной и той же абсолютной системой единиц. Масштаб же основных единиц можно выбирать совершенно произвольно - равенство при этом не нарушается.

Так, во втором законе Ньютона можно, пользуясь системой *LMT*, измерять массу в граммах, ускорение в $см/сек^2$ и силу в $г \cdot см/сек^2$, т. е. в динах. Но можно также пользоваться системой единиц: метр, килограмм массы, секунда; тогда ускорение следует измерять в $м/сек^2$, а силу - в $кг \cdot м/сек^2$. Как в том, так и в другом случае произведение массы на ускорение будет равно действующей силе. Обусловлено это именно тем, что во втором законе Ньютона размерности обеих частей равенства одинаковы: размерность силы равна произведению размерностей массы и ускорения. Поэтому при переходе к новым масштабам результаты измерений отдельных величин будут, изменяться одинаково и равенство не нарушится.

Это справедливо, конечно, всегда. Соотношения, которые существуют между физическими величинами, не зависят от выбора масштабов единиц, если знак равенства соединяет выражения, имеющие одинаковую размерность. Нельзя сказать, что соотношения, в которых знак равенства соединяет выражения различной размерности, не имеют смысла, - они лишь не имеют общности. Например, можно утверждать, что давление P в воде, выраженное в $кг/см^2$, равно одной десятой от глубины погружения h в метрах, и записать это следующим образом:

$$P \text{ (кг/см}^2\text{)} = 0,1 h \text{ (м)}. \quad (III.1)$$

Эта формула не только имеет вполне определенный смысл, по ею пользоваться удобнее, чем всякой другой, несмотря на то, что размерности правой и левой частей в ней различны. Но она не имеет общности — она верна лишь в тех, случаях, когда мы измеряем давление в $кг/см^2$, а глубину в метрах. Если мы перейдем к измерению глубины, например, в сантиметрах, то формула окажется неверной.

Каким же образом достигается в физических формулах равенство размерностей правой и левой частей, обеспечивающее этим формулам общность, т. е. независимость от масштабов?

Здесь следует различать два случая.

Первый состоит в том, что в формулу, выражающую данный физический закон, входит какая-либо физическая величина, для которой единицы измерения устанавливаются на основании этого самого закона.

Примером этого может служить закон Кулона:

$$F = e_1 e_2 / r^2. \quad (III.2)$$

Единица количества электричества устанавливается на основании самого закона Кулона: мы принимаем за единицу такое количество электричества, которое с равным ему количеством электричества, находящимся на расстоянии, равном единице, взаимодействует с силой, равной единице. В этом случае одинаковая размерность правой и левой частей соблюдается, так сказать, «автоматически». Действительно, если закон Кулона справедлив при любых масштабах единиц значит, размерности правой и левой частей в (III.2) должны быть одинаковыми. Отсюда определяется связь между единицами количества электричества и единицами силы и длины. Размерность количества электричества в системе LMT должна быть $L^{3/2}M^{1/2}T^{-1}$, чтобы размерность выражения $e_1 e_2 / r^2$ оказалась равной размерности силы.

Таким же образом в каждом из законов, которыми мы пользуемся для установления единиц измерения какой-либо из физических величин, входящих в этот закон, одинаковая размерность правой и левой частей равенства всегда будет обеспечена.

Во втором случае в формулу, выражающую данный закон, входят только такие физические величины, для которых единицы измерения установлены были ранее либо непосредственно (в виде эталонов), либо при помощи каких-либо других законов. При этом, вообще говоря, может случиться, что наш закон устанавливает пропорциональность между комбинациями физических величин, размерности которых различны. Тогда после перехода от пропорциональности к равенству, чтобы это равенство не нарушалось, коэффициент пропорциональности должен изменяться при изменении масштабов.

Например, в случае закона всемирного тяготения утверждение состоит в том, что сила F взаимного притяжения двух тел прямо пропорциональна произведению масс m_1 и m_2 этих тел и обратно пропорциональна квадрату расстояния r между ними:

$$F \sim m_1 \cdot m_2 / r^2. (III.3)$$

Но размерность правой части есть M^2L^{-2} , а размерность левой MLT^{-2} , следовательно, величина численного коэффициента, который нужно ввести, чтобы от пропорциональности перейти к равенству, будет зависеть от выбора масштабов. Мы могли бы написать закон всемирного тяготения в общем виде следующим образом:

$$F = \gamma(m_1 \cdot m_2 / r^2). (III.4)$$

где γ — некоторый численный коэффициент. При этом значение γ изменяется при изменении масштабов; следовательно, γ представляет собой величину, имеющую определенную размерность. И так как мы каждый раз при переходе к новым масштабам подбираем γ так, чтобы равенство (III.4) оставалось справедливым, то тем самым мы так определяем размерность γ , чтобы размерности правой и левой частей равенства (III.4) оказались одинаковыми. Для этого коэффициент γ должен иметь размерность $L^3M^{-1}T^{-2}$. (Значение γ определяется из опыта, и эта величина носит название гравитационной постоянной). Но, вводя в закон всемирного тяготения этот коэффициент, размерность которого определяется из самого же закона всемирного тяготения, мы свели наш второй случай к первому. А в первом случае, как мы видели, одинаковая размерность правой и левой частей обеспечивается «автоматически».

Конечно, может случиться, что в новом физическом законе, связывающем между собой величины, единицы измерения которых, а значит, и размерности, были установлены заранее, размерности правой и левой частей «сами собой» оказываются одинаковыми. Тогда, хотя при переходе от пропорциональности к равенству может оказаться необходимым ввести некоторый численный коэффициент, величина этого численного

коэффициента не будет зависеть от выбора масштабов единиц, т. е. он окажется безразмерным.

Мы видим, таким образом, что равенствам, выражающим физические законы, всегда можно придать такой вид, чтобы эти равенства не нарушались при изменении масштабов единиц (т. е. чтобы размерности правой и левой частей равенства, были одинаковы). Именно в таком общем, не зависящем от выбора масштабов, виде и принято обычно выражать все физические законы и вообще все соотношения между физическими величинами. Иногда, однако, бывает удобнее не соблюдать условия одинаковой размерности правой и левой частей (выражения получаются проще). Но тогда обязательно должно быть оговорено, в каких единицах производится измерение всех входящих в соотношение величин, и нужно иметь в виду, что применять другие единицы, отличные от указанных, уже нельзя.

III.2.3. Системы единиц

Для измерения всякой физической величины нужно выбрать эталон данной физической величины. Поэтому, в сущности, мы должны были бы иметь множество эталонов для всех разнообразнейших физических величин. Для того чтобы избавиться от необходимости вводить новый эталон для всякой новой физической величины, поступают следующим образом. Выбрав несколько эталонов для основных физических величин (например, длины, времени, массы) принимают их за основные единицы. Единицы всех остальных физических величин устанавливают при помощи этих основных единиц, пользуясь для этого физическими законами, связывающими между собой новые физические величины с теми, для которых эталоны существуют.

Так, например, в качестве эталона силы можно было бы пользоваться сжатой (или растянутой) на определенную величину пружиной. Но необходимость в этом эталоне силы отпадает, если мы воспользуемся вторым законом Ньютона, устанавливающим связь между массой, ускорением и силой. Так как, согласно этому закону, сила пропорциональна произведению

массы на ускорение, то за единицу силы мы можем принять такую силу, которая определенной массе m сообщает определенное ускорение a . Если хранящиеся у нас эталоны позволяют измерять массы и ускорения, то мы всегда сможем воспроизвести эталон силы, подобрав силу (например, сжатие пружины) так, чтобы она массе m сообщала ускорение a .

При переходе от основных единиц (т. е. тех, для которых хранятся специальные эталоны) к производным можно было бы устанавливать эти новые единицы совершенно произвольно и за единицу силы принять такую силу, которая произвольно выбранной определенной массе сообщает некоторое произвольно же выбранное определенное ускорение. Однако вся система единиц получается гораздо более стройной и все физические соотношения принимают более простой и удобный вид, если при установлении новых единиц определять их таким образом, чтобы в выражение новой величины через основные не входили никакие числовые коэффициенты. Тогда за единицу силы мы должны принять такую силу, которая массе, равной единице, сообщает ускорение, равное единице; за единицу количества электричества мы должны принять такое количество электричества, которое с равным ему количеством электричества, на расстоянии, равном единице, взаимодействует с силой, равной единице, и т. д. Построенные по этому принципу системы единиц носят название абсолютных.

Существует несколько абсолютных систем единиц, отличающихся выбором тех величин, которые приняты за основные и для которых установлены специальные эталоны. В физике наиболее употребительна система единиц, в основу которой положены единицы длины (L), массы (M) и времени (T). Все остальные единицы выводятся из этих трех основных. Это — так называемая система LMT .

В качестве эталонов в этой системе служат: эталон длины — линейка, длина которой принята за $1m$, и эталон массы — гиря, масса которой принята

за 1 кг); в качестве эталона времени до последнего времени служили средние «солнечные сутки».

Средние «солнечные сутки» были введены потому, что истинные «солнечные сутки», т. е. промежуток времени между двумя последовательными прохождениями центра Солнца через меридиан, не остаются неизменными в течение всего года, так как Земля не только вращается вокруг своей оси, но и движется по эклиптике вокруг Солнца. Движение Земли, происходящее в разных участках эклиптики с несколько различной угловой скоростью, и приводит к тому, что в разные времена года продолжительность истинных «солнечных суток» оказывается несколько различной. Эти регулярные изменения продолжительности истинных «солнечных суток» исключаются введением «средних солнечных суток».

Однако в последнее время благодаря усовершенствованию методов астрономических наблюдений и измерения промежутков времени было обнаружено, что сама угловая скорость вращения Земли вокруг своей оси не остается абсолютно постоянной, а испытывает некоторые изменения, что сказывается на продолжительности истинных, а значит, и средних солнечных суток. В связи с этим вместо «средних солнечных суток» в качестве эталона времени был выбран средний тропический год (его продолжительность приблизительно 365,24 «средних солнечных суток»). Но так как величина среднего тропического года претерпевает медленные изменения, то за эталон была принята та продолжительность среднего тропического года, которую он имел в 1900 г.

В качестве эталона длины вместо линейки может служить также длина определенной световой волны (например, желтой линии кадмия). Постоянство этого эталона может быть обеспечено путем выбора условий, в которых возникает свечение данной длины волны, и ее сравнение с измеряемой длиной может быть выполнено (при помощи интерференционных методов) с очень высокой степенью точности.

Выбрав те физические величины, эталоны которых в данной системе приняты за основные (в системе *LMT* это — эталоны длины, массы и времени), следует установить еще и самую величину этих основных эталонов. Например, за единицу длины может быть принят *метр*, т. е. длина того эталона, который хранится в Париже, или *сантиметр*, т. е. одна сотая длины эталона. Точно так же за единицу массы можно принять *миллиграмм*, т. е. одну тысячную массы эталона.

Наконец, за единицу времени могут быть приняты либо средний тропический год, либо некоторая доля его. Для того чтобы разделить эталон времени - средний тропический год - на равные части, применяются те или иные часы. Чаще всего часы - это устройство, в котором происходит какой-либо периодический процесс (т. е. процесс, повторяющийся через равные промежутки времени). Сосчитав число периодов процесса, происходящих в часах в течение среднего тропического года, мы можем разделить год на известное число равных частей и пользоваться продолжительностью одного периода, т. е. известной долей среднего тропического года, как единицей времени. За единицу времени в физике принята *1 секунда*, составляющая определенную с высокой точностью долю среднего тропического года.

Часы представляют собой, таким, образом, физический прибор, служащий при измерении времени той же цели, какой служит линейка с нанесенными на ней делениями (расстояние между которыми составляет известную долю эталона длины) при измерении длины. Как и всякий физический измерительный прибор, часы должны удовлетворять известным требованиям, и прежде всего происходящий, в них процесс должен быть точно повторяющимся.

Для разделения эталона времени - среднего тропического года - на равные части, кроме часов с маятником, сейчас применяют другие типы часов, например кварцевые часы, в которых периодическим процессом служат упругие колебания пластинки, вырезанной из пьезоэлектрического кристалла кварца (эти колебания поддерживаются при помощи схемы с

электронными лампами). В последнее время были созданы молекулярные и атомные часы, в которых используются периодические колебания, происходящие в атомах или молекулах; чтобы число этих колебаний можно было считать (с помощью специальных электрических устройств), выбирают такие колебания которым соответствуют спектральные линии, лежащие в области радиоволн.

В зависимости от выбора единиц длины, массы и времени получаются различные системы единиц, например *сантиметр, грамм, секунда (CGS)* или *метр, килограмм, секунда (MKS)*. Но поскольку основными единицами и в том, и в другом случае служат единицы длины, массы и времени, то системы *CGS* и *MKS* принадлежат: к одной и той же системе *LMT* и отличаются только «масштабами» - величиной основных единиц, но не их природой. В дальнейшем, когда мы будем говорить об «изменении масштабов единиц», мы будем иметь в виду именно этот случай: замену в той же системе одних основных единиц другими, меньшими или большими, но не изменение природы основных единиц.

Переход от основных единиц (например, длины, массы и времени) к электрическим единицам может быть произведен уже упоминавшимся способом выбора единицы количества электричества. Тогда все остальные электрические единицы устанавливаются при помощи трех основных единиц и единицы количества электричества; например, за единицу силы тока принимается такой ток, при котором за единицу времени через сечение проводника проходит единица количества электричества, и т. д. Такая система электрических единиц называется абсолютной электростатической системой единиц. Вместе с системой *CGS* она образует абсолютную систему единиц *CGSE*.

Но переход от основных единиц - длины, массы и времени - к электрическим единицам может быть произведен и иным путем: по силе взаимодействия токов. За единицу силы тока принимается такой ток, который, протекая по проводнику, длина которого равна единице, с таким же

током, протекающим по такому же проводнику, расположенному параллельно первому на расстоянии, равном единице, взаимодействует с силой, равной единице. Все остальные электрические единицы устанавливаются при помощи трех основных единиц и единицы силы тока. Например, за единицу количества электричества принимается такое количество электричества, которое протекает через сечение проводника за единицу времени при силе тока, равной единице, и т. д. Такая система электрических единиц называется абсолютной электромагнитной системой единиц. Вместе с системой *CGS* она образует абсолютную систему единиц *CGSM*.

Существуют и другие абсолютные системы единиц, в которых в основу положены другие основные величины. В механике пользуются, например, системой единиц, в которой основными единицами служат единицы длины, силы и времени. Эталоны длины и времени в этой системе единиц выбираются так же, как в системе *CGS*, а эталоном силы служит та сила, с которой гиря-эталон притягивается к Земле на широте 45° . Это - так называемая система *LFT*.

До последнего времени в различных областях науки и техники отдавали предпочтение разным системам единиц; в физике применялись, главным образом системы *LMT*, в частности система *CGS* с ее разветвлениями *CGSE* и *CGSM*. Однако в октябре 1960 г. на Международной XI генеральной конференции по мерам и весам принята единая международная система единиц (*SI*), которая должна применяться как предпочтительная во всех областях науки, техники. В этой системе принято шесть основных единиц и две дополнительные (см. таблицу III.1).

Как ясно из определений основных единиц системы *SI* что, эта система примыкает, к системам *LMT*, причем три основные ее единицы — длины, массы и времени — совпадают с таковыми системы *MKS*. Однако четвертая единица - ампер - в системе *SI* определена не так, как она должна определяться в абсолютной системе *MKSM* (в абсолютной системе *MKSM* в

определении ампера вместо $2 \cdot 10^{-7}$ единиц силы должна была бы стоять *1 единица силы*). Это отступление сделано для того, чтобы *ампер*, а вместе с тем и все электрические и магнитные единицы системы *СИ* совпали с соответствующими единицами, так называемой практической системы электрических единиц, давно принятой в электротехнике (отказаться от этой применяемой во всем мире и во всех областях теоретической и практической электротехники системы единиц было бы совершенно нецелесообразно).

Однако в тех случаях, когда рассматриваются вопросы физические, а не технические, часто оказывается удобнее для электрических и магнитных величин пользоваться единицами не системы *СИ*, а систем *CGSE* и *CGSM*.

По этим соображениям мы будем иногда применять системы *CGSE* и *CGSM*, специально оговаривая это каждый раз.

Таблица III.1

Международная система единиц (СИ)

<i>Наименование величины</i>	<i>Единица измерения</i>	<i>Обозначение единицы</i>
Основные единицы		
Длина	Метр	<i>м</i>
Масса	Килограмм	<i>кг</i>
Время	Секунда	<i>с</i>
Температура	Градус Кельвина	<i>°K</i>
Сила электрического тока	Ампер	<i>а</i>
Сила света	Свеча	<i>св</i>
Дополнительные единицы		
Плоский угол	Радян	<i>рад</i>
Телесный угол	Стерadian	<i>стерад</i>
Производные единицы		
Площадь	Квадратный метр	<i>м²</i>
Объем	Кубический метр	<i>м³</i>
Частота	Герц (<i>1/сек</i>)	<i>Гц</i>
Объемная масса (плотность)	Килограмм на куб. м.	<i>кг/м³</i>
Скорость	Метр в сек.	<i>м/сек</i>
Угловая скорость	Радян в секунду	<i>рад/сек</i>
Ускорение	Метр на секунду в квадрате	<i>м/сек²</i>
Угловое ускорение	Радян на секунду в квадрате	<i>рад/сек²</i>
Сила	Ньютон (<i>кг·м/сек²</i>)	<i>Н</i>
Давление (механическое напряжение)	Ньютон на кв. метр	<i>Н/м²</i>
Динамическая вязкость	Ньютон·секунда на кв. метр	<i>Н·сек/м²</i>
Кинематическая вязкость	Кв. метр на секунду	<i>м²/сек</i>
Работа, энергия, количество теплоты	Джоуль	<i>Дж</i>
Мощность	Ватт	<i>Вт</i>
Количество электричества	Кулон	<i>К</i>
Электрическое напряжение, потенциалов, электродвижущая сила	Вольт	<i>В</i>
Напряжённость электрического поля	Вольт на метр	<i>В/м</i>
Электрическое сопротивление	Ом	<i>Ом</i>
Электрическая емкость	Фарада	<i>Ф</i>

Поток магнитной индукции	Вебер	<i>Вб</i>
Индуктивность	Генри	<i>Гн</i>
Магнитная индукция	Тесла (<i>Вб/м²</i>)	<i>Тс</i>
Напряжённость магнитного поля	Ампер на метр	<i>А/м</i>
Световой поток	Люмен	<i>Лм</i>
Яркость	Свеча на кв. метр	<i>св/м²</i>
Освещённость	Люкс	<i>лк</i>

Общие вопросы, связанные с переходом от одних систем единиц к другим и с изменением масштабов основных единиц, рассматриваются в специальных справочниках, например [19]. Для определенности необходимо всегда иметь в виду систему *ЛМТ*. Но все общие и специальные соображения, которые могут быть высказаны, когда мы говорим о системах единиц, в одинаковой мере относятся и ко всем другим системам.

ГЛАВА IV

КАЧЕСТВО ИЗМЕРЕНИЙ

Введение

Без измерений не может обойтись ни одна наука, поэтому метрология как наука об измерениях находится в тесной связи со всеми другими науками. Поэтому, основное понятие метрологии - измерение. Согласно ГОСТ 16263 - 70, измерение - это нахождение значения физической величины (ФВ) опытным путем с помощью специальных технических средств.

Возможность измерения обуславливается предварительным изучением заданного свойства объекта измерений, построением абстрактных моделей как самого свойства, так и его носителя - объекта измерения в целом. Поэтому, место измерения определяется среди методов познания, обеспечивающих достоверность измерения. С помощью метрологических процедур решаются задачи формирования данных (фиксации результатов познания). Измерение с этой точки зрения представляет собой метод кодирования сведений и регистрации полученной информации.

Измерения обеспечивают получение количественной информации об объекте управления или контроля, без которой невозможно точное воспроизведение всех заданных условий технического процесса, обеспечение высокого качества изделий и эффективного управления объектом. Все это составляет технический аспект измерений.

До 1918 г. метрическая система внедрялась в России факультативно, наряду со старой русской и английской (дюймовой) системами. Значительные изменения в метрологической деятельности стали происходить после подписания Советом народных комиссаров РСФСР декрета "О введении международной метрической системы мер и весов". Внедрение метрической системы в России происходило с 1918 по 1927 г. После Великой Отечественной войны и до сего времени метрологическая работа в нашей стране проводится под руководством Государственного комитета по стандартам (Госстандарт).

В 1960 г. XI Международная конференция по мерам и весам приняла Международную систему единиц ФВ - систему СИ. Сегодня метрическая система узаконена более чем в 124 странах мира.

В настоящее время на базе Главной палаты мер и весов существует высшее научное учреждение страны - Всероссийский научно-исследовательский институт метрологии им. Д.И. Менделеева (ВНИИМ). В лабораториях института разрабатываются и хранятся государственные эталоны единиц измерений, определяются физические константы и свойства веществ и материалов. Тематика работ института охватывает линейные, угловые, оптические и фотометрические, акустические, электрические и магнитные измерения, измерения массы, плотности, силы, давления, вязкости, твердости, скорости, ускорения и ряда других величин.

В 1955 г. под Москвой был создан второй метрологический центр страны - ныне Всероссийский научно-исследовательский институт физико-технических и радиотехнических измерений (ВНИИФТРИ). Он разрабатывает эталоны и средства точных измерений в ряде важнейших

областей науки и техники: радиоэлектронике, службе времени и частоты, акустике, атомной физике, физике низких температур и высоких давлений.

Третьим метрологическим центром России является Всероссийский научно-исследовательский институт метрологической службы (ВНИИМС) - головная организация в области прикладной и законодательной метрологии. На него возложена координация и научно-методическое руководство метрологической службой страны. Кроме перечисленных существует ряд региональных метрологических институтов и центров.

К международным метрологическим организациям относится и Международная организация законодательной метрологии (МОЗМ), образованная в 1956 г. При МОЗМ в Париже работает Международное бюро законодательной метрологии. Его деятельностью руководит Международный комитет законодательной метрологии. Некоторые вопросы метрологии решает Международная организация по стандартизации (ИСО) [21].

§ IV.1. Качество измерений и метрология

Качество измерений определяется их точностью. Точность измерений характеризуется их погрешностью. *Абсолютной погрешностью* измерений называют разность между найденным на опыте и истинным значением физической величины. Обозначая погрешность измерения величины x символом Δx , найдем

$$\Delta x = x_{\text{изм}} - x_{\text{ист}}. \quad (IV.1)$$

Относительная погрешность измерений равна отношению абсолютной погрешности к значению измеряемой величины:

$$\delta_x = \frac{\Delta x}{x_{\text{ист}}}. \quad (IV.2)$$

Качество измерений обычно определяется именно относительной, а не абсолютной погрешностью. Одна и та же погрешность в 1 мм при измерении длины комнаты не играет роли, при измерении длины стола может уже быть

существенна, а при определении диаметра болта совершенно недопустима. Это происходит потому, что относительная погрешность измерений в первом случае составляет $\approx 2 \cdot 10^{-4}$, во втором $\approx 10^{-3}$, а в третьем может составлять десятки процентов и более.

Вместо того, чтобы говорить об абсолютной и относительной погрешности измерений, часто говорят об их абсолютной и относительной ошибке. Здесь нет никакого различия. Однако цель измерений всегда состоит в том, чтобы узнать не известное заранее значение физической величины и найти если не ее истинное значение, то хотя бы значение, достаточно мало от него отличающееся. Поэтому формулы (IV.1) и (IV.2), определяющие величину погрешностей, для практики непригодны. При практических измерениях погрешности не вычисляются, а оцениваются. При оценках (которые редко удается провести с точностью лучше 20 - 30%) учитываются условия проведения эксперимента, точность методики, качество приборов и ряд других факторов.

IV.3.1. Случайные и систематические погрешности измерений

Говоря о погрешностях измерений, следует, прежде всего, упомянуть о грубых погрешностях (промахах), возникающих вследствие недосмотра оператора или неисправности аппаратуры. Такие ошибки происходят, если, например, экспериментатор неправильно прочтет номер деления на шкале, если в электрической цепи произойдет замыкание и вследствие других подобных причин. Грубых ошибок следует избегать. Если установлено, что они произошли, соответствующие измерения нужно отбрасывать.

Не связанные с грубыми ошибками погрешности измерений бывают - *случайные и систематические*.

Погрешности измерений выявляют путем сравнения результатов, полученных при нескольких опытах, поставленных в одинаковых условиях. Два-три измерения следует производить всегда. Если результаты совпали, то на этом следует остановиться. Если же они расходятся, нужно попытаться

понять причину расхождения. Часто она связана с тем, что прибор неисправен, ненадежно закреплен или плохо смазан, что электрические контакты не пропаяны или недостаточно зажаты. В этом случае, прежде всего, нужно попытаться исправить аппаратуру. Если устранить причину не удастся, нужно произвести несколько измерений и записать все полученные результаты. Ниже будет рассказано о том, как следует поступать с полученными числами.

Многokrатно повторяя одни и те же измерения, можно заметить, что довольно часто их результаты не в точности равны друг другу, а «пляшут» вокруг некоторого среднего. *Погрешности, меняющие величину и знак от опыта и опыту, называют случайными.*

Случайные погрешности могут быть связаны с трением (из-за которого приборная стрелка вместо того чтобы останавливаться в правильном положении, «застревает» вблизи него), с люфтами в механических приспособлениях, с тряской, которую в городских условиях трудно исключить, с несовершенством объекта измерений (например, при измерении диаметра проволоки, которая из-за случайных причин, возникающих при изготовлении, имеет не вполне круглое сечение) или с физическими особенностями самой измеряемой величины.

Систематические погрешности сохраняют свою величину (и знак!) во время эксперимента. Они могут быть связаны с ошибками приборов (неправильная шкала, неравномерно растягивающаяся пружина, неравномерный шаг микрометрического винта, не равные плечи весов) и с самой постановкой опыта (определение скорости поезда по проходимому им расстоянию на участке, где движение происходит с небольшим ускорением, которое ускользнуло от внимания оператора, влияние трения и т. д.). В результате систематических погрешностей, разбросанные из-за случайных ошибок результаты опыта колеблются не вокруг истинного, а вокруг некоторого смещенного значения.

Рис. 37 поясняет различие между случайными и систематическими

погрешностями.

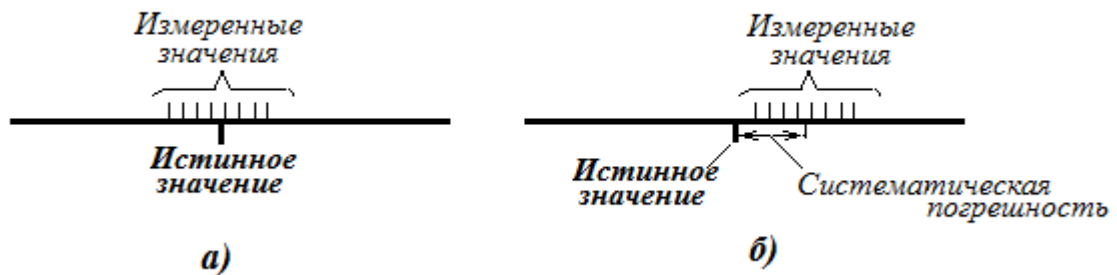


Рис. 37. Разброс результатов вокруг истинного значения:

- а) при отсутствии систематической погрешности;*
б) при наличии систематической погрешности

В ситуации, изображенной на *рис. 37,а*, систематическая погрешность пренебрежимо мала. Измеренные значения отличаются от истинного вследствие случайных ошибок опыта. На *рис. 37,б*, изображены результаты опыта при наличии как случайных, так и систематических погрешностей.

Систематические погрешности опыта могут быть изучены и скомпенсированы, путем внесения поправок в результаты измерений. Неравноплечность весов можно учесть, меняя местами грузы на чашках весов. Неточность шкал электроизмерительных приборов можно установить, сравнивая их показания с показаниями более точных приборов, и т. д.

Различие между случайными и систематическими погрешностями не является абсолютным. Оно связано с постановкой измерительного эксперимента. Например, производя измерения тока несколькими разными амперметрами систематическую ошибку, связанную с неточностью шкалы, мы превращаем в случайную, величина (и знак!) которой зависит от того, какой поставлен амперметр в данном опыте и т.д. Однако, в любом опыте - при заданной его постановке - *различие между систематическими и случайными погрешностями всегда можно и нужно устанавливать с полной определенностью.*

Случайные погрешности

Случайные величины, к которым относятся случайные погрешности, изучаются в теории вероятностей и в математической статистике.

Рассмотрим для примера данные, полученные при измерениях массы тела на весах, у которых имеется область застоя из-за трения призмы на подушке. Пусть масса тела близка к 48 мг, результат измерений удастся отсчитать по шкале с точностью до 0,1 мг. Имеем в миллиграммах: 48,0; 47,9; 47,5; 48,2; 48,4; 47,8; 48,6; 48,3; 47,8; 48,1; 48,2. Вместо одного нужного нам результата мы получили одиннадцать. Что делать с полученными цифрами? Как найти действительное значение массы тела и как оценить погрешность полученного результата? Этот вопрос подробно изучается в математической статистике. Рассмотрим соответствующие правила без вывода.

В качестве наилучшего значения для измеренной величины обычно принимают среднее арифметическое из всех полученных результатов:

$$x_{cp} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i, \quad (IV.3)$$

в нашем случае получим

$$m_{cp} = \frac{1}{11} (48,0 + 47,9 + \dots + 48,1 + 48,2) = 48,1 \text{ мг.} \quad (IV.4)$$

Этому результату следует приписать погрешность, определяемую формулой

$$\sigma_x = \frac{1}{n} \sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - x_{cp})^2}. \quad (IV.5)$$

В нашем случае

$$\sigma_m = \frac{1}{11} \sqrt{(48,0 - 48,1)^2 + (47,9 - 48,1)^2 + \dots + (48,2 - 48,1)^2} = 0,1 \text{ мг.} \quad (IV.7)$$

Результат опыта записывается в виде

$$x = x_{cp} \pm \sigma_x. \quad (IV.8)$$

В нашем частном случае $m = (48,1 \pm 0,1) \text{ мг.}$

Рассмотрим формулы (IV.3) и (IV.5). Прежде всего, попытаемся понять, как зависит результат расчета от числа измерений.

Формула (IV.3) показывает, что x_{cp} слабо зависит от числа измерений. Все слагаемые, входящие в числитель, приблизительно равны друг другу. Их сумма пропорциональна числу слагаемых. После деления на знаменатель

получается величина, мало зависящая от числа измерений, Так, конечно, и должно быть. Среднее измеренное значение - при правильной методике опыта - всегда лежит вблизи истинного значения и в разных независимых сериях измерений испытывает вокруг него небольшие случайные колебания.

Погрешность опыта, определяемая формулой (IV.5), с увеличением числа измерений n уменьшается как \sqrt{n} :

$$\sigma \approx 1/\sqrt{n}. \quad (IV.9)$$

(Число членов суммы в (IV.9) растет как n , числитель (IV.9) поэтому увеличивается как \sqrt{n} , а все выражение уменьшается как \sqrt{n} .)

Этот результат является очень важным. По мере увеличения числа опытов ошибки в сторону преувеличения и преуменьшения результата все лучше компенсируют друг друга, и среднее значение приближается к истинному. В нашем примере одиночные отсчёты отличаются от среднего на несколько десятых, а погрешность результата, полученного при усреднении всех измерений, составляет всего одну десятую.

Корень из n определяет среднеквадратичную погрешность одного измерения. При обсуждении смысла величины σ следует помнить, что истинную величину погрешности невозможно узнать до тех пор, пока из каких-либо других опытов (или соображений) не удастся определить искомую величину с существенно лучшей точностью.

Как уже отмечалось, погрешность результата не столько определяют, сколько оценивают. Оценка (IV.9) подобрана так, что при проведении многочисленных серий измерений погрешность в 2/3 случаев оказывается меньше σ_x , а в 1/3 случаев больше, чем σ_x .

Иначе говоря, если провести не одну серию из 11 взвешиваний, а десять таких серий, то можно ожидать, что в шести или семи из них усредненный результат будет отличаться от истинной массы тела меньше чем на 0,1 мг, а в остальных случаях больше чем на 0,1 мг.

Погрешность, определенную с достоверностью 2/3, обычно называют

стандартной (или *среднеквадратичной*) *погрешностью измерений*, а её квадрат - *дисперсией*. Можно показать, что, как правило, погрешность опыта только в 5% случаев превосходит $\pm 2\sigma$ и почти всегда оказывается меньше $\pm 3\sigma$.

На первый взгляд из сказанного можно сделать вывод, что, беспредельно увеличивая число измерений, можно даже с самой примитивной аппаратурой получить очень хорошие результаты. Это, конечно, не так. С увеличением числа измерений уменьшается только случайная погрешность опытов. Методические погрешности и погрешности, связанные с несовершенством приборов (например, с неправильностью их шкалы), при увеличении числа опытов ведут себя скорее наоборот и в лучшем случае не меняются.

В приведенном выше примере результат взвешивания округлялся до десятых долей миллиграмма. Это делалось потому, что сотых долей отсчитать было нельзя. Ошибка отсчета составляла при этом около 0,1 мг. Поэтому погрешность результата, ни при каком числе опытов не может быть сделана меньше.

Число опытов в нашем случае было выбрано разумно. Из приведенных в таблице цифр ясно, что при однократном измерении можно ошибиться на несколько десятых. Среди цифр встречаются результаты, отличающиеся на 0,3 и даже на 0,5 от среднего. После усреднения по 11 измерениям погрешность существенно уменьшилась. Но если окажется нужным узнать массу тела с лучшей точностью, то недостаточно просто увеличить число измерений. Придется взять более точные весы, позволяющие производить измерения не до десятых, а, скажем, до сотых долей миллиграмма.

Необходимо заметить, что формула (IV.9) позволяет хорошо оценивать величину стандартной погрешности только в тех случаях, когда число опытов оказывается не меньше $4 \div 5$. При меньшем числе опытов лучше применять другие, более сложные оценки. Однако надежность всех этих оценок при малом числе измерений оказывается невысокой.

Систематические погрешности

Оценку систематических погрешностей экспериментатор производит, анализируя особенности методики, паспортную точность приборов и производя контрольные опыты.

Отметим различие в правилах определения погрешностей и в определении класса точности.

Погрешности принято характеризовать среднеквадратичными ошибками. При многочисленных измерениях реальная ошибка опытов только в $2/3$ случаев меньше среднеквадратичной, а в $1/3$ случаев превосходит её.

Класс точности определяет максимально возможное значение погрешности. Приборы, которые могут давать, хотя бы иногда, бо́льшие погрешности, должны быть отнесены к другому классу.

Такое различие в определениях неудобно. В научных публикациях принято приводить именно среднеквадратичную ошибку, а вовсе не максимальную. Строгих формул для перевода одних погрешностей в другие не существует, поэтому можно пользоваться следующим простым правилом: *чтобы оценить среднеквадратичную погрешность измерений приборами, следует погрешность, определяемую классом точности прибора, разделить на два.*

Как уже отмечалось, класс приборов определяет максимальную погрешность, величина которой не меняется при переходе от начала к концу шкалы. Относительная ошибка при этом резко меняется, поэтому приборы обеспечивают хорошую точность при отклонении на всю шкалу и не дают её при измерениях в начале шкалы. Отсюда следует рекомендация: *выбирать прибор (или шкалу многошкального прибора) так, чтобы стрелка прибора при измерениях заходила за середину шкалы.*

Говоря о систематических погрешностях измерений в механике, следует сказать несколько слов об ошибке отсчета «на глаз». Большинство приборов не имеет «нониусных» шкал. При этом доли деления

отсчитываются на глаз. Эта ошибка составляет 1-2 десятых доли деления. При отсчётах следует следить за тем, чтобы луч зрения был перпендикулярен шкале. Для облегчения установки глаза на многих приборах устанавливается зеркало (зеркальные приборы). Глаз оператора установлен правильно, если стрелка прибора закрывает свое изображение в зеркале. При работе с электроизмерительными приборами отсчет должен включать число целых делений и число десятых долей деления, если отсчет может быть произведен с этой точностью (если стрелка или зайчик не ходят и не дрожат, что может сделать аккуратный отсчет невозможным).

Поясним указанное правило. Шкалы электроизмерительных приборов обычно изготавливают так, что одно деление шкалы приблизительно равно максимальной погрешности прибора. Зачем же в этом случае отсчитывать десятые доли деления? Дело в том, что при измерениях, при расчетах и при записи результатов, кроме надежно известных значащих цифр, всегда указывается одна лишняя. Такая процедура, среди прочих, имеет и то преимущество, что позволяет вовремя замечать, мелкие нерегулярности и исследуемых зависимостей. Если, например, стрелка прибора при измерениях отклонилась на половину деления назад, этот результат является надежным и в том случае, когда погрешность прибора равна целому делению.

Несколько слов о точности линеек. Металлические линейки очень точны: миллиметровые деления наносятся с погрешностью не более $\pm 0,05$ мм, а сантиметровые - не хуже, чем с точностью 0,1 мм. Погрешность измерений, производимых с помощью таких линеек, практически равна погрешности отсчета на глаз. Деревянными или пластиковыми линейками лучше не пользоваться: их погрешности неизвестны и могут оказаться неожиданно большими. Исправный микрометр обеспечивает точность 0,01 мм, а погрешность измерений штангенциркулем определяется точностью, с которой может быть сделан отсчет, т. е. точностью нониуса (у штангенциркулей цена делений нониуса составляет обычно 0,1 или 0,05 мм).

IV.3.2. Сложение случайных и систематических погрешностей

В реальных опытах присутствуют как систематические, так и случайные ошибки. Пусть они характеризуются стандартными погрешностями $\sigma_{сист}$ и $\sigma_{случ}$. Суммарная погрешность находится по формуле

$$\sigma_{полн}^2 = \sigma_{случ}^2 + \sigma_{сист}^2. \quad (IV.10)$$

Поясним эту формулу. Систематическая и случайная ошибки могут, в зависимости от случая, складываться или вычитаться друг из друга. Как уже говорилось, точность опытов принято характеризовать не максимальной (и не минимальной), а среднеквадратичной погрешностью. Поэтому правильно рассчитанная погрешность должна быть меньше суммы $\sigma_{случ} + \sigma_{сист}$ и больше их разности $\sigma_{случ} - \sigma_{сист}$. Легко видеть, что $\sigma_{полн}$, определенная формулой (IV.10), удовлетворяет этому условию. В самом деле, все величины положительны. Поэтому

$$\sigma_{полн}^2 = \sigma_{случ}^2 + \sigma_{сист}^2 \leq \sigma_{случ}^2 + 2\sigma_{случ}\sigma_{сист} + \sigma_{сист}^2 = (\sigma_{случ} + \sigma_{сист})^2. \quad (IV.11)$$

Знак равенства возникает только в том случае, когда одна из погрешностей равна нулю. Аналогично имеем

$$\sigma_{полн}^2 \geq \sigma_{случ}^2 - 2\sigma_{случ}\sigma_{сист} + \sigma_{сист}^2 = (\sigma_{случ} - \sigma_{сист})^2. \quad (IV.12)$$

Формула (IV.10) показывает, что при наличии как случайной, так и систематической погрешности полная ошибка опыта больше, чем каждая из них в отдельности, что также является вполне естественным.

Обратим внимание на ещё одну важную особенность формулы (IV.10). Пусть одна из ошибок, например $\sigma_{случ}$, в 2 раза меньше другой. Тогда

$$\sigma_{полн} = \sqrt{\sigma_{случ}^2 + \sigma_{сист}^2} = \sqrt{5/4}\sigma_{сист} \approx 1,12\sigma_{сист}. \quad (IV.13)$$

Как мы уже говорили, погрешности редко удается оценить с точностью лучше 20%. Но в нашем примере с точностью 20% $\sigma_{полн} = \sigma_{сист}$. Таким образом, меньшая погрешность почти ничего не добавляет к большей, даже если она составляет половину от нее.

Этот вывод очень важен. В том случае, если случайная ошибка опытов вдвое меньше систематической, нет смысла производить многократные измерения, так как полная погрешность опыта при этом практически не уменьшается. Измерения достаточно произвести 2÷3 раза, чтобы убедиться, что случайная ошибка действительно мала.

IV.3.3. Обработка результатов при косвенных измерениях

Если исследуемая величина равна сумме или разности двух измеренных величин,

$$A = B \pm C, \quad (IV.14)$$

то наилучшее значение величины A равно сумме (или разности) наилучших значений слагаемых: $A_{\text{наил}} = B_{\text{наил}} + C_{\text{наил}}$, или, как рекомендовано выше,

$$A_{\text{наил}} = \langle B \rangle \pm \langle C \rangle. \quad (IV.15)$$

Здесь и в дальнейшем угловые скобки (или черта сверху) означают усреднение: вместо того, чтобы писать $A_{\text{ср}}$, будем пользоваться обозначением $\langle A \rangle$ (или \bar{A}), и т. д.

Среднеквадратичная погрешность σ_A , если величины B и C независимы, находится по формуле

$$\sigma_A = \sqrt{\sigma_B^2 + \sigma_C^2}, \quad (IV.16)$$

т. е. погрешности, как всегда, складываются квадратично. (Иначе говоря, складываются не погрешности, а дисперсии результатов измерений.) При обсуждении формулы (IV.16) следует использовать те же аргументы, которые были приведены в связи с формулой (IV.13).

В том случае, если искомая величина равна произведению или частному двух других,

$$A = B \cdot C \text{ или } A = B/C, \quad (IV.17)$$

то

$$A_{\text{наил}} = \langle B \rangle \cdot \langle C \rangle \text{ или } A_{\text{наил}} = \frac{\langle B \rangle}{\langle C \rangle}. \quad (IV.18)$$

Относительная среднеквадратичная погрешность произведения и частного независимых величин находится по формуле

$$\frac{\sigma_A}{A} = \sqrt{\left(\frac{\sigma_B}{B}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_C}{C}\right)^2}. \quad (IV.19)$$

Приведем расчетные формулы для случая, когда

$$A = B^\beta \cdot C^\gamma \cdot E^\varepsilon \cdot \dots \quad (IV.20)$$

Наилучшее значение A связано с наилучшими значениями B , C , E и т. д. той же формулой (IV.11), что и каждое конкретное значение. Относительная среднеквадратичная погрешность величины A при независимых B , C , E ... находится по формуле

$$\left(\frac{\sigma_A}{A}\right)^2 = \beta^2 \left(\frac{\sigma_B}{B}\right)^2 + \gamma^2 \left(\frac{\sigma_C}{C}\right)^2 + \varepsilon^2 \left(\frac{\sigma_E}{E}\right)^2 + \dots \quad (IV.21)$$

Наконец, приведем для справок общую расчетную формулу. Пусть

$$A = f(B, C, E, \dots), \quad (IV.22)$$

где f - произвольная функция величин B , C , E и т. д. Тогда

$$A_{\text{наил}} = f(B_{\text{наил}}, C_{\text{наил}}, E_{\text{наил}}, \dots) \quad (IV.23)$$

Формула (IV.10) справедлива как в том случае, когда $B_{\text{наил}}$, $C_{\text{наил}}$, и т.д. непосредственно измерены, так и в том случае, если они найдены по измеренным значениям других величин. В первом случае значения $B_{\text{наил}}$, $C_{\text{наил}}$, и т.д., как уже указывалось, равны $\langle B \rangle$, $\langle C \rangle$ и т. д. Погрешность A находится по формуле

$$\sigma_A^2 = \left(\frac{df}{dB}\right)^2 \cdot \sigma_B^2 + \left(\frac{df}{dC}\right)^2 \cdot \sigma_C^2 + \left(\frac{df}{dE}\right)^2 \cdot \sigma_E^2 + \dots \quad (IV.24)$$

Частные производные следует вычислять при наилучших значениях аргументов. Все приведенные в этом параграфе формулы являются частными случаями (IV.21) и (IV.24).

Рассмотрим некоторые следствия, которые могут быть получены из анализа формул, приведенных в этом разделе. Прежде всего, заметим, что *следует избегать измерений, при которых искомая величина находится как разность двух больших чисел.* Так, толщину стенки трубы не следует

определять, вычитая ее внутренний диаметр из внешнего диаметра и конечно деля результат пополам. Относительная погрешность измерения, которая обычно представляет главный интерес, при этом сильно увеличивается, так как измеряемая величина – в нашем случае толщина стенки – мала, а ошибка в ее определении находится путем сложения погрешностей измерения обоих диаметров и поэтому возрастает.

Следует также помнить, что погрешность измерения, которая составляет, например, 0.5% от величины внешнего диаметра, может составить 5% и более от толщины стенки.

При измерениях, которые затем обрабатываются по формуле (IV.15) (например, при определении плотности тела по его массе и объему), следует определять все измеряемые величины с приблизительно одинаковой относительной точностью. Так, если объем тела измерен с погрешностью 1%, то при взвешивании с погрешностью 0.5% его плотность определяется с точностью 1.1%, а при взвешивании с погрешностью 0.01% – с точностью 1%, т. е. с той же, практически, точностью. Тратить силы и время на измерение массы тела с точностью 0.01% в этом случае, очевидно, не имеет смысла.

При измерениях, которые обрабатываются по формуле (IV.21), следует обращать главное внимание на точность измерения величины, входящей в расчетную формулу с наибольшим показателем степени.

Прежде чем приступить к измерениям, всегда нужно подумать о последующих расчетах и выписать формулы, по которым будут рассчитываться погрешности. Эти формулы позволят понять, какие измерения следует производить особенно тщательно, а на какие не нужно тратить больших усилий.

IV.3.4. Запись результатов. Точность расчетов

Результат измерения записывается в виде, определяемом формулой (18). Запись $m = 0.876 \pm 0.008g$ означает, что в результате измерений для

массы тела найдено значение 0.876г со стандартной погрешностью 0.008г . Подразумевается, что при вычислении стандартной погрешности учтены как случайные, так и систематические ошибки.

При записи погрешности следует округлять ее величину до двух значащих цифр, если первая из них является единицей, и до одной значащей цифры во всех остальных случаях. Так, правильно писать ± 3 ; ± 0.2 ; ± 0.08 ; ± 0.14 и не следует писать ± 3.2 ; ± 0.23 ; ± 0.084 . Не следует также округлять ± 0.14 до ± 0.1 .

Поясним это правило. Уже говорилось, что погрешность эксперимента редко удается определить с точностью лучше 20%. Если вычисление стандартной ошибки приводит к 0.14, то округление 0.14 до 0.1 изменяет величину погрешности на целых 40%, в то время как округление до 0.3 числа 0.26 или 0.34 изменяет погрешность менее чем на 15%, т.е. несущественно.

При записи измеренного значения *последней должна указываться цифра того десятичного разряда, который использован при указании погрешности.* Один и тот же результат с указанием погрешности запишется в виде: 1.2 ± 0.2 ; 1.24 ± 0.03 ; 1.243 ± 0.012 и т.д. Последняя из, указанных, цифр или даже две из них, в этом примере, является сомнительной, а остальные достоверными.

Сформулированное правило следует применять и в тех случаях, когда некоторые из цифр являются нулями. Если при измерении получен результат $m = 0.900 + 0.004\text{г}$, то писать нули в конце числа 0.900 необходимо. Запись $m = 0.9$ означала бы, что о следующих значащих цифрах ничего не известно, в то время как измерения показали, что они равны нулю. Аналогичным образом, если масса тела равна 58.3кг (с погрешностью в десятых долях килограмма), то не следует писать, что она равна $58\ 300\text{г}$, так как эта запись означала бы, что тело взвешено с точностью несколько граммов. Если результат взвешивания должен быть выражен в граммах, то в нашем случае нужно писать $5.83 \cdot 10^4\text{г}$.

Необходимая точность расчетов определяется тем, что расчет не должен вносить в измерения дополнительной погрешности. Обычно в промежуточных расчетах сохраняется один лишний знак, который в дальнейшем при записи окончательного результата будет отброшен.

IV.3.5. Изображение экспериментальных результатов на графиках

Результаты экспериментов обычно представляют не только в виде таблиц, но и в графической форме. Для графиков следует использовать специальную бумагу (миллиметровую, логарифмическую или полулогарифмическую). При их отсутствии иногда приходится (хотя это крайне нежелательно!) пользоваться бумагой «в клеточку» или белой бумагой, на которой карандашом нанесена сетка. Не следует выбирать слишком малый или слишком большой лист бумаги. Удобна бумага размером в обычный тетрадный лист (или в развернутый лист). Полезно пользоваться листами миллиметровки из блокнотов (или планшетов) для диаграмм.

При построении графиков следует разумно выбирать масштабы, чтобы измеренные точки располагались на всей площади листа. Масштаб должен быть удобным. Клеточка графика (или миллиметр миллиметровой бумаги) может соответствовать 0,1; 0,2; 0,5; 1; 2; 5; 10 и т. д. единицам измеряемой величины, но не 2,5; 3; 4; 7 и т. д. При неудобном масштабе нанесение экспериментальных точек на график и использование графика требуют неоправданно большого времени и нередко сопровождаются досадными ошибками.

Графическое представление результатов позволяет быстро понять характерные черты наблюдаемой зависимости и обнаружить ошибочные результаты. *При рассмотрении графика можно увидеть, что какая либо точка выпадает из закономерности.* Это может означать, что при ее измерении была допущена ошибка. Если это не так, то в районе этой точки искомая зависимость имеет резко выраженную особенность. Именно такие

особенности и представляют наибольший интерес для экспериментатора. Поэтому нужно внимательно промерить область, расположенную вблизи выпавшей точки, и постараться детально изучить форму кривой в районе найденной особенности.

Точки, наносимые на графики, должны изображаться четко и ясно. Их следует отмечать карандашом, так как иначе ошибочно нанесенную точку нельзя удалить с графика, не испортив его. Никаких линий и отметок, поясняющих построение точек, на график наносить нельзя, так как они загромождают рисунок и мешают анализировать результаты.

Точки, полученные в разных условиях (при нагревании и при охлаждении, при увеличении и при уменьшении нагрузки, в разные дни и т. д.), полезно наносить разными цветами или разными значками. Это помогает увидеть новые явления.

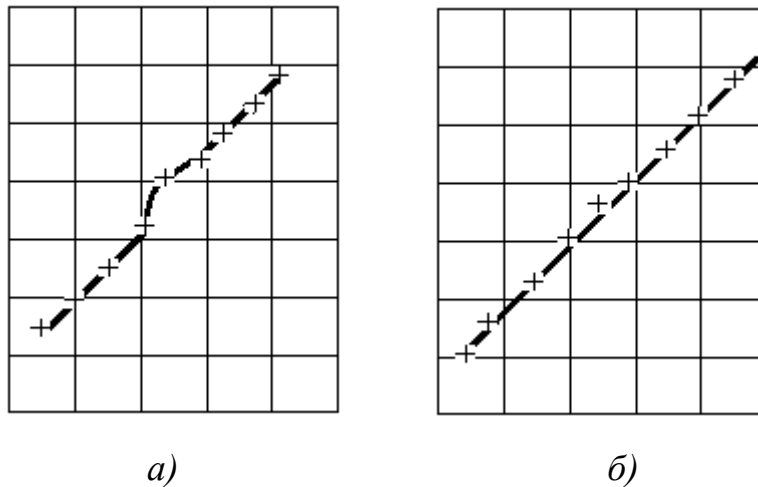


Рис. 38. Пример графического изображения экспериментальных результатов

Способ изображения на графике экспериментальных результатов зависит от того, известна ли их случайная погрешность. Если случайная погрешность неизвестна (что чаще всего и бывает), то результаты изображаются точками, а если известна, то лучше изображать их не точками, а крестами (рис. 38). Полуразмер креста по горизонтали должен быть равен стандартной погрешности по оси абсцисс, а его вертикальный полуразмер – погрешности по оси ординат. В том случае, если одна из

ошибок – из-за своей малости – не может быть изображена графически, результаты изображаются черточками, вытянутыми на величину $\pm\sigma$ в том направлении, где погрешность не мала. Важность такого способа изображения результатов ясна из рисунков, на которых изображены одни и те же экспериментальные точки при разных погрешностях измерений.

График (*рис. 38,а*) несомненно, указывает на нерегулярный ход изучаемой зависимости. Эта зависимость изображена на рисунке кривой линией.

Те же данные при больших ошибках опыта (*рис. 38,б*) с успехом описываются прямой линией, так как только одно измерение отступает от этой кривой больше, чем на стандартную ошибку (и меньше, чем на две такие ошибки).

То обстоятельство, что при ошибках на (*рис. 38,а*) данные требуют проведения кривой, а на (*рис. 38,б*) этого не требуют, проясняется лишь при изображении экспериментальных результатов в виде *креста погрешностей*.

Из сказанного отнюдь не следует, что, изображая результаты опытов не крестами погрешностей, а простыми точками, мы всегда совершаем ошибку. Если величины погрешностей уже ясны при построении графика, следует, конечно, их изображать. Чаще всего, однако, эти погрешности к моменту построения графика неизвестны, и их разумно определять из разброса точек на графике. В этих случаях экспериментальные данные естественно изображать простыми точками.

Заметим также, что кривые на графиках не всегда проводятся через экспериментальные точки. Нередко кривые изображают зависимость, полученную не из эксперимента, а из теоретических соображений (или из других опытов). При построении таких кривых возникает необходимость предварительно нанести на график ряд расчетных точек. Эти точки должны наноситься еле заметным образом, чтобы их нельзя было спутать с четкими точками (или крестами), изображающими экспериментальные данные. Лучше всего, чтобы расчетные точки вообще не были заметны.

Оси графика должны иметь ясные, четкие обозначения. Рядом с делениями, на удобных расстояниях, должны быть нанесены цифры, позволяющие установить значения, соответствующие делениям шкалы. Цифры принято располагать по краям сетки. На графиках должно быть указано, какая физическая величина и в каком масштабе на ней отложена.

IV.3.6. Проведение кривых через экспериментальные точки

Через экспериментальные точки всегда следует проводить самую простую кривую, совместимую с этими точками, т.е. кривую, от которой экспериментальные данные отступают, как правило (в 2/3 случаев), не более чем на стандартную ошибку. Примеры таких кривых и изображены на *рис. 38*. Не следует придавать кривым никаких изгибов, если экспериментальным данным, в пределах ошибок, можно удовлетворить и без этого.

При проведении кривой нужно следить за тем, чтобы на каждом достаточно большом ее участке экспериментальные точки располагались как выше, так и ниже кривой. Так, на *рис. 38* оба графика, строго говоря, изображены верно, т.к. ни одна из точек этих графиков не лежит выше кривой.

Математическое правило проведения кривых заключается в следующем. После того как тип кривой (прямая, окружность, парабола, и т.д.) из тех или иных соображений (чаще всего теоретических) выбран, параметры кривой должны быть подобраны так, чтобы сумма квадратов отклонения от нее всех экспериментальных точек была наименьшей (*правило «наименьших квадратов»*). Пользоваться этим правилом при графическом изображении экспериментальных зависимостей затруднительно, но при некотором опыте графические изображения данных измерений оказываются практически оптимальными.

При графической обработке результатов следует помнить, что на глаз точно провести через экспериментальные точки можно только прямую линию. Поэтому *при построении графика следует стремиться к тому,*

чтобы ожидаемая зависимость имела вид прямой линии.

Так, исследуя закон падения тел, мы вправе ожидать, что результаты будут описываться законом $S = gt^2/2$. Если откладывать по осям графика S и t , то точки лягут на параболу, которую провести на глаз почти невозможно. Но если откладывать по осям S и t^2 , или S и $gt^2/2$, то график приобретет вид прямой линии. Одно из этих представлений и должно быть выбрано для построения графика.

Производя измерения, всегда следует заботиться о том, чтобы точки на графике, который потом будет построен, располагались достаточно равномерно. В нашем примере, решив, например, строить график в переменных S и t^2 , следует выбирать время измерений так, чтобы точки лежали на равных расстояниях в шкале t^2 , а не t . Выбор равных интервалов времени (0,5; 1; 1,5; 2 с. и т.д.) приведет к тому, что в правой части графика точки будут лежать редко, а в левой части – слишком близко друг к другу.

К логарифмическому масштабу без особой необходимости прибегать не следует.

Одна из наиболее часто встречающихся погрешностей опыта – смещение нуля отсчета – приводит к сильному искажению прямолинейного характера кривой. В самом деле, пусть из-за смещения линейки вместо длин S на опыте будет найдено $S_t = S + a$ где, a – постоянная для всех точек ошибка. Формула, связывающая измеренную длину и время, в этом случае будет иметь вид $S_t = (gt^2/2) + a$. В координатах S и t^2 эта зависимость изображается прямой линией, которая на этот раз не проходит через начало координат. По смещению прямой мы легко заметим ошибку и даже найдем ее величину. А в переменных lgS и lgt кривая теряет прямолинейный вид, и будет нелегко сообразить, где же вкралась ошибка.

Бывают, однако, случаи, когда логарифмический масштаб необходим. Это происходит, например, если исследуемая величина очень сильно изменяется, причем одновременно интересны очень малые и очень большие

ее значения. Логарифмический масштаб позволяет все точки уместить на одном чертеже и исследовать совместно. Логарифмический масштаб выбирают и в том случае, если имеются основания ожидать, что искомая зависимость является степенной, но показатель степени неизвестен.

IV.3.7. Определение искомых параметров по результатам измерений

Очень часто цель экспериментов заключается в том, чтобы из опыта найти неизвестный параметр в известной формуле.

Так, на Земле падение тел описывается формулой $S = gt^2/2$, но величина g меняется от одного участка земной поверхности к другому и подлежит экспериментальному определению.

Радиоактивный распад подчиняется формуле

$$N = N_0 e^{-\lambda t}, \quad (IV.25)$$

где N – количество атомов вещества в момент t , N_0 – начальное число атомов, а λ – постоянная распада. Закон распада имеет один и тот же вид для всех ядер, но постоянная λ у каждого из них своя и определяется экспериментально.

Растяжение тел описывается формулой

$$\frac{\Delta L}{L} = \frac{1}{E} \frac{F}{S}, \quad (IV.26)$$

где L – длина образца, ΔL – его удлинение под действием силы F , S – площадь образца, E – константа (модуль упругости). Написанная формула – при небольших силах – описывает растяжение всех твердых тел, но величина модуля упругости зависит от материала, его обработки и т.д. Эта величина находится экспериментально. Пусть опыт состоит в определении модуля упругости. Экспериментатор измеряет L и S и записывает формулу в виде

$$F = \frac{S}{L} E \cdot \Delta L. \quad (IV.27)$$

Затем тело растягивают и составляют таблицу зависимости удлинения от приложенной силы. Каждое из полученных значений, заносится в таблицу

и определяет свое значение E . Эти значения, из-за погрешностей опыта, несколько отличаются друг от друга. Нередко при обработке результатов, найденные таким образом значения модуля упругости усредняют. Это плохой и математически некорректный метод.

Поясним наше утверждение. На *рис. 39* точками изображены результаты 11 опытов (разброс точек для наглядности увеличен). Первое из равенств соответствует прямой, проведенной из начала координат через точку 1. В самом деле, из этого равенства имеем

$$E = \frac{L}{S} \frac{F_1}{\Delta L_1}. \quad (IV.28)$$

С точностью до постоянного для всех точек коэффициента пропорциональности L/S значение модуля упругости E равно котангенсу угла, образованного осью абсцисс и прямой линией, проведенной из начала координат в эту точку. Второе из равенств соответствует прямой линии, проведенной через точку 2, и т.д. Усреднение величин E , полученных во всех опытах, означает усреднение котангенсов указанных углов.

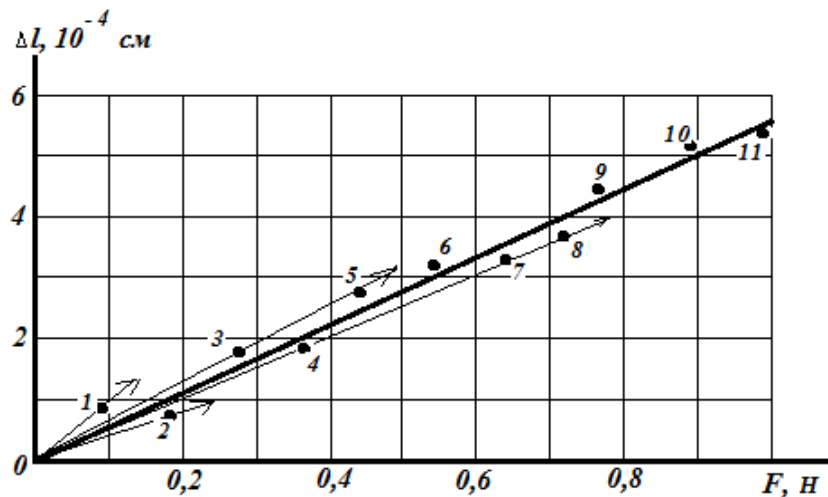


Рис. 39. Результаты опытов по определению модуля упругости

Рисунок показывает, однако, что усредняемые величины определяются из опыта с разной достоверностью. Точка 8 находится на расстоянии от наилучшей прямой (которая проведена жирной линией) не ближе, чем точка 3, но погрешность в определении угла для неё в несколько раз меньше.

Обсуждаемый способ определения E заключается, таким образом, в том, чтобы взять среднее из хороших и плохих результатов. Такая процедура, конечно, математически некорректна.

Иногда пытаются найти E из прироста длины и силы на каждом шаге растяжения:

$$F_2 - F_1 = \frac{S}{L} E(\Delta L_2 - \Delta L_1), \quad F_3 - F_2 = \frac{S}{L} E(\Delta L_3 - \Delta L_2), \quad \text{и т. д.} \quad (IV.29)$$

При этом возникает много вычислительной работы и получается новый ряд значений E , которые также чаще всего усредняют. И этот способ неправилен. Пусть, для примера, опыт ставится в условиях, когда все приращения длины равны друг другу. Тогда

$$E_1 = \frac{L}{S} \frac{1}{\Delta L} (F_2 - F_1), \quad E_2 = \frac{L}{S} \frac{1}{\Delta L} (F_3 - F_2), \quad \text{и т. д.} \quad (IV.30)$$

При усреднении получим

$$E_{cp} = \frac{1}{n-1} (E_1 + E_2 + \dots + E_{n-1}) = \frac{L}{(n-1)S\Delta L} (F_n - F_1). \quad (IV.31)$$

Таким образом, все найденные на опыте значения силы при усреднении сокращаются, и результат зависит только от первого и последнего опытов. Значит, при такой обработке мы на самом деле не усреднили результаты, полученные в разных опытах, а просто исключили из рассмотрения почти все полученные на опыте данные. Ясно, что такой метод нельзя признать разумным.

Математическая причина ошибок очевидна: разумно усреднять результаты только в том случае, если они являются *равноточными и независимыми*. В первом примере результаты обладали различной точностью, а во втором они не являются независимыми: одно и то же значение силы входит в два соседних равенства. Число примеров при желании можно было бы существенно увеличить.

Наиболее правильным и удобным методом обработки результатов является графический метод. Изобразим удлинения и силы на графике, как это и было сделано на рисунке. То есть, на этом рисунке проведена

«наилучшая прямая», удовлетворяющая всем требованиям, которые обсуждались ранее. Наклон этой прямой соответствует изменению длины $5,7 \cdot 10^{-4}$ см. при увеличении силы на $1Н$. Эта цифра может быть прямо подставлена в формулу для вычисления модуля упругости.

При рекомендуемом методе графической обработки результатов – при проведении прямой на глаз – учитываются все точки графика. При этом точки, лежащие по его краям, оказываются более существенными, как это и должно быть. Математически этот способ эквивалентен методу «наименьших квадратов». *Особым преимуществом графического метода является его простота.*

Ещё одно замечание о построении таких графиков. Часто случается, что начальная точка искомой зависимости хорошо известна и лежит в начале координат.

Как бы ни была сложна зависимость тока, проходящего через проводник, от приложенного к нему напряжения, можно быть уверенным, что при отсутствии напряжения нет и тока (мы предполагаем, что в цепи не возникает *термо-э.д.с.*, при отсутствии силы – нет удлинения, если тело не нагревать и не охлаждать, то изменение его температуры равно нулю, и т.д.).

Во всех этих случаях нулевая точка не просто известна, она является самой надежной из всех, которые используются при обработке результатов, а задача, проведения наилучшей прямой, сводится в этом случае к подбору параметра в формуле $y=kx$. В общем случае нужно найти параметры a и b в формуле $y=a+bx$.

Приведем правила для определения погрешностей, которые следует приписывать графически найденным параметрам прямой линии.

Пусть график прямой линии описывается формулой $y=a+bx$. Тогда, чтобы найти погрешность в определении параметра a нужно смещать прямую, параллельно самой себе, вниз, пока выше нее не окажется вдвое больше точек, чем снизу, затем следует сместить ее вверх, пока снизу не

окажется вдвое больше точек, чем сверху. Если расстояние между этими прямыми равно Δa , то погрешность, определения a , равна $\sigma_a = \Delta a / \sqrt{n}$, где n – полное число точек на графике. Погрешность в определении параметра b находится аналогичным образом.

ГЛАВА V

ОБЩАЯ СХЕМА ОРГАНИЗАЦИИ И МЕТОДОЛОГИЯ НАУЧНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ

Введение

Все измеряемые физические величины (ФВ) можно разделить на две группы:

- непосредственно измеряемые, которые могут быть воспроизведены с заданными размерами и сравнимы с подобными, например длина, масса, время;

- преобразуемые с заданной точностью в непосредственно измеряемые величины, например температура, плотность. Такое преобразование осуществляется с помощью операции измерительного преобразования [20].

В основе измерений лежит сравнение с эталоном – прямое или косвенное. Таким образом, сущность любого измерения состоит в сравнении размера некоторой физической величины Q с размерами выходной регулируемой многозначной меры данной физической величины $q[Q]$.

Условием реализации любой процедуры измерения является выполнение следующих элементарных операций:

- измерительного преобразования измеряемой ФВ X в другую ФВ Q , однородную или неоднородную с ней $Q=F(X)$, если нет возможности прямого сравнения с эталоном;

- воспроизведения ФВ Q заданного размера $N[Q]$, однородной с преобразованной величиной Q ;

- сравнения однородных физических величин: преобразованной с помощью оператора F величины X , то есть $Q=F(X)$ с воспроизводимой мерой $Q_M = N[Q]$.

Структурная схема измерения показана на *рис. 40*. Для получения результата измерения необходимо обеспечить выполнение при $N=q$ условия:

$$\Delta = \min[F(X) - N(Q)], \quad (V.1)$$

т.е. погрешность сравнения величин Q и Q_M должна быть минимизирована.

Результат измерений находится как $X = F^{-1}\{N[Q]\}$, где F^{-1} - операция, обратная операции F , осуществляемой при измерительном преобразовании.

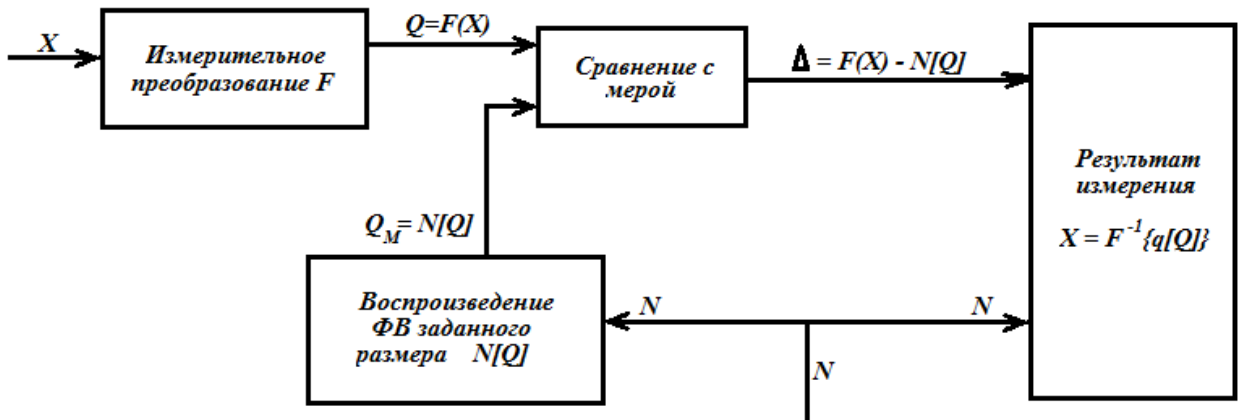


Рис. 40. Структурная схема измерений

Следует иметь в виду, что измерительное преобразование - операция, при которой устанавливается взаимно однозначное соответствие между размерами, в общем случае неоднородных, преобразуемой и преобразованной ФВ. Измерительное преобразование описывается уравнением вида $Q = F(X)$, где F - некоторая функция, или оператор преобразования (см. *рис. 40*). Преобразование чаще всего стремятся сделать линейным: $Q = KX$, где K - постоянная величина. Основное назначение измерительного преобразования - получение и, если это необходимо, преобразование информации об измеряемой величине. В измерительное преобразование в общем случае могут входить следующие операции: изменение физического рода преобразуемой величины; масштабное линейное преобразование; масштабное-временное преобразование;

нелинейное или функциональное преобразование; модуляция сигнала; дискретизация непрерывного сигнала; квантование. Операция измерительного преобразования осуществляется посредством измерительного преобразователя - технического устройства, построенного на определенном физическом принципе и выполняющего одно частное измерительное преобразование.

Воспроизведение физической величины заданного размера Q_M - это операция, которая заключается в создании требуемой ФВ, с заданным значением, известным с оговоренной точностью. Операцию воспроизведения величины определенного размера можно формально представить как преобразование кода X в заданную физическую величину Q , основанное на единице данной ФВ $[Q]$: $Q_M = N[Q]$ (см. рис. 40). Степень совершенства операции воспроизведения ФВ заданного размера определяется постоянством размера каждой ступени квантования меры $[Q]$ и степенью многозначности, т.е. числом N воспроизводимых известных значений. С наиболее высокой точностью воспроизводятся основные ФВ: длина, масса, время, частота, напряжение и ток.

Средство измерений, предназначенное для воспроизведения ФВ заданного размера, называется мерой. Сравнение измеряемой ФВ с величиной, воспроизводимой мерой Q_M - это операция, заключающаяся в установлении отношения этих двух величин. Точное совпадение сравниваемых величин, как правило, не встречается в практике измерений. Это обусловлено тем, что величина, воспроизводимая мерой, является квантованной и может принимать значения, кратные единице $[Q]$.

В результате сравнения близких или одинаковых величин Q и Q_M может быть лишь установлена погрешность измерений Δ .

Методом сравнения называется совокупность приемов использования физических явлений и процессов для определения соотношения однородных величин. Наиболее часто это соотношение устанавливается по знаку разности сравниваемых величин. Далеко не каждую ФВ можно сравнить при этом с

себе подобной.

Все ФВ в зависимости от возможности создания разностного сигнала делятся на три группы:

- К первой группе относятся ФВ, которые можно вычитать и таким образом непосредственно сравнивать без предварительного преобразования. Это - электрические, магнитные и механические величины.

- Ко второй группе относятся ФВ, неудобные для вычитания, но удобные для коммутации, а именно: световые потоки, ионизирующие излучения, потоки жидкости и газа.

- Третью группу образуют ФВ, характеризующие состояние объектов или их свойств, которые физически невозможно вычитать. К таким ФВ относятся влажность, концентрация веществ, цвет, запах и др.

Параметры сигналов первой группы наиболее удобны для сравнения, второй - менее удобны, а сигналы третьей группы непосредственно сравнивать невозможно. Однако последние необходимо сравнивать и измерять, поэтому их приходится преобразовывать в другие величины, поддающиеся сравнению.

§ V.1. Оформление результатов НИР и ОКР

Весь ход научного исследования можно представить в виде следующей логической схемы:

1. Обоснование актуальности выбранной темы.
2. Постановка цели и конкретных задач исследования.
3. Определение объекта и предмета исследования.
4. Выбор методов (методики) проведения исследования.
5. Описание процесса исследования.
6. Обсуждение результатов исследования.
7. Формулирование выводов и оценка полученных результатов.

Обоснование актуальности выбранной темы — начальный этап любого исследования. В применении к любой НИР и ОКР понятие "актуальность" имеет одну особенность. Раскрытие актуальности характеризует степень научной зрелости и профессиональной подготовленности исследователя.

Освещение актуальности должно быть не многословным. Достаточно в пределах одной машинописной страницы показать главное — суть проблемной ситуации, из чего и будет видна актуальность темы. Поэтому имеет смысл остановиться на понятии "проблема" более подробно.

Любое научное исследование проводится для того, чтобы преодолеть определенные трудности в процессе познания новых явлений, объяснить ранее неизвестные факты или выявить неполноту старых способов объяснения известных фактов. Эти трудности в наиболее отчетливой форме проявляют себя в так называемых проблемных ситуациях, когда существующее научное знание оказывается недостаточным для решения новых задач познания.

Проблема всегда возникает тогда, когда старое знание уже обнаружило свою несостоятельность, а новое знание еще не приняло развитой формы. Таким образом, проблема в науке — это противоречивая ситуация, требующая своего разрешения. Такая ситуация чаще всего возникает в результате открытия новых фактов, которые явно не укладываются в рамки прежних теоретических представлений, т.е. когда ни одна из теорий не может объяснить вновь обнаруженные факты.

Правильная постановка и ясная формулировка новых проблем нередко имеет не меньшее значение, чем решение их самих. По существу, именно выбор проблем, если не целиком, то в очень большой степени определяет стратегию исследования вообще и направление научного поиска в особенности. Не случайно принято считать, что сформулировать научную проблему — значит показать умение отделить главное от второстепенного, выяснить то, что уже известно и что пока неизвестно науке о предмете исследования.

Таким образом, *если исследователю удастся показать, где проходит граница между знанием и незнанием о предмете исследования, то ему бывает нетрудно четко и однозначно определить научную проблему, а следовательно, и сформулировать ее суть.*

Отдельные исследования ставят целью развитие уже известных положений. Темы таких исследований могут быть достаточно узкими, что отнюдь не умаляет их актуальности. Цель подобных работ состоит в решении частных вопросов в рамках той или иной уже достаточно апробированной концепции. Таким образом, актуальность таких исследований в целом следует оценивать с точки зрения той концептуальной установки, которую развивает сам исследователь, или того научного вклада, который он вносит в разработку общей концепции.

Между тем, исследователи часто предпочитают избегать узких темы. Это неправильно. Дело в том, что работы, посвященные широким темам, часто бывают исключительно трудоемкими, неподъемными, и в итоге могут дать поверхностный результат. Узкая же тема прорабатывается более глубоко и детально. Вначале кажется, что она настолько узка, что и писать не о чем. Но по мере ознакомления с материалом это опасение исчезает, исследователю могут открыться такие стороны проблемы, о которых он раньше и не подозревал.

Актуальные научные решения, лежащие в основе исследования, могут рассматриваться как заявки на изобретения и открытия, если они отличаются новизной и дают положительный эффект.

От доказательства актуальности выбранной темы необходимо перейти к формулировке цели предпринимаемого исследования, а также указать на конкретные задачи, которые предстоит решать в соответствии с этой целью. Это обычно делается в форме перечисления (изучить..., описать..., установить..., выяснить..., вывести формулу и т.п.). Формулировки этих задач необходимо делать как можно более тщательно, поскольку описание их решения и должно составить содержание научного исследования.

Далее формулируются объект и предмет исследования.

Объект — это процесс или явление, порождающее проблемную ситуацию и избранное для изучения.

Предмет — это то, что находится в границах объекта.

Объект и предмет исследования как категории научного процесса соотносятся между собой как общее и частное. В объекте выделяется та его часть, которая служит предметом исследования. Именно на него и направлено основное внимание исследователя, именно предмет исследования определяет тему той работы, которая обозначается на титульном листе письменного отчёта по теме как её заглавие.

Очень важным этапом научного исследования является выбор методов исследования, которые служат инструментом в добывании фактического материала, являясь необходимым условием достижения поставленной в такой работе цели.

Описание процесса исследования — основная часть отчёта, в которой освещаются методика и техника исследования с использованием логических законов и правил.

Важным этапом хода научного исследования является обсуждение его результатов, которое ведётся на семинарах, конференциях и т.д., где дается предварительная оценка теоретической и практической ценности проделанной работы.

Заключительным этапом хода научного исследования являются выводы, которые содержат то новое и существенное, что составляет научные и практические результаты проделанной работы.

§ V.2. Структура НИР и ОКР

Любая выполняемая *НИР* и *ОКР*, как правило, является серьёзным высококвалифицированным трудом, поэтому результаты труда оценивают как по научной ценности, актуальности исследований и их прикладному

значению, но и по качеству методологического и методического обеспечения исследований, что должно быть отражено в композиции и структуре научно-технического отчёта[21].

Разумеется, нет, и не может быть, никакого стандарта по выбору и качеству методологического и методического обеспечения научных исследований и составления научно-технического отчёта. Каждый исследователь волен избирать любой строй и порядок организации научных материалов, чтобы получить внешнее расположение их и внутреннюю логическую связь в таком виде, какой он считает лучшим, наиболее убедительным для раскрытия своего творческого замысла. Однако, традиционно сложилась определенная структура отчётов по НИР и ОКР, основными элементами которой в порядке их расположения являются следующие:

- Титульный лист
- Оглавление
- Введение
- Главы основной части НИР или ОКР
- Заключение
- Библиографический список
- Приложения
- Вспомогательные указатели и данные (по мере необходимости)

Титульный лист является первой страницей любого отчёта и заполняется по строго определенным правилам:

В верхнем поле указывается полное наименование научной организации или предприятия. Верхнее поле с указанным текстом отделяется от остальной площади титульного листа сплошной чертой.

Далее указывается фамилия, имя и отчество (в именительном падеже) ответственного исполнителя НИР или ОКР.

В среднем поле дается заглавие работы (тема), которое проводится без слова "тема" и в кавычки не заключается. Заглавие должно быть по возможности кратким, точным и соответствовать основному содержанию НИР и ОКР. Краткие и точные названия научных работ косвенно свидетельствуют о том, что исследование проведено с исчерпывающей полнотой. В НИР по узким темам заглавие может быть более конкретным, а потому и более многословным. Не следует в заглавии допускать неопределенных формулировок, например: "Анализ некоторых вопросов...", а также штампованных формулировок типа: "К вопросу о...", "К изучению...", "Материалы к...". Если есть необходимость конкретизировать тему работы, можно дать подзаголовок, который должен быть предельно кратким и не превращаться в новое заглавие.

После заглавия помещается шифр из номенклатуры направлений исследований по которому представляется отчет.

Далее ближе к правому краю титульного листа указывается фамилия и инициалы научного руководителя, а также его ученое звание и ученая степень.

В нижнем поле указывается место выполнения НИР или ОКР и год ее написания (без слова "год").

Образец оформления титульного листа приведен в Приложении 1.

После титульного листа помещается оглавление (см. Приложение 2), в котором приводятся все заголовки работы (кроме подзаголовков, даваемых в подбор с текстом) и указываются страницы, с которых они начинаются. Заголовки оглавления должны точно повторять заголовки в тексте. Сокращать или давать их в другой формулировке, последовательности и соподчиненности по сравнению с заголовками в тексте нельзя.

§ V.3. Требования к содержанию глав и разделов НИР и ОКР

Введение. Здесь обычно обосновывается актуальность выбранной темы, цель и содержание поставленных задач. Формулируется объект, предмет и метод исследования, сообщается, в чем заключается теоретическая значимость и прикладная ценность полученных результатов, а также отмечаются положения, составляющие суть НИР и ОКР.

Таким образом, *введение* – очень ответственная часть НИР и ОКР, поскольку оно не только ориентирует читателя в дальнейшем раскрытии темы, но и содержит все необходимые его квалификационные характеристики. Поэтому основные части введения необходимо рассмотреть более подробно.

Актуальность — обязательное требование к научной работе, поэтому вполне понятно, что введение должно начинаться с обоснования актуальности выбранной темы. В применении к НИР и ОКР понятие "актуальность" имеет одну особенность. Поскольку, как НИР, так и ОКР, является научным исследованием, то ее исполнитель должен уметь выбрать тему исследования, раскрыть правильность понимания темы и оценить её с точки зрения своевременности и социальной значимости.

Освещение актуальности должно быть немногословным. Начинать ее описание издалека нет особой необходимости. Достаточно в пределах 1—2 страниц машинописного текста показать главное — необходимость и важность проведения выбранной НИР и ОКР по указанной теме исследования. При раскрытии актуальности необходимо показать, где проходит граница между знанием и незнанием о предмете исследования, четко и однозначно определить научную проблему и сформулировать ее суть.

От формулировки актуальности научной проблемы и доказательства того, что та часть этой проблемы, которая является темой данного

исследования, еще не получила своей разработки и освещения в специальной литературе, логично перейти к формулировке (цели предпринимаемого исследования, а также указать на конкретные задачи, которые предстоит решать в соответствии с этой целью. Это обычно делается в форме перечисления (изучить..., описать..., установить..., выявить..., вывести формулу...).

Формулировки этих задач необходимо делать как можно более тщательно, поскольку описание их решения должно составить содержание глав в структуре НИР или ОКР. Это важно также и потому, что заголовки таких глав рождаются именно из формулировок задач предпринимаемого исследования.

Задачи исследования часто отождествляют с вопросом (т.е. с проблемой, которую нужно разрешить). Считается, что проблема — это тот же вопрос, только наиболее важный и сложный. Это так и не так, поскольку специфической чертой проблемы является то, что для ее решения необходимо выйти за рамки старого, уже достигнутого знания. Что же касается вопроса вообще, то для ответа на него вполне достаточно старого знания, т.е. для науки вопрос проблемой не является. Чтобы сообщить в отчёте о состоянии разработки выбранной темы, особенностей решения задач научного исследования, составляется план, который в итоге должен привести к выводу, что именно данная тема еще не раскрыта (или раскрыта лишь частично или не в том аспекте) и потому нуждается в дальнейшей разработке. Если такой вывод сделать невозможно, то права на разработку выбранной темы нет, поскольку, образно говоря, не имеет смысла изобретать уже изобретенный велосипед.

Объект и предмет исследования

Обязательным элементом введения является формулировка объекта и предмета исследования. Объект - это процесс или явление, порождающее

проблемную ситуацию и избранное для изучения. Предмет - это то, что находится в границах объекта.

Объект и предмет исследования как категории процесса научного познания соотносятся между собой как общее и частное. В объекте выделяется та его часть, которая служит предметом исследования. Именно на него и направлено основное внимание исследователя, именно предмет исследования определяет тему научной работы, которая обозначается на титульном листе как ее заглавие.

Обязательным элементом НИР и ОКР является *указание методов исследования*, которые служат инструментом в добывании фактического материала, являясь необходимым условием достижения поставленной в такой работе цели.

Во введении описываются и другие элементы процесса научного исследования. К ним, в частности, относят указание, на каком конкретном материале выполнена сама работа, дается характеристика основных источников получения информации (специальных, научных, литературных, библиографических), а также указываются методологические основы проведенного исследования.

В конце вводной части желательно раскрыть структуру НИР и ОКР, т.е. дать перечень структурных элементов НИР и ОКР и обосновать последовательность их рассмотрения.

В главах основной части НИР и ОКР подробно рассматривается методика и техника исследования и обобщаются результаты. Все материалы, не являющиеся насущно важными для понимания решения научной задачи, выносятся в приложения.

В *главе 1*, приводится обзор литературы по теме, который должен показать основательное знакомство исследователя со специальной литературой, его умение систематизировать источники, критически их рассматривать, выделять существенное, оценивать ранее сделанное другими

исследователями, определять главное в современном состоянии изученности темы. Материалы такого обзора следует систематизировать в определенной логической связи и последовательности и потому перечень работ и их критический разбор не обязательно давать только в хронологическом порядке их публикации.

Поскольку НИР и ОКР обычно посвящается сравнительно узкой теме, то обзор работ предшественников следует делать только по вопросам выбранной темы, а вовсе не по всей проблеме в целом. В таком обзоре незачем также излагать все, что стало известно из прочитанного, и что имеет лишь косвенное отношение к его работе. Но все сколько-нибудь ценные публикации, имеющие прямое и непосредственное отношение к теме исследования, должны быть названы и критически оценены. Иногда исследователь, не находя в доступной ему литературе необходимых сведений, берет на себя смелость утверждать, что именно ему принадлежит первое слово в описании изучаемого явления, однако позднее это не подтверждается. Разумеется, такие ответственные выводы можно делать только после тщательного и всестороннего изучения литературных источников и консультаций со своим научным руководителем.

Содержание других глав основной части НИР или ОКР должно точно соответствовать теме исследования и полностью её раскрывать. Эти главы должны показать умение исследователя сжато, логично и аргументированно излагать материал, изложение и оформление которого должно соответствовать требованиям, предъявляемым к работам, направляемым в печать.

Любая НИР или ОКР заканчивается частью, которая называется "*заключение*". Эта часть отчета по НИР и ОКР выполняет роль концовки, обусловленной логикой проведения исследования, которая носит форму синтеза накопленной в основной части научной информации. Этот синтез — последовательное, логически стройное изложение полученных итогов и их

соотношение с общей целью и конкретными задачами, поставленными и сформулированными во введении. Именно здесь содержится так называемое "выводное" знание, которое является новым по отношению к исходному знанию. Именно оно выносится на обсуждение и оценку научной общественности в процессе публичной защиты НИР и ОКР.

Это выводное знание не должно подменяться механическим суммированием выводов в конце глав, представляющих краткое резюме, а должно содержать то новое, существенное, что составляет итоговые результаты исследования, которые часто оформляются в виде некоторого количества пронумерованных абзацев. Их последовательность определяется логикой построения исследования. При этом указывается вытекающая из конечных результатов не только его научная новизна и теоретическая значимость, но и практическая ценность.

Однако к оценке практической ценности научных результатов нельзя в полной мере применять те критерии, которыми пользуются при организации и планировании производственных задач. Конечно, эффективность выполнения научной задачи, так же как и производственной, измеряется затратами материальных и людских ресурсов, расходом времени на исполнение и полученной прибылью от применения научных результатов на практике. Но оценка научных результатов более сложна и не всегда укладывается в общепринятые экономические критерии.

В самом деле, при оценке общих и фундаментальных исследований весьма трудно, а порой невозможно, учесть тот практический эффект, который может дать сегодня практическая реализация новых знаний о мире, понимание новых закономерностей явлений. Они могут определяться спустя некоторое время, продолжительность которого заранее не известна. Может случиться и так, что поисковое исследование не решает поставленной задачи, но дает ответы на другие важные вопросы, которые вовсе не ставились в плане данной работы, а были решены попутно. Правильно мнение, что при оценке плановых фундаментальных исследований важно определять,

насколько удалось приблизиться к решению основной задачи и есть ли какая-нибудь возможность решить ее полностью или частично; обоснован ли был выбор методов исследования и последовательность решения плановых задач, в какой мере полученные результаты могут быть использованы на практике.

Иной характер имеет оценка научных работ прикладного значения, так как в самом плане исследования уже определяются конкретные задачи, что трудно сделать при выполнении фундаментальных исследований, особенно поискового плана.

Заключительная часть предполагает также наличие обобщенной итоговой оценки проделанной работы. При этом важно указать, в чем заключается ее главный смысл, какие важные побочные научные результаты получены, какие встают новые научные задачи в связи с проведением исследования. Заключительная часть, составленная по такому плану, дополняет характеристику теоретического уровня научного исследования, а также показывает уровень профессиональной зрелости и научной квалификации исполнителя работ.

В некоторых случаях возникает необходимость указать пути продолжения исследуемой темы, формы и методы ее дальнейшего изучения, а также конкретные задачи, которые будущим исследователям придется решать в первую очередь.

Заключение может включать в себя и практические предложения, что повышает ценность теоретических материалов. Но такие предложения должны обязательно исходить из круга работ, проведенных лично и внедренных на производстве.

Таким образом, подводя итог всему вышесказанному, можно утверждать, что заключительная часть НИР и ОКР представляет собой не простой перечень полученных результатов проведенного исследования, а их итоговый синтез, т.е. формулирование того нового, что внесено его автором в изучение и решение проблемы.

После заключения принято помещать библиографический *список использованной литературы*. Этот список составляет одну из существенных частей НИР или ОКР и отражает самостоятельную творческую работу исследователя.

Каждый включенный в такой список литературный источник должен иметь отражение в отчёте. Если автор делает ссылку на какие-либо заимствованные факты или цитирует работы других авторов, то он должен обязательно указать в подстрочной ссылке, откуда взяты приведенные материалы.

Не следует включать в библиографический список те работы, на которые нет ссылок в тексте диссертации и которые фактически не были использованы. Не рекомендуется включать в этот список энциклопедии, справочники, научно-популярные книги, газеты. Если есть необходимость в использовании таких изданий, то следует привести их в подстрочных ссылках в тексте работы.

Вспомогательные или дополнительные материалы, которые загромождают текст основной части диссертации, помещают в *Приложении*.

По содержанию приложения очень разнообразны. Это, например, могут быть копии подлинных документов, выдержки из отчетных материалов, производственные планы и протоколы, отдельные положения из инструкций и правил, ранее неопубликованные тексты, переписка и т.п. По форме они могут представлять собой текст, таблицы, графики, карты и т.п.

В приложения нельзя включать библиографический список использованной литературы, вспомогательные указатели всех видов, справочные комментарии и примечания, которые являются не приложениями к основному тексту, а элементами справочно-сопроводительного аппарата отчёта, помогающими пользоваться ее основным текстом.

Приложения оформляются как продолжение отчёта по НИР или ОКР на последних ее страницах. При большом объеме или формате приложения оформляют в виде самостоятельного блока в специальной папке (или

переплете), на лицевой стороне которой дают заголовок "Приложения" и затем повторяют все элементы титульного листа.

Каждое приложение должно начинаться с нового листа (страницы) с указанием в правом верхнем углу слова "Приложение" и иметь тематический заголовок. При наличии в диссертации более одного приложения они нумеруются арабскими цифрами (без знака №), например. "Приложение 1", "Приложение 2" и т.д. Нумерация страниц, на которых даются приложения, должна быть сквозной и продолжать общую нумерацию страниц основного текста.

Связь основного текста с приложениями осуществляется через ссылки, которые употребляются со словом "смотри"; оно обычно сокращается и заключается вместе с шифром в круглые скобки.

§ V.4. Оформление работы

В заголовках и подзаголовках можно допускать инверсию (перестановку) слов для лучшего расположения материала. Заголовки и подзаголовки приводят в форме именительного падежа (однако при инверсии ведущее слово может стоять и в косвенном падеже) единственного и (реже) множественного числа.

Заголовки рубрик могут начинаться как с прописной, так и со строчной буквы, подзаголовки - только со строчной (если это, конечно, не имена собственные). Окончания рубрик знаками препинания не фиксируются.

Заголовок перед подзаголовками заканчивается двоеточием, если нет ссылки к тексту непосредственно после заголовка. В тех случаях, когда даются ссылки к тексту после заголовка, двоеточие опускается.

Первую строку рубрики начинают от левого края без абзацного отступа, вторые и последующие строки - со втяжкой; подрубрики, начало которых графически не обозначено, - со втяжкой большей, чем втяжка вторых и последующих строк рубрики.

V.4.1.Рубрикация текста

Рубрикация текста работы представляет собой деление такого текста на составные части, графическое отделение одной части от другой, а также использование заголовков нумерации и т.п. Рубрикация отражает логику научного исследования и потому предполагает четкое подразделение рукописи на отдельные логически соподчиненные части.

Простейшей рубрикой является отступ вправо в начале первой строки каждой части текста. Абзац, как известно, не имеет особой грамматической формы. Поэтому его чаще всего рассматривают как композиционный прием, используемый для объединения ряда предложений, имеющих общий предмет изложения. Абзацы делаются для того, чтобы мысли выступали более зримо, а их изложение носило более заверченный характер. Логическая целостность высказывания, присущая абзацу, облегчает восприятие текста. Именно понятие единой темы, объединяющей абзац со всем текстом, есть то качественно новое, что несет с собой абзац по сравнению с чисто синтаксической "единицей высказывания" — предложением. Поэтому правильная разбивка текста работы на абзацы существенно облегчает ее чтение и осмысление.

Абзацы одного параграфа или главы должны быть по смыслу последовательно связаны друг с другом. Число самостоятельных предложений в абзаце различно и колеблется в весьма широких пределах, определяемых сложностью передаваемой мысли. При работе над абзацем следует особое внимание обращать на его начало. В первом предложении лучше всего называть тему абзаца, делая такое предложение как бы заголовком к остальным предложениям абзацной части. При этом формулировка первого предложения должна даваться так, чтобы не терялась смысловая связь с предшествующим текстом. В каждом абзаце следует выдерживать систематичность и последовательность в изложении фактов,

соблюдать внутреннюю логику их подачи, которая в значительной мере определяется характером текста.

В повествовательных текстах (то есть текстах, излагающих ряд последовательных событий) порядок изложения фактов чаще всего определяется хронологической последовательностью фактов и их смысловой связью друг с другом. В тексте приводятся только узловые события, при этом учитывается их продолжительность во времени и смысловая значимость для раскрытия всей темы.

В описательных текстах, когда предмет или явление раскрывается путем перечисления его признаков и свойств, вначале принято давать общую характеристику описываемого факта, взятого в целом, и лишь затем — характеристику отдельных его частей.

Таковы общие правила разбивки текста диссертационной работы на абзацы. Что касается деления текста такой работы на более крупные части, то их разбивку нельзя делать путем механического расчленения текста. Делить его на структурные части следует с учетом логических правил деления понятия. Рассмотрим использование таких правил на примере разбивки глав основной части на параграфы.

Суть первого правила такого деления заключается в том, чтобы перечислить все виды делимого понятия. Поэтому объем членов деления должен быть равен в своей сумме объему делимого понятия. Это означает, что глава по своему смысловому содержанию должна точно соответствовать суммарному смысловому содержанию относящихся к ней параграфов. Несоблюдение этого правила может привести к структурным ошибкам двоякого рода.

Ошибка первого рода проявляется в том, что глава по смысловому содержанию уже общего объема составляющих ее параграфов, то есть, проще говоря, включает в себя лишние по смыслу параграфы. Такая ошибка будет иметь место, если, например, при раскрытии содержания главы "Ассоциативные организационные структуры" кроме параграфов

"корпорация", "хозяйственная ассоциация", "концерны", "холдинговые компании", "консорциум", "картель" и "трест" будут в качестве параграфов указаны производственные кооперативы и малые предприятия. Суть логической ошибки в том, что здесь деление на параграфы является избыточным с лишними для данного случая членами деления, поскольку кооперативы и малые предприятия относятся не к крупномасштабному (каковыми являются ассоциативные организационные структуры), а к маломасштабному бизнесу.

Ошибка второго ряда возникает тогда, когда количество составляющих главу параграфов является по смыслу недостаточным. Например, если взять главу "Услуги, предоставляемые банками" и разбить на четыре параграфа: 1) вклады "до востребования", 2) выигрышные вклады, 3) долгосрочные вклады и 4) срочные вклады, то правило соразмерности деления будет нарушено и здесь, так как два члена деления - краткосрочные вклады и целевые вклады - оказались пропущенными.

На протяжении всего деления избранный нами признак деления должен оставаться одним и тем же и не подменяться другим признаком. Так, если главу "Виды автомобильной техники" разбить на три параграфа: 1) легковые автомобили, 2) грузовые автомобили и 3) автомобили-вездеходы, то это будет неправильно. Дело в том, что автомобильная техника рассматривается здесь вместо одного по двум признакам: видам перевозимого груза и проходимостью. Следствием этого является то, что, во-первых, деление окажется неполным, а, во-вторых, члены деления частично совпадают друг с другом, ибо среди автомобилей-вездеходов есть как легковые, так и грузовые автомобили.

По смыслу члены деления должны исключать друг друга, а не соотноситься между собой как часть и целое. Так, нельзя с точки зрения логики признать правильным деление главы "Больные, особо нуждающиеся в особом уходе" на параграфы: 1) дети, 2) женщины и 3) кормящие матери. Суть логической ошибки здесь в том, что женщины и кормящие матери

перечислены здесь в качестве самостоятельных членов деления, хотя таковыми они не являются, т.к. кормящие матери - это те же женщины.

Деление должно быть непрерывным, т.е. в процессе деления нужно переходить к ближайшим видам, не перескакивая через них. Ошибка, возникающая при нарушении этого правила логики, носит название "скачок в делении". Так, если главу "Виды предложений" разделить на три параграфа: 1) простые предложения, 2) сложносочиненные предложения и 3) сложноподчиненные, то это явная логическая ошибка смешения в одном ряду понятий различной степени рубрикации. Ошибку можно было бы исправить, разбив главу только на два параграфа:

1) простые предложения и 2) сложные предложения, которые в свою очередь могут быть разделены на сложносочиненные и сложноподчиненные.

Заголовки глав и параграфов диссертации должны точно отражать содержание относящегося к ним текста. Они не должны сокращать или расширять объем смысловой информации, которая в них заключена.

Не рекомендуется в заголовок включать слова, отражающие общие понятия или не вносящие ясность в смысл заголовка. Не следует включать в заголовок слова, являющиеся терминами узкоспециального или местного характера. Нельзя также включать в заголовок сокращенные слова и аббревиатуры, а также химические, математические, физические и технические формулы.

Любой заголовок в научном тексте должен быть по возможности кратким, т.е. он не должен содержать лишних слов. Однако и чрезмерная его краткость очень нежелательна. Дело в том, что чем короче заголовок, тем он шире по своему содержанию. Особенно опасны заголовки, состоящие из одного слова. По такому заголовку сложно судить о теме следующего за таким заголовком текста.

Встречается и другая крайность, когда автор исследования хочет предельно точно передать в заголовке содержание главы. Тогда заголовок

растягивается на несколько строк, что существенно затрудняет его смысловое восприятие.

Рубрикация текста нередко сочетается с нумерацией - числовым (а также буквенным) обозначением последовательности расположения его составных частей.

Возможные системы нумерации:

- использование знаков разных типов - римских и арабских цифр, прописных и строчных букв, сочетающихся с абзацными отступами;
- использование только арабских цифр, расположенных в определенных сочетаниях.

При использовании знаков разных типов система цифрового и буквенного обозначения строится по нисходящей:

A...B...B...Г...

I...II...III...IV...

1...2...3...4...

1)...2)...3)...4)...

a)...б)...в)...г)...

Принято порядковые номера частей указывать словами (часть первая), разделов - прописными буквами русского алфавита (раздел А), глав - римскими цифрами (глава I), параграфов — арабскими цифрами (§1).

В настоящее время в научных и технических текстах внедряется чисто цифровая система нумерации, в соответствии с которой номера самых крупных частей научного исследования (первая степень, деления) состоят из одной цифры, номера составных частей (вторая ступень деления) - из двух цифр, третья ступень деления - из трех цифр и т.д.

Использование такой системы нумерации позволяет не употреблять слова "часть", "раздел", "глава", "параграф" и т.д. (или их сокращенные написания).

Литература

1. Фейнмановские лекции по физике / Р. Фейнман, Р. Лейтон, М. Сэндс. // Том 1, 2. – М.: «Мир», 1976. – 440 с.
2. Введение в физику твёрдого тела / Ч. Киттель. Перевод с четвёртого американского издания А.А. Гусева и А.В. Пахнева под общей редакцией А.А. Гусева. Учебное руководство. Главная редакция физико-математической литературы. – М.: «наука», 1978 г. – 792 с.
3. Готт В.С., Семенюк Э.П., Урсул Д.Д. Категории современной науки (становление и развитие). — М.: Мысль, 1984
4. Мостепаненко А. М., Пространство и время в макро-, мега- и микромире, М., 1974
5. Грюнбаум А., Философские проблемы пространства и времени, пер. с англ., М., 1969
6. Ньютон И. Математические начала натуральной философии, М.-Л, 1936
7. Полемика Г. Лейбница и С. Кларка по вопросам философии и естествознания (1715—1716 гг.), [Л.], 1960
8. Ленин В.И., Материализм и эмпириокритицизм. Полное собрание соч., 5 изд., т. 18
9. Маркс К. и Энгельс Ф., Соч., 2 изд., т 20, с. 550
10. Ф. Энгельс. Диалектика природы. М., Политиздат. 1966, стр. 203
11. Эйнштейн А., Основы теории относительности, 2 изд, М - - Л , 1935
12. Механика. Ч. Киттель, У. Найт, М. Рудерман. / Перевод с англ. Главная редакция физ.-мат. литературы. М.: Изд. «Наука», 1971 г. – 480 с.
13. Сичивица О.М. Методы научного познания. — М.: Высш. школа, 1972

14. Рузавин Г.И. *Научная теория: Логико-методологический анализ.* — М.: Мысль, 1978
15. Москаленко А.Т., *Методологические проблемы современной науки.* - М.: Политиздат, 1979— 295 с.
16. *Физические основы механики.* Хайкин С.Э. / *Издание второе, с испр. и доп. Учебное пособие.* – М.: «Наука», 1971 г. – 752 с.
17. *Берклевский курс физики. Том 2. Э. Парселл. «Электричество и магнетизм».*/ Перевод с англ. под ред. А.И. Шальникова и А.О. Вайсенберга. Главная редакция физ.-мат. литературы. – М.: «Наука», 1975 г. – 440 с.
18. *Фраунфельдер Г., Хенли. Э. Субатомная физика.* / Перевод с англ. под редакцией В.В. Толмачёва. – М.: «Мир», 1979 г. – 736 с.
19. *Краткий справочник по физике.* Н.И. Карякин, К.Н. Быстров, П.С. Киреев. / - М.: «Высшая школа», 1964 г. – 576 с.
20. *Сергеев А.Г., Крохин В.В. Метрология: Учебное пособие для вузов.* - М.: Логос, 2000. – 408 с.
21. *Кузин Ф.А. Практическое пособие для аспирантов и соискателей ученой степени.* – Москва: «ОСЬ-89», 2003.

Учебное издание

Иванников Валерий Павлович
Кабакова Анна Валерьевна

МЕТОДОЛОГИЯ НАУЧНОГО ТВОРЧЕСТВА

Учебное пособие

Авторская редакция

Подписано в печать . Формат 60x84 (1/16).

Усл. Печ.л. . Уч.-изд. л.

Тираж экз. Заказ №

*Издательский центр «Удмуртский университет»
426034, Ижевск, Университетская, д. 1, корп. 4, каб. 207
Тел./факс: +7 (3412) 500 295 E-mail: editorial@udsu.ru*