

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«Пензенский государственный университет
архитектуры и строительства»
(ПГУАС)

Н.А. Очкина

КОНЦЕПЦИИ СОВРЕМЕННОГО ЕСТЕСТВОЗНАНИЯ

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ЕСТЕСТВОЗНАНИЯ

Рекомендовано Редсоветом университета
в качестве учебного пособия для студентов,
обучающихся по направлению 38.03.02 «Менеджмент»

Под общей ред. доктора технических наук,
профессора Г.И. Грейсуха

Пенза 2015

УДК 531.521+537.100+535.100
ББК 22.62+22.313+22.314
О-95

Рецензенты: кандидат технических наук, доцент
С.В. Тертычная (ПГУ);
кандидат физико-математических
наук, доцент П.П. Мельниченко
(ПГУАС)

Очкина Н.А.

О-95 Концепции современного естествознания. Физические основы
естествознания: учеб. пособие / Н.А. Очкина; под общ. ред. д-ра
техн. наук, проф. Г.И. Грейсуха. – Пенза: ПГУАС, 2015. – 232 с.

Подробно изложены основные этапы формирования физической картины мира. В конце теоретической части каждого из разделов пособия приведены вопросы для самопроверки, которые помогут студентам самостоятельно оценить качество усвоения материала. В сборник также включены методические указания к лабораторным работам по механике, электродинамике, волновой и квантовой оптике. Пособие содержит материалы, предназначенные для фонда оценочных средств.

Учебное пособие подготовлено на кафедре «Физика и химия» и предназначено для использования студентами, обучающимися по направлению 38.03.02 «Менеджмент», при изучении дисциплины «Концепции современного естествознания».

© Пензенский государственный университет
архитектуры и строительства, 2015
© Очкина Н.А., 2015

ПРЕДИСЛОВИЕ

Настоящее учебное пособие разработано в соответствии с программой курса «Концепции современного естествознания» ФГОС ВПО третьего поколения для направления 38.03.02 «Менеджмент» и имеет целью совершенствование компетенций в процессе овладения студентами знаниями о явлениях природы.

Пособие содержит три главы:

- 1) механическая картина мира.
- 2) электромагнитная картина мира.
- 3) квантово-полевая картина мира.

В первой части каждой из глав приводится полное изложение теоретического материала по истории формирования одной из физических картин мира; даётся формулировка законов и основных принципов рассматриваемой картины мира.

Во второй части приводятся методические указания к лабораторным работам, выполнение которых способствует более глубокому пониманию студентами теоретического материала и позволяет приобрести элементарные навыки экспериментирования.

Учитывая, что пособие предназначено для студентов гуманитарных факультетов, обычно мало знакомых с естествознанием и испытывающих определённые трудности в освоении технических дисциплин, автор попытался сделать изложение материала простым и доступным.

В тексте учебного пособия наиболее важные положения и термины, а также формулировки законов выделены **жирным шрифтом** и *курсивом*. Это способствует более эффективному усвоению материала студентами. Вопросы для самопроверки, помещённые в конце глав, помогут студентам самостоятельно оценить качество усвоения материала.

Систематическая работа с пособием способствует формированию у студентов:

знаний фундаментальных законов физики, химии и астрономии;

умений правильно применять законы естествознания для понимания явлений природы; самостоятельно работать с учебной, научной и справочной литературой; осуществлять самооценку и самоанализ на основе самопроверки в процессе выполнения заданий;

позволяет **овладеть**:

способностью к коммуникации в устной и письменной формах (ОК-5);
навыками работы в коллективе (ОК-6);

способностью к самоорганизации и самообразованию (ОК-7).

Успешное освоение законов и теорий естествознания позволит выпускнику-бакалавру:

сформировать целостное систематизированное представление о явлениях природы;

овладеть навыками адекватного поведения в окружающем мире.

ВВЕДЕНИЕ

Окружающий нас мир природы бесконечен и разнообразен. Человек пытается познать мир и осознать своё место в нём. Познавая мир, он создает в своём сознании определенную модель – *картину мира*. На каждом этапе своего развития люди по-разному представляют себе мир, в котором они живут. Поэтому в истории человечества существовали различные картины мира: мифологическая, религиозная, научная и др. Кроме того, каждая отдельная наука также может формировать собственную картину мира (физическую, химическую, биологическую и др.). Однако из всего многообразия картин мира, существующих в современной науке, самое широкое представление даёт общая научная картина мира, описывающая природу, общество и человека.

Научная картина мира – это целостная система представлений об общих свойствах и закономерностях развития природы и общества.

Она формируется в результате обобщения основных научных понятий и принципов. Научная картина мира опирается на достижения естественных, общественных и гуманитарных наук, однако её фундаментом, бесспорно, является естествознание. Значение естествознания в формировании научной картины мира настолько велико, что нередко научную картину мира сводят к естественнонаучной, содержание которой составляют картины мира отдельных естественных наук.

Естественнонаучная картина мира – это достоверное и систематизированное целостное представление о природе на данном этапе научного познания.

Концепции, лежащие в основе естественнонаучной картины мира, являются ответами на сущностные, основополагающие вопросы о мире, включающие представления о материи, движении, пространстве и времени, взаимодействии, причинности и закономерности, а также космологические представления. С течением времени, по мере эволюции естественнонаучной картины мира, эти ответы меняются, уточняются, расширяются.

История науки свидетельствует о том, что большую часть содержания естествознания составляют преимущественно физические знания. В своём развитии физика прошла длинный путь: от первых шагов, сделанных в рамках древнегреческой натурфилософии около двух с половиной тысяч лет назад, до современных представлений о мире. Существенные перемены в теоретической физике произошли в XVII в. Тогда был осуществлён переход от аристотелевской физики к ньютоновской. Используя ньютоновскую модель, которая господствовала в науке в течение трёх столетий, физика достигла прогресса и выгодно отличалась от других дисциплин. Её законы приобрели математическую формулировку, она доказала свою эффективность в решении многих проблем. Степень разработанности физики была настолько велика, что в XVII–XVIII вв. она смогла создать

собственную *физическую картину мира*, в отличие от других естественных наук (химии и биологии), которые лишь в XX в. поставили перед собой эту задачу.

Физическая картина мира – это общее теоретическое знание в физике, включающее: основополагающие философские и физические идеи, фундаментальные физические теории, наиболее общие понятия, принципы, законы и методы познания, соответствующие определенному историческому этапу развития физики.

Физическая картина мира, с одной стороны, обобщает все ранее полученные знания о природе, а с другой стороны, вводит в физику новые основополагающие идеи и обусловленные ими понятия, принципы и гипотезы, которые меняют основы физического теоретического знания, что приводит к замене одной физической картины мира другой.

Первой в истории естествознания физической картиной мира была *механическая (механистическая) картина мира*, сформировавшаяся в XV–XVIII вв. на основе:

- механики итальянского художника, учёного и изобретателя Леонардо да Винчи (1452–1519 гг.);

- гелиоцентрической системы польского астронома Николая Коперника (1473–1543 гг.);

- законов естествознания итальянского физика и астронома Галилео Галилея (1564–1642 гг.), впервые применившего для исследования природы экспериментальный метод с измерениями исследуемых величин и последующей математической обработкой результатов измерений;

- законов небесной механики немецкого ученого Иоганна Кеплера (1571–1630 гг.);

- законов классической механики выдающегося английского учёного Исаака Ньютона (1643–1727 гг.).

В рамках механической картины мира невозможно было объяснить электромагнитные явления, поэтому она была дополнена *электромагнитной картиной мира*, основанной на электродинамике Максвелла и господствовавшей с середины XIX до начала XX в. Создание квантовой механики в начале XX в. заставило пересмотреть основополагающие представления об объективной реальности, а также о соотношении случайности и закономерности, и привело к формированию неклассической *квантово-полевой картины мира*.

В XX в. были созданы *астрономическая* и *химическая картины мира*. Позже сформировалась *биологическая картина мира*. Это объясняется тем, что биологические науки долгое время были чрезвычайно обособлены друг от друга, менее взаимосвязаны, чем группа физико-химических наук.

В последней четверти XX века в науке начала формироваться новая современная постнеклассическая картина мира – *эволюционно-синерге-*

тическая. Её фундамент составляют ставшие общенаучными принципы развития и системности природы. Теоретический каркас этой картины мира определяют теория самоорганизации (*синергетика*) и теория систем (*системология*), а также информационный подход, в рамках которого информация понимается как атрибут материи наряду с движением, пространством и временем.

В эволюционно-синергетической картине мира развитие рассматривается как *универсальный* (осуществляющийся везде и всегда) и *глобальный* (охватывающий всё и вся) процесс (**концепция универсального эволюционизма**). Само развитие трактуется как самодетерминированный нелинейный *процесс самоорганизации* нестационарных открытых систем.

Эти черты эволюционно-синергетической картины мира позволяют по-новому решать проблему единства мира, понять взаимосвязи между различными уровнями организации материального мира (мега-, макро- и микромирами), живой и неживой материей, увидеть в новом ракурсе место и роль разума во Вселенной.

1. МЕХАНИЧЕСКАЯ КАРТИНА МИРА

1.1. Формирование механической картины мира (МКМ)

1.1.1. Формирование физических представлений в античную эпоху (VI в. до н. э. – V в. н. э.)

Первые научные представления о мире, на основе которых была разработана МКМ, были сформулированы античными мыслителями Древней Греции в VII–VI вв. до н.э. Учёным этой эпохи были доступны лишь простые наблюдения за природными явлениями, на основе которых выдвигались гипотезы и проводились логические рассуждения. Неудивительно, что их представления часто оказывались неверными. Вместе с тем иногда ими высказывались гениальные догадки, которые на многие столетия опережали результаты конкретных исследований. Одной из таких догадок является **атомистическая гипотеза строения вещества**, составляющая основу механической картины мира.

Эта гипотеза была выдвинута основателем древнегреческого материализма – **Левкиппом** (500–440 гг. до н.э.). Он сформулировал основное положение атомистики – *все тела состоят из простых неделимых микрочастиц*.

Гипотеза Левкиппа была детально обоснована его учеником **Демокритом** (ок. 460–370 гг. до н.э.), который ввёл понятие *атом* (от греч. *atomos* – «нерассекаемый»). Согласно Демокриту, в мире есть лишь два «начала»: пустота (небытие) и атомы (бытие). Пустота неподвижна и безгранична, в ней нет ни «верха», ни «низа», ни «центра». В бесконечно пустом пространстве в различных направлениях беспорядочно движутся атомы.

Атомы представляют собой мельчайшие, неизменные, непроницаемые и абсолютно неделимые частицы вещества – «кирпичики мироздания».

Они вечны, неизменны и разнообразны по форме (шарообразные, угловатые, крючкообразные, вогнутые, выпуклые) и по величине. Размеры атомов настолько малы, что они недоступны для восприятия органами чувств человека. Атомы имеют зацепки, которые позволяют им при столкновениях скрепляться и образовывать различные тела.

Демокрит считал, что из атомов образуются не только предметы, окружающие человека, но и целые миры, которых во Вселенной бесчисленное множество. Миры преходящи: одни из них только возникают, другие находятся в расцвете, а третьи уже разрушаются. Новые тела и миры возникают от сложения атомов, уничтожаются они от разложения на атомы.

Идеи Демокрита развил **Эпикур** (341–270 гг. до н.э.). Он полагал, что атомы отличаются не только по форме и величине, но и *по весу*, что явилось предвосхищением их характеристики в новейшем атомистическом

материализме. Существенным свойством атомов он считал *движение*. Атомы вечно движутся в пустоте с одинаковой для всех быстротой. В этом их движении некоторые атомы находятся на большой дистанции один от другого, другие же сплетаются друг с другом и приобретают дрожательное, колебательное движение. Эпикур рассматривал три вида движения атомов: общее движение вниз под действием тяжести по параллельным линиям; самопроизвольные отклонения от прямолинейного пути; столкновение атомов друг с другом.

В отличие от Демокрита, утверждавшего, что движение атомов в пустоте определяется внешней механической необходимостью, Эпикур полагал, что для самоотклонения атомов от прямолинейных траекторий не существует никаких внешних причин, никакой необходимости, оно происходит совершенно спонтанно. Если бы атомы не отклонялись от своих прямых путей, то не было бы возможным ни их столкновение, ни столкновение образованных из них вещей. Он дополнил взгляды Демокрита совершенно новым понятием – *притяжением атомов*.

Атомистика древних греков сыграла выдающуюся роль в развитии представлений о структуре материи. Признавая вечными материю и движение, она была, по существу, конструктивной альтернативой религии. После длительного средневекового застоя в науке идеи атомизма были возрождены работами Галилео Галилея, Френсиса Бекона, Пьера Гассенди, Роберта Бойля, Исаака Ньютона. И сейчас, через 2500 лет после её возникновения, программа атомизма (применяемая уже не к атомам, а к элементарным частицам, из которых они состоят) является краеугольным основанием естествознания.

Одним из явлений, интересовавших древнегреческих учёных в первую очередь, было *движение*. Их представления о механическом движении были обобщены в достаточно сложной форме философом **Аристотелем** (384–322 до н.э.).

Суммировав труды греческих философов-атомистов, Аристотель создал список четырех основных элементов мира (фундаментальных видов материи): «земля», «вода», «воздух», «огонь». Он утверждал, что каждый из них *имеет своё собственное естественное место* во Вселенной. Элемент «земля», включающий все твёрдые материалы, был расположен в центре Вселенной. Элемент «вода» располагался естественным образом относительно поверхности сферы «земли», элемент «воздух» располагался естественным образом относительно поверхности сферы «воды», элемент «огонь» располагался естественным образом относительно поверхности сферы «воздуха». Суждение Аристотеля о том, что каждый из видов материи имеет своё естественное место во Вселенной, – типичный пример *аксиомы*.

Движение Аристотель понимал предельно широко – как возникновение и уничтожение определённых тел, их рост или уменьшение, изменение качества и, наконец, как перемену места, перемещение.

Все механические движения Аристотель разбивал на две большие группы: *совершенные круговые движения небесных тел* и *несовершенные движения земных предметов*. Он считал, что небесные движения вечны и неизменны, не имеют начала и конца, а земные движения имеют начало и конец и делятся на *естественные* и *насильственные*.

Естественное движение – это движение тела к своему месту, например, тяжёлого тела вниз, а лёгкого – вверх. Тела, состоящие из элементов «земли», стремятся вниз, а тела, образованные из «воздуха» или «огня», – вверх. Естественное движение происходит само собой, оно не требует приложения силы.

Все прочие движения на Земле требуют приложения силы, направлены против природы тел и являются *насильственными*. Аристотель не знал закона инерции. Он полагал, что любые насильственные движения, даже равномерные и прямолинейные, происходят под действием силы. Доказывая вечность движения, он отвергал идею о самодвижении материи. Основной принцип динамики Аристотеля: *«Всё, что находится в движении, движется благодаря воздействию других тел, а мир в целом приводится в движение неким перво двигателем»*. Перводвигатель неподвижен (в противном случае был бы первоперводвигатель) и вечен (ибо движение, вызываемое им, вечно).

Аристотель считал, что скорость движения пропорциональна действующей силе.

С концепцией движения он связывал представление о *физическом взаимодействии*. При этом он понимал *взаимодействие как одностороннее воздействие движущего тела на движимое*. Это прямо противоречит хорошо известному сегодня третьему закону Ньютона.

Учение Аристотеля *о пространстве и времени* исходит из понятия непрерывности. Поэтому пространство для него – это *протяженность тел*, а время – *длительность событий*. Пространство и время Аристотеля существуют только вместе с материей, поэтому его концепция пространства и времени может быть названа *относительной*.

Аристотель полагал, что материя делима до бесконечности и отрицал существование пустоты. Он считал, что весь Космос (небеса и небесные тела) сделан из материи, которая не является ни «землёй», ни «водой», ни «воздухом», ни «огнём». Этот пятый элемент, из которого состоят небеса, он назвал «эфиром» (от греч. *aither* – «сверкание»). По представлению древних греков, «эфир» – пламенеющий воздух, в котором вращаются звёзды и живут боги. Эфир вечен, он не изменяется и не превращается в другие элементы. Космос не однороден, в нем есть центр и периферия, верх и низ.

Космология Аристотеля носила *геоцентрический* характер. Он считал, что в центре мира находится *неподвижная шарообразная Земля*. Вокруг неё вращаются сферы, к которым прикреплены небесные светила. Самая удалённая – сфера неподвижных звёзд. Она является границей Космоса. Ближайшая к Земле – сфера Луны, отделяющая *надлунный мир* совершенных круговых движений от несовершенного *подлунного мира*. Надлунные тела построены из вечного, неуничтожимого «эфира». Вне сферы неподвижных звёзд нет ни времени, ни пространства, ни пустоты, а есть только нематериальный неподвижный вечный перводвигатель, в понимании Аристотеля – **Бог**. Он приводит в движение сферу неподвижных звёзд. Движение этой сферы передается другим сферам, всё ниже и ниже, вплоть до Земли, где вследствие несовершенства подлунных элементов совершенное круговое движение распадается на множество несовершенных.

Космос Аристотеля вечен во времени и вечно его движение, но вечность движения является результатом вечной деятельности Бога.

Картина мироздания, предложенная Аристотелем, была математически оформлена **Клавдием Птолемеем** (II в. н.э.). В рамках этой картины были разработаны некоторые очень ценные идеи, например представления о шарообразности Земли, о равноправии всех перед мировыми законами, вне зависимости от того, в какой части земного шара находится человек.

Теория Аристотеля признавалась учёными на протяжении более чем двух тысяч лет. Однако она была очень сложной и ошибочной в своей основе. Это выявилось по мере накопления несоответствий геоцентризма вновь открываемым естественнонаучным фактам, прежде всего астрономическим. В конце концов, все её положения были заменены другими теориями, которые различались с ней практически по всем пунктам. Вóвремя невыявленная несостоятельность геоцентризма объясняется тем, что экспериментальная проверка основных положений этой теории не была проведена не только Аристотелем, но и в течение двух тысяч лет после него.

В Древней Греции были учёные, которые экспериментировали и получали важные заключения именно в результате своих экспериментов, например первоклассный математик и механик **Архимед** (287–212 гг. до н.э.). Он разработал научные основы статики, в частности ввёл понятия *центра тяжести* и предложил методы определения центра тяжести для различных тел, сформулировал правило сложения параллельных сил, дал математический вывод законов рычага. Архимеду приписывают «крылатое» выражение: *«Дайте мне точку опоры, и я сдвину Землю»*.

Архимед положил начало гидростатике, которая нашла широкое применение при определении плотности тел путём взвешивания их в воде и расчёте грузоподъемности кораблей. В его сочинении «О

плавающих телах» содержатся основные положения гидростатики, а также основной закон гидростатики – **закон Архимеда**:

на всякое тело, погружённое в жидкость, действует выталкивающая сила, направленная вертикально вверх и равная весу вытесненной им жидкости.

Закон Архимеда оказался справедливым и для газа. С помощью этого закона Архимед решил задачу о содержании золота и серебра в короне сиракузского царя Герона.

В этом же сочинении он исследовал равновесие плавающих тел и сформулировал условия плавания тел.

Архимед явился автором многих изобретений, в том числе машины для орошения полей, винта, рычагов и блоков для подъёма больших грузов, военных метательных машин.

1.1.2. Формирование физических представлений в период Средневековья (V – начало XIVвв.)

Дальнейшая разработка статики Архимеда была осуществлена только во второй половине XIII в. группой учёных Парижского университета во главе с **Иорданом Неморарием**. Они развили античное учение о равновесии простых механических устройств, решив задачу о равновесии тел на наклонной плоскости, с которой не могла справиться античная механика.

В начале XIV века в полемике с античными учёными рождаются новые идеи, в физике начинают использоваться математические методы, т. е. идет процесс подготовки к развитию будущего точного естествознания. Лидерство переходит к группе ученых Оксфордского университета, среди которых наиболее значительной фигурой является **Томас Брадвардин** (1290–1349 гг.). Ему принадлежит трактат «О пропорциях» (1328 г.), который в истории науки оценивается как первая попытка написать «Математические начала натуральной философии» (именно так почти триста шестьдесят лет спустя назовет свой знаменитый труд Исаак Ньютон).

Другой учёный Оксфорда – **Уильям Гейтсбери** (ок.1330–1382 гг.), исследуя неравномерные движения, ввёл понятия *мгновенной скорости* и *ускорения*. Он впервые рассмотрел вопросы об ускорении и замедлении движения и о пути, пройденном при равноускоренном движении.

Существенный вклад в развитие механики внесли французские философы и математики Н. Орем, Ж. Буридан, А. Саксонский.

Николай Орем впервые сформулировал принцип относительности, причём в точности в том же виде, что и у Галилея в XVII столетии. Новой для своего времени была идея Орема о том, что движение планет определено не Богом, сотворившим Землю, а равновесием природных сил.

С другой стороны, Орем придерживался традиционных представлений Аристотеля о делении мира на подлунный и небесный.

Трактат Орема «О конфигурации качеств» продолжил линию исследования переменных величин, заданную оксфордскими учёными. В этом трактате он формулирует закон равнопеременного движения, связывающий путь, пройденный телом, со временем, а также изобретает графическое представление для переменной величины, зависящей от пространственных координат, либо от времени. Орем изображает движение, откладывая по горизонтальной оси время, а по вертикальной – интенсивность движения в данный момент времени (мгновенную скорость). С этого времени в научных трудах появляются графики скорости движения, и кинематические доказательства приобретают геометрический характер.

Из научных работ **Жана Буридана** (ок.1300–ок.1358 гг.) особого внимания заслуживает сочинение «Вопросы к четырём книгам о небе и мире», являющееся комментарием к книге Аристотеля «О небе». В этой работе он описывает движение по инерции, используя для обозначения последнего понятие «*импетус*» (от лат. *impetus* – толчок, импульс). Согласно теории «*импетуса*» («движущей силы») для поддержания движения небесных тел необходим нематериальный двигатель (бог), выполняющий функцию первого импульса, который сохраняется в движении небесных тел, возрастает в свободном падении, но прерывается другими земными движениями (удар, бросок), так что движение прекращается. В частном случае Буридан объяснял с точки зрения теории импетуса падение тел. Он считал, что тяжесть запечатлевает в падающем теле «импетус», поэтому и скорость тела все время возрастает. Величина импетуса, по его мнению, определяется и скоростью, сообщенной телу, и «качеством материи» этого тела. Импетус расходуется в процессе движения для преодоления трения, и когда импетус растрачивается, тело останавливается. Динамическая теория импетуса представляла собой модификацию аристотелевской теории движения и явилась мостом, связывающим её с динамикой Галилея. Эта теория стала общепринятой в средневековых университетах.

Вопросом о природе «импетуса» задавался и **Альберт Саксонский** (1316–1390 гг.). Он классифицировал его (в терминах аристотелевской теории категорий) как «качество», присущее движущемуся телу. Саксонский ввёл деление движений на *поступательное* и *вращательное*, *равномерное* и *переменное*. Он установил пропорциональную зависимость между скоростью, расстоянием и временем движения. Ему принадлежит также оригинальное решение вопроса о природе *гравитации*. Проводя различие между центром тяжести и геометрическим центром тела и замечая, что они не обязательно совпадают, он утверждал, что настоящим центром Вселенной является не центр объёма Земли, а центр её тяжести. Саксонский полагал, что *тяготение* есть стремление каждого тела – как

части мирового целого, имеющего свой центр тяжести в центре мира, – соединиться с центром тяжести Земли.

Общая картина науки в эпоху средневековья характеризовалась в основном познанием отдельных явлений, её основные положения легко укладывались в умоглядные натурфилософские схемы мироздания, выдвинутые ещё в период античности (главным образом в учении Аристотеля). В таких условиях наука еще не могла подняться до раскрытия объективных законов природы. Техника развивалась очень медленно и фактически без какого-либо заметного влияния науки.

К концу этого периода, примерно к середине XV в., наметились явные признаки структуризации науки. Это было связано с переходом производства от ремесленных форм к мануфактурам. Энергетической базой производства тогда служило механическое движение: энергия воды и ветра, мускульная энергия человека и животных. Возникла необходимость установить законы механического движения. Мореплавание нуждалось в помощи астрономии. Военное дело, прежде всего артиллерия, выдвигало необходимость решения задач баллистики. Поэтому в первую очередь стала развиваться механика. С этого времени на долгие годы вперёд естествознание стало механистическим, строящим механические модели для всех явлений природы.

1.1.3. Развитие механики в эпоху Возрождения (вторая половина XV–XVI вв.)

Период конца XV–XVI веков ознаменовал переход от средневековья к Новому времени и получил название эпохи Возрождения. Она характеризовалась возрождением культурных ценностей античности (отсюда и название эпохи), расцветом искусства, утверждением идей гуманизма. Вместе с тем эпоха Возрождения отличалась существенным прогрессом науки.

Развитие механики в этот период неразрывно связано с именем **Леонардо да Винчи** (1452–1519 гг.), использовавшим свой метод познания природы. Он был убеждён, что познание идет от частных опытов и конкретных результатов к научному обобщению и опыт является не только источником, но и критерием познания. Будучи приверженцем экспериментального метода исследования, Леонардо да Винчи исследовал падение тел и движение тела, брошенного горизонтально, явление удара, трение (определил коэффициенты трения качения и скольжения); изобрёл конусный шарикоподшипник.

Он постиг природу инерции, понимал, что действие равно противодействию и направлено против него. Близко подошёл к открытию закона сообщающихся сосудов, наблюдал поднятие жидкостей в узких трубках

(явление капиллярности), изучал волны на воде, наложение волн, резонанс. Открыл существование сопротивления среды и подъёмную силу.

Леонардо да Винчи конструировал машины (летательные аппараты, ткацкие станки, печатные и деревообрабатывающие машины, приборы для шлифовки стекла, землеройные машины), что давало ему возможность более глубоко проникнуть в суть законов механики. В его рукописях даны рисунки парашюта и вертолёта (винтокрылого летательного аппарата). Он является автором ряда гидротехнических проектов и конструкций металлургических печей.

В конце XV в. выходит в свет серия трудов немецкого мыслителя, философа и математика **Николая Кузанского** (1401–1464 гг.), в которых он развивает мысль о том, что движение является основой всего сущего, неподвижного центра во Вселенной нет. Вселенная бесконечна, Земля и все небесные тела созданы из одной и той же первоматерии.

Наиболее крупным достижением мировоззренческого характера в период Возрождения явилось создание польским монахом **Николаем Коперником** (1473–1543 гг.) *гелиоцентрической системы мира*.

Коперник отбросил общепринятую геоцентрическую систему мира и на основе большого числа астрономических наблюдений и расчетов создал новую систему, в центр которой поставил абсолютно неподвижное Солнце, вокруг которого по круговым орбитам вращаются планеты. Земля является вполне рядовой планетой в их числе. Совершая обращение вокруг Солнца, Земля одновременно вращается вокруг собственной оси, чем и объясняется смена дня и ночи и видимое движение звёздного неба.

Включив Землю в число небесных тел, которым свойственно круговое движение, Коперник высказал очень важную мысль о движении как естественном свойстве небесных и земных объектов, подчиненном некоторым общим закономерностям единой механики. Тем самым было разрушено догматизированное представление Аристотеля о неподвижном «перводвигателе», якобы приводящем в движение Вселенную.

Слабой стороной взглядов Коперника было то, что он не отказался от аристотелевской идеи о конечности мироздания. Он считал, что относительно Солнца, а значит и в абсолютном смысле, звёзды неподвижны, они находятся на неподвижной твёрдой небесной сфере, являющейся краем Вселенной.

В книге Коперника «Об обращении небесных сфер» нет речи о ведущей роли тяготения, так как необходимые для понимания этого законы механики ещё не были открыты. Для этого понадобилось почти полтора столетия, в течение которых концепция гелиоцентризма была окончательно оформлена в трудах датского астронома Тихо Браге, итальянского мыслителя Джордано Бруно и немецкого астронома Иоганна Кеплера.

В 1577 году **Тихо Браге** (1546–1601 гг.) сумел рассчитать орбиту кометы, проходившую вблизи планеты Венера. Согласно его расчетам

получалось, что эта комета должна была натолкнуться на твердую поверхность сферы, ограничивающей Вселенную, если бы таковая существовала. Таким образом, была выявлена нелепость одного из положений гелиоцентрической системы Коперника.

Джордано Бруно (1548–1600гг.) пошёл дальше Коперника. Он, подобно Николаю Кузанскому, отрицал наличие центра Вселенной и отстаивал идею о её бесконечности. Бруно говорил о существовании во Вселенной множества тел, подобных Солнцу и окружающим его планетам.

В космологии Бруно высказал ряд догадок, которые подтвердились последующими астрономическими открытиями:

- о вращении Солнца вокруг своей оси;
- о существовании неизвестных в его время планет в пределах Солнечной системы;
- о том, что звёзды являются далёкими Солнцами;
- о существовании во Вселенной бесчисленного множества тел, подобных нашему Солнцу и окружающим его планетам.

Инквизиция имела серьезные причины бояться распространения образа мыслей и учения Бруно. В 1592 году он был арестован и в течение восьми лет находился в тюрьме, подвергаясь допросам со стороны инквизиции. 17 февраля 1600 г. как нераскаявшийся еретик он был сожжён на костре в Риме на площади Цветов. 9 июня 1889 г. на этом же месте ему поставили памятник.

1.1.4. Возникновение классической механики (начало XVII в. – XIX в.)

Трагическая гибель Джордано Бруно произошла на рубеже двух эпох: эпохи Возрождения и эпохи Нового времени. Последняя из них охватывает три столетия – XVII, XVIII и XIX века. В этом трехсотлетнем периоде особую роль сыграл XVII век, ознаменовавшийся рождением современной науки, у истоков которой стояли такие выдающиеся учёные, как Галилео Галилей, Иоганн Кеплер, Исаак Ньютон.

Галилео Галилей (1564–1642 гг.) заложил основы нового механического естествознания, впервые применив для исследования явлений природы *экспериментальный метод*, включающий измерение исследуемых величин и математическую обработку результатов измерений.

Галилей ввёл определения *силы, скорости, ускорения, равномерного движения*; понятия *средней скорости* и *среднего ускорения*. Скорость он определял как отношение пройденного пути к затраченному времени, а силу считал векторной величиной.

До Галилея общепринятым в науке считалось понимание движения, выработанное Аристотелем: тело движется только при наличии внешнего воздействия на него, и если это воздействие прекращается, тело останавли-

вается. Галилей показал, что этот принцип Аристотеля (хотя он и согласуется с повседневным опытом) является ошибочным. В многообразии движений он выделил движение по инерции, подметив свойство тел сохранять свою скорость. В 1609 г. Галилей сформулировал **закон инерции**:

тело либо находится в состоянии покоя, либо движется, не изменяя величины и направления скорости своего движения, если на него не производится какого-либо внешнего воздействия.

Большое значение для становления механики как науки имело экспериментальное исследование Галилеем *свободного падения тел*.

Закон свободного падения тел:

скорость свободного падения тел не зависит от их массы (как думал Аристотель), а пройденный падающим телом путь пропорционален квадрату времени падения.

Галилей сформулировал аксиому о том, что *свободно падающее тело движется с постоянным ускорением и конечная скорость тела, падающего из состояния покоя с высоты H , связана с этой высотой уравнением $v = \sqrt{2gH}$* . Он доказал, что траектория падающего тела отклоняется от вертикали из-за сопротивления воздуха; в безвоздушном пространстве тело падает точно под точкой, из которой началось падение.

Галилей показал, что траектория движения тела, брошенного под углом к горизонту, является параболой. Ему принадлежит экспериментальное обнаружение весомости воздуха, открытие законов колебаний маятника и законов движения тел по наклонной плоскости.

В 1632 г. в своём знаменитом труде «Диалог о двух главнейших системах мира: птолемеевой и коперниковой» Галилей сформулировал **механический принцип относительности**:

внутри равномерно движущейся (так называемой инерциальной) системы отсчёта все механические процессы протекают так же, как и внутри покоящейся.

Росту научного авторитета Галилея способствовали его астрономические исследования, описанные в труде «Звёздный вестник». Они явились подтверждением гелиоцентрической системы Коперника. Используя построенные им телескопы (вначале это был скромный оптический прибор с трехкратным увеличением, а впоследствии был создан телескоп и с 32-кратным увеличением), Галилей сделал целый ряд интересных наблюдений и открытий. Он установил, что Солнце вращается вокруг своей оси, а на его поверхности имеются пятна. У самой большой планеты Солнечной системы – Юпитера – Галилей обнаружил 4 спутника (из 13 известных в настоящее время). Наблюдения Галилея за Луной показали,

что её поверхность гористого строения и что этот спутник Земли имеет *либрацию*, то есть видимые периодические колебания маятникового характера вокруг центра. Галилей убедился, что кажущийся туманностью Млечный Путь состоит из множества отдельных звёзд.

Высокую оценку астрономическим наблюдениям Галилея дал один из крупнейших математиков и астрономов конца XVI – первой трети XVII в. **Иоганн Кеплер** (1571–1630 гг.).

Кеплер занимался поисками законов небесной механики и составлением звёздных таблиц. На основе обобщения данных астрономических наблюдений он установил три закона движения планет относительно Солнца. В своем **первом законе**, открытом в 1609 г., Кеплер отказался от коперниковского представления о круговом движении планет вокруг Солнца. В этом законе утверждается, что

каждая планета движется по эллипсу, в одном из фокусов которого находится Солнце.

Согласно **второму закону Кеплера** (1609 г.) – закону площадей:

скорость движения планеты изменяется так, что радиус-вектор, проведенный от Солнца к планете, в равные промежутки времени описывает равновеликие площади.

Из этого закона следовал вывод, что скорость движения планеты по орбите непостоянна и она тем больше, чем ближе планета к Солнцу.

Третий закон Кеплера (1618 г.) – гармонический закон:

квадраты времён обращения планет вокруг Солнца относятся как кубы их средних расстояний от него.

Кеплер считал, что Солнце – это одна из многочисленных звёзд, причём другие звёзды, рассеянные в пространстве, тоже окружены планетами. Он разработал теорию солнечных и лунных затмений, предложил способы их предсказания, уточнил величину расстояния между Землёй и Солнцем, составил так называемые Рудольфовы таблицы – по имени австрийского императора Рудольфа II, при дворе которого Кеплер занимал место астронома. С помощью этих таблиц можно было вычислять с довольно высокой точностью положение планет для любого момента времени.

В 1609 г. Кеплер высказал идею тяготения и мысль о том, что причиной приливов и отливов в океанах является притяжение Луны.

На основе законов Кеплера можно было описать движение планет вокруг Солнца. Но Кеплер не объяснил причины движения планет. Это стало возможным только после создания ньютоновской механики – *учения о взаимодействии тел и силах*.

Предшественник Ньютона, французский философ, физик и математик **Рене Декарт** (1596–1650 гг.) полагал, что взаимодействие происходит

только путём давления или удара, то есть при непосредственном контакте (соприкосновении) тел. Он исследовал законы удара.

Декарт ввёл понятие *количества движения*, подразумевая под ним произведение «величины» тела (массы) на абсолютное значение его скорости. Он сформулировал *закон сохранения количества движения*, однако толковал этот закон неправильно, не учитывая, что количество движения является векторной величиной.

Декарт был основоположником *картезианства*, стремился построить общую картину природы, в которой все физические и другие явления объяснялись бы как результат движения больших и малых частиц, образованных из единой материи. Он говорил: «*Дайте мне материю и движение, и я построю мир*». Не имея возможности опираться на достаточный экспериментальный материал, Декарт (и его последователи) злоупотреблял гипотетическими построениями, в основу которых положил принцип несотворимости и неуничтожимости движения. Основной удар картезианским взглядам нанёс **Исаак Ньютон** (1643–1727 гг.).

В своей работе по созданию теоретической механики *Ньютон* опирался прежде всего на открытые Галилеем закон инерции и законы свободного падения тел. Закон инерции вошёл в механику Ньютона в качестве первого закона.

Первый закон Ньютона:

всякое тело сохраняет состояние покоя или равномерного и прямолинейного движения до тех пор, пока оно не будет вынуждено изменить это состояние под действием каких-либо других тел.

Второй закон Ньютона связывает движение тела с тем воздействием, которое оказывают на него другие тела. Сила здесь выступает как причина изменения инерциального движения тела. Уравнение второго закона Ньютона связывает кинематическую характеристику движения – *ускорение* – с динамической характеристикой – *силой*:

$$\vec{a} = \frac{\vec{F}}{m}.$$

Второй закон Ньютона:

ускорение \vec{a} , приобретаемое телом, прямо пропорционально действующей на него силе \vec{F} и обратно пропорционально массе m тела.

Если на тело одновременно действуют несколько сил, то \vec{F} – результирующая (равнодействующая) сила. Она равна векторной сумме всех сил, действующих на тело:

$$\vec{F} = \sum_{i=1}^n \vec{F}_i = \vec{F}_1 + \vec{F}_2 + \dots + \vec{F}_n.$$

Второй закон Ньютона дал аппарат для расчёта характеристик движения тела под действием сил. Поскольку ускорение представляет собой первую производную от скорости по времени, то уравнение второго закона Ньютона может быть записано в форме дифференциального уравнения первого порядка относительно скорости

$$\frac{d\vec{v}}{dt} = \frac{\vec{F}}{m}.$$

Решая это уравнение методом интегрирования, получают выражение для скорости движения тела, с помощью которого можно рассчитать численное значение скорости в любой момент времени: в настоящем, прошлом или будущем. Далее, так как скорость есть первая производная от радиуса-вектора (координат) точки, то, интегрируя выражение для скорости, получают выражение для координат точки в любой момент времени.

Третий закон Ньютона устанавливает, что все силовые явления в природе носят характер взаимодействия нескольких (не менее двух) тел.

Третий закон Ньютона – это закон равенства действия и противодействия. Этот закон констатирует, что

два тела действуют друг на друга с силами, направленными вдоль одной прямой в противоположные стороны и равными по величине:

$$\vec{F}_{1,2} = -\vec{F}_{2,1},$$

где $\vec{F}_{1,2}$ – сила действия; $\vec{F}_{2,1}$ – сила противодействия.

На основе законов Кеплера в 1698г. Ньютон открыл **закон всемирного тяготения**, согласно которому

все тела, независимо от их свойств и от свойств среды, в которой они находятся, взаимно притягиваются друг к другу с силой \vec{F} , прямо пропорциональной произведению их масс (m_1 и m_2) и обратно пропорциональной квадрату расстояния r между ними:

$$F = G \frac{m_1 \cdot m_2}{r^2},$$

где G – гравитационная постоянная $\left(G = 6,67 \cdot 10^{-11} \frac{\text{М}^3}{\text{кг} \cdot \text{с}^2} \right)$.

Исходя из закона всемирного тяготения, Ньютон объяснил движение небесных тел (планет, их спутников, комет) и создал теорию тяготения. Он показал, что из этого закона вытекают три закона Кеплера, объяснил особенности движения Луны, явление прецессии; развил теорию фигуры

Земли, отметив, что она должна быть сжата у полюсов, рассмотрел проблему создания искусственного спутника Земли.

Закон всемирного тяготения стал основой для создания небесной механики – науки, изучающей движение тел Солнечной системы.

Обобщив результаты исследования своих предшественников и свои собственные, Ньютон создал огромный труд «Математические начала натуральной философии», который был издан в 1687 году. В этом труде он изложил концепцию **абсолютного пространства и абсолютного времени**, согласно которой:

1. Абсолютное пространство представлялось *универсальнымместилищем* всех материальных тел в природе. Считалось, что если бы все эти тела вдруг исчезли, абсолютное пространство все равно бы осталось.

2. Аналогично, в образе текущей реки, представлялось и абсолютное время. Оно являлось *универсальной длительностью* всех процессов во Вселенной.

3. И абсолютное пространство, и абсолютное время *бесконечны, однородны, находятся вне материальных тел и не зависят от них*.

Таким образом, по Ньютону, пространство, время и материя представляют три не зависящих друг от друга сущности.

Ньютон полагал, что Вселенная находится *в стационарном состоянии*, то есть с течением времени её общие свойства не изменяются. Кроме того, она бесконечна во времени и в пространстве и заполнена бесконечным числом звёзд, вокруг которых вечно кружатся планеты. Он считал, что первый толчок Вселенной сообщил Бог, предоставивший затем телам возможность двигаться в соответствии с законами механики.

Уже в XVIII–XIX вв. появились первые сомнения в справедливости космологических представлений Ньютона. Так, немецкий астроном **Генрих Ольберс** (1758–1840 гг.) в начале XIX в. сформулировал знаменитый парадокс, получивший название *фотометрического*.

Парадокс Ольберса:

В бесконечной, вечной и неизменной Вселенной линия взгляда, устремлённого в любую точку небесной сферы, должна рано или поздно упереться в поверхность какой-нибудь звезды.

Поэтому во Вселенной, устроенной по Ньютону, всё ночное небо должно светиться, как поверхность Солнца, в то время как непосредственное наблюдение обнаруживает лишь отдельные светящиеся точки ближайших звёзд.

Первой попыткой описать на основе научных представлений направленное поступательное развитие, по крайней мере, ограниченной части Вселенной явилась *гипотеза Канта–Лапласа* (1796 г.) о происхождении Солнечной системы из газопылевого облака.

Механика Галилея – Ньютона впоследствии была развита в работах Жана Д'Аламбера, Жозефа Лагранжа, Пьера Лапласа, Уильяма Гамильтона, Карла Якоби и др. Эти учёные сделали механику аналитической, обладающей строгостью математического анализа. Благодаря им классическая механика получила стройную завершённую форму, основанную на принципах, определяющих естественнонаучную картину мира того времени, называемую *механической картиной мира*. В её рамках всё качественное многообразие мира объяснялось различиями в движении тел, подчиняющимся законам ньютоновской механики. Законы классической механики составляли основное содержание физической картины мира до начала XIX века.

1.2. Основные принципы механической картины мира

Основными принципами МКМ являются **принцип инерции**, **принцип относительности Галилея**, а также **принцип обратимости во времени**, **принцип механического детерминизма**, **принцип редукции** и **принцип дальнего действия**.

Принцип обратимости (или симметрии) во времени:

Все состояния механического движения тел по отношению ко времени оказываются в принципе одинаковыми, поскольку время считается обратимым.

Для описания механического движения необходимо и достаточно задать координаты тела и его скорость (или импульс) в начальный момент времени, а также знать уравнение движения тела. Все последующие состояния движущегося тела точно и однозначно определяются его первоначальным состоянием. Таким образом, задав это первоначальное состояние, можно определить любое другое состояние тела как в будущем, так и в прошлом. Получается, что время не оказывает никакого влияния на изменение состояния движущихся тел, и в уравнениях движения знак времени можно менять на обратный.

Подобное представление о времени, имеющее место в МКМ, является идеализацией реальных процессов, поскольку оно абстрагируется от фактических изменений, происходящих с телами с течением времени.

Так как в классической механике никак не учитывается направление времени, то для неё и механистической картины мира в целом характерна *симметрия процессов во времени*, которая выражается в *обратимости времени*.

В современных научных учениях – теории относительности и квантовой механике – время также продолжают рассматривать как простой параметр, знак которого можно менять на обратный. Только в новейших научных исследованиях по неравновесной термодинамике и особенно в

синергетике такие представления о времени начали подвергаться серьёзной критике, так как они противоречат не только нашим интуитивным представлениям и жизненному опыту, но и результатам исследований биологических и социальных систем, свидетельствующих о необратимости времени.

Принцип механического детерминизма (причинности) (от лат. *determino* – определяю), сформулированный первоначально Демокритом:

любые события влекут за собой определенные следствия и в то же время представляют собой следствия из некоторых других событий, совершавшихся ранее.

Демокрит понимал принцип детерминизма механистически, отождествляя *причинность* и *необходимость*. Он считал, что всё, происходящее в мире, не только причинно обусловлено, но и необходимо, неизбежно, и отвергал объективное существование *случайности*, говоря, что человек называет событие случайным, когда не знает (или не хочет узнать) причины события.

Одним из примеров того, что каждое явление имеет предшествующую ему причину, является второй закон Ньютона, согласно которому причиной изменения движения является сила. Кроме того, уравнения механики, показывают, что следствие из причины вытекает *однозначно*. При условии, что для какого-нибудь момента времени заданы положение и скорость этого тела (начальные условия), эти уравнения имеют единственное решение. Отыскав его, можно сказать, где находилось тело в любой момент прошлого и где оно будет находиться в любой будущий момент.

Сам окружающий нас мир в механической картине превращается в грандиозную машину, все последующие состояния которой точно и однозначно определяются её предшествующими состояниями. Такую точку зрения на природу наиболее ясно и образно выразил выдающийся французский ученый **Пьер Лаплас** (1749–1827гг.).

Лапласовский детерминизм:

любое существующее состояние Вселенной надо рассматривать как следствие предыдущего состояния и как причину последующего. Существо, которое было бы в состоянии в один момент схватить положение и скорости всех атомов Вселенной, открылось бы всё бесконечное будущее и прошлое Вселенной, в том числе любой поступок любого человека.

Принцип редукции – это метод сведения закономерностей более сложных форм движения материи к законам более простых форм.

После впечатляющих достижений классической механики представители других наук предприняли попытки объяснить с помощью законов Ньютона изучаемые ими химические, биологические процессы и даже

работу человеческого организма. Наметилась тенденция сведения закономерностей более высоких форм движения материи к законам простейшей его формы – механическому движению.

Такая тенденция со временем натолкнулась на оппозицию и в XVIII в. встретила критику со стороны химиков, биологов и медиков. Против этой тенденции выступили также выдающиеся философы-материалисты **Дени Дидро** (1713–1784 гг.) и **Поль Гольбах** (1723–1789 гг.), не говоря уже о *виталистах*, которые приписывали живым организмам особую «жизненную силу», наличием которой они отличаются от неживых тел.

Решая проблему взаимодействия тел, Ньютон предложил принцип дальнего действия. Согласно **принципу дальнего действия**:

взаимодействие между телами происходит мгновенно на любом расстоянии, без каких-либо материальных посредников, т.е. промежуточная среда не принимает участия в передаче взаимодействия.

1.3. Основные положения МКМ

В рамках механической картины мира сложилась *дискретная (корпускулярная) модель реальности*, которая отразилась в содержании фундаментальных понятий: материи, движения, пространства, времени и взаимодействия.

1. Материя рассматривается как вещество (материальные тела), состоящее из дискретных, неделимых, абсолютно твердых частиц – атомов, вечных и неизменных. Из неизменности атомов следует неизменность массы тел.

2. Атомы перемещаются в пространстве и во времени по неизменным законам движения. Следовательно, мир – это движущаяся материя. Однако в МКМ рассматривалась единственная форма *движения* материи – механическое движение.

Механическое движение – это изменение положения тела в пространстве с течением времени.

Считалось, что тела обладают внутренним врожденным свойством двигаться прямолинейно и равномерно, а отклонения от этого движения связаны с действием на тело внешних сил. Движение тел объяснялось на основе законов Ньютона. Закономерности более высоких сложных форм движения материи сводились к законам механического движения.

Движение, по Ньютону, можно описывать только относительно инерциальной системы отсчёта (в которой при отсутствии внешних воздействий тело движется прямолинейно и равномерно). Однако любая реальная система отсчёта не является инерциальной, что проявляется в возникновении сил инерции, для которых невозможно указать порождающий их источник.

3. В поисках идеальной системы отсчёта Ньютон выдвигает концепцию о том, что *пространство* и *время* – две самостоятельные сущности, которые находятся вне тел и не зависят от них, то есть имеют абсолютный характер.

Абсолютное пространство – бесконечная однородная протяжённость, пустоеместилище тел. Пространство трёхмерно, непрерывно, бесконечно, однородно, изотропно, постоянно и не зависит от материи.

Абсолютное время – бесконечная однородная длительность. Время не зависит ни от пространства, ни от материи.

4. Универсальным свойством материальных тел, построенных из атомов, является *тяготение (гравитация)*. Все многообразие взаимодействий механическая картина мира сводила только к *гравитационному взаимодействию*, которое означало наличие сил притяжения между любыми телами. Величина этих сил определялась законом всемирного тяготения.

Гравитационное взаимодействие тел объяснялось с позиций *принципа дальнего действия*: взаимодействие передается мгновенно на любые расстояния, без участия какого-либо материального агента в абсолютной пространственно-временной среде.

Считалось, что другие виды механических взаимодействий осуществляются при непосредственном контакте тел (трение, силы упругости).

5. В МКМ все наблюдаемые в природе явления сводились к *механическим процессам*.

На макроуровне – это движение и взаимодействие макроскопических тел, непосредственно окружающих человека.

На мегауровне – движение и взаимодействие небесных тел.

На микроуровне природные явления (например, тепловые, химические и др.) сводились к механике атомов – их перемещениям, столкновениям, сцеплениям, разъединениям. Таким образом, считалось, что природа повторяется на всех уровнях: *мегамир, макромир и микромир аналогичны*. Открытие закона сохранения и превращения энергии в середине XIX в., казалось, окончательно доказывало механическое единство мира: все виды энергии представлялось возможным свести к механической энергии.

6. В МКМ господствует *лапласовский детерминизм* – учение о всеобщей закономерной связи и причинной обусловленности всех явлений, согласно которому в природе принципиально отсутствует случайность. Случайность, реально наблюдаемая в природе, рассматривается как проявление неполноты знаний.

В МКМ природа предстаёт как монолит, внутри которого исчезает различие между живым и неживым, механическим и телесным.

7. Незыблемость природы объясняется отсутствием качественных изменений. Все изменения чисто количественные. Таким образом, в механистической картине мира *отсутствует развитие, она метафизична*.

8. Ещё одной важной чертой МКМ является идеализированное представление *о полной независимости исследуемого объекта и наблюдателя*. Позиция отстранённого наблюдателя предполагает, что сам процесс исследования никак не сказывается на изучаемом объекте, и его характеристики, определяемые эмпирически, остаются теми же, какие они есть у объекта «самого по себе».

1.4. Ограниченность МКМ

МКМ мира строилась на достаточно очевидных и простых механических аналогиях. И в повседневной практической деятельности людей основные выводы классической механики не приводили к противоречиям с опытными данными.

На основе МКМ в XVIII – начале XIX в. была разработана земная, небесная и молекулярная механика. Быстрыми темпами шло развитие техники. Это привело к абсолютизации механической картины мира, что выразилось в попытках свести всё многообразие явлений природы к механической форме движения материи. Такая точка зрения получила название *механистического материализма (механицизм)*.

Однако позже, с развитием средств измерений, выяснилось, что при изучении многих явлений, например небесной механики, необходимо учитывать сложные эффекты, связанные с движением частиц со скоростями, близкими к световым. Появились уравнения специальной теории относительности, не вмещающиеся в рамки механических представлений. Возникли трудности при описании тепловых и электромагнитных явлений (испускание, распространение и поглощение света), которые тоже не могли быть разрешены классической ньютоновской механикой. Изучая свойства микрочастиц, учёные выяснили, что в явлениях микромира частицы вещества могут обладать свойствами волны.

В МКМ природа рассматривалась как сложная механическая система. Жизнь и разум в ней не обладали никакой качественной спецификой. Человек рассматривался как природное тело в ряду других тел и поэтому оставался необъяснимым в своих «невещественных» качествах. Присутствие человека в мире ничего не меняло. Если бы человек однажды исчез с лица Земли, мир продолжал бы существовать как ни в чём не бывало. По сути дела, классическое естествознание не стремилось постичь человека. Подразумевалось, что природный мир, в котором нет ничего человеческого, можно описать объективно, и такое описание будет точной копией реальности. Рассмотрение человека как одного из винтиков хорошо отлаженной машины автоматически устраняло его из данной картины мира. Подобный взгляд являлся одним из недостатков МКМ.

В результате в XIX в. наступил кризис, который свидетельствовал о том, что физика нуждалась в существенном изменении своих взглядов на

мир. Эксперименты английского естествоиспытателя **Майкла Фарадея** и теоретические работы английского физика **Джеймса Максвелла** окончательно разрушили представления ньютоновской физики о дискретном веществе как единственном виде материи и положили начало электромагнитной картине мира. Открытие электромагнитного поля привело к противоречию с принципом дальнего действия. Оказалось, что взаимодействие заряженных тел и частиц осуществляется посредством электромагнитного поля и происходит не мгновенно, а с определённой скоростью.

Оценивая механическую картину мира как один из этапов развития физической картины мира, необходимо иметь в виду, что с развитием науки основные положения МКМ не были просто отброшены. Дальнейшее развитие науки лишь раскрыло относительный характер механической картины мира. Несостоятельной оказалась не сама МКМ, а её исходная философская идея – механицизм.

Законы классической механики с большой точностью (но всё же приближенно) описывают многие явления природы. До сих пор с помощью законов Ньютона осуществляется, например, расчет траекторий искусственных спутников Земли, проектирование и сооружение зданий, дорог, мостов, плотин, каналов, а также решаются другие многочисленные задачи, возникающие в повседневной человеческой жизни.

Контрольные вопросы

1. Дайте определение научной картины мира, естественнонаучной картины мира, физической картины мира.
2. На основе каких научных открытий сформировалась МКМ?
3. В чём суть гипотезы Левкиппа о строении вещества?
4. Как объясняли разнообразие всех тел в природе древнегреческие атомисты Демокрит и Эпикур?
5. Расскажите, как понимал движение Аристотель.
6. Опишите космологические представления Аристотеля и Птолемея.
7. Сформулируйте основные положения и законы статики Архимеда.
8. Как происходило формирование физических представлений в период средневековья? Опишите научные достижения учёных Оксфордского университета (Брадвардина, Гейтсбери), а также французских философов (Орема, Буридана, Саксонского).
9. Расскажите о достижениях Леонардо да Винчи в исследовании механических явлений и их практическом применении.
10. Опишите гелиоцентрическую систему мира Коперника.
11. Расскажите об идеях Джордано Бруно.
12. Дайте оценку роли экспериментальных исследований Галилея в становлении механики как науки. Сформулируйте принцип относи-

тельности Галилея. Расскажите об астрономических исследованиях Галилея.

13. Почему механика Галилея может справедливо рассматриваться как основа механики Ньютона?

14. Сформулируйте законы небесной механики Кеплера.

15. Дайте формулировку первого, второго и третьего законов Ньютона.

16. Сформулируйте закон всемирного тяготения. Какие теоретические выводы были сделаны Ньютоном на основе закона всемирного тяготения?

17. В чём суть ньютоновской концепции абсолютного пространства и времени?

18. Опишите космологические представления Ньютона. Сформулируйте парадокс Ольберса.

19. Сформулируйте принцип обратимости (симметрии) во времени.

20. В чём заключается лапласовский детерминизм?

21. Сформулируйте принцип редукции.

22. Сформулируйте принцип дальнего действия.

23. Каковы представления механической картины мира о материи? О движении? О пространстве и времени? О взаимодействии? О причинности и закономерности?

24. В чём ограниченность механической картины мира? Что такое механицизм?

ЛАБОРАТОРНЫЕ РАБОТЫ

Лабораторная работа № 1 ЭКСПЕРИМЕНТ КАК МЕТОД НАУЧНОГО ПОЗНАНИЯ. ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ФИЗИЧЕСКОГО ЭКСПЕРИМЕНТА

Цель работы – ознакомление с методами оценки результатов измерений и расчета погрешностей.

Приборы и принадлежности: исследуемые образцы; штангенциркуль; микрометр; лабораторная установка ФРМ – 01; пакет компьютерных программ по моделированию процесса измерений объёма цилиндра и удельного сопротивления проволоки.

ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ВВЕДЕНИЕ

1. ОБЩИЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ О НАУЧНОМ ПОЗНАНИИ

Научное познание – это активное, целенаправленное отражение и воспроизведение действительности в сознании человека, результатом которого является новое знание о мире.

Познание проходит две ступени – *чувственное* и *рациональное* (логическое) познание.

Чувственное познание – низшая ступень – осуществляется в форме *ощущений, восприятий и представлений*. В нём оказываются задействованными пять органов чувств – зрение, слух, осязание, обоняние и вкус, являющихся орудиями связи человека с внешним миром. Чувственные образы – это единственный источник всех наших знаний о внешнем мире. Но в чувственных образах фиксируется преимущественно внешняя сторона явлений.

На второй ступени – **рациональном (логическом) познании** – происходит выявление общего, существенного. Основными инструментами здесь выступают *мышление и разум*. Выделяя из данных, полученных с помощью органов чувств, существенное, человек с помощью *понятий, суждений и умозаключений* познает закономерности окружающего мира.

Эти ступени процесса познания – чувственная и рациональная – находятся в единстве, переходят друг в друга, взаимно дополняют друг друга.

В процесс познания включены также такие формы мыслительной деятельности, как *предвидение, фантазия, воображение, мечта, интуиция* (это формы внелогического *иррационального* познания).

2. МЕТОДЫ НАУЧНОГО ПОЗНАНИЯ

Конечный результат познания (новое знание об объектах и явлениях действительности) зависит от того, какими методами осуществляется познавательный процесс.

Метод (от греч. «*metodos*» – путь к чему-либо) – это совокупность приёмов и операций практического и теоретического познания действительности.

Он оптимизирует деятельность человека, вооружает его наиболее рациональными способами организации деятельности.

Основоположниками понятий метода и методологии в науке являются французские философы XVII в. **Фрэнсис Бэкон** (1561–1626 гг.) и **Рене Декарт**. Декарт называл методом «точные и простые правила», соблюдение которых способствует приращению знания, позволяет отличить ложное от истинного. Бэкон считал, что научный метод подобен фонарю, освещающему дорогу бредущему в темноте «путнику». Объясняя значение научного метода, Бэкон любил приводить ещё один афоризм: «даже хромой, идущий по дороге, опережает того, кто бежит без дороги». Только верный метод может привести к получению истинного знания, подлинной картины познаваемого предмета.

Классификация методов научного познания представлена на рис. 1.1.

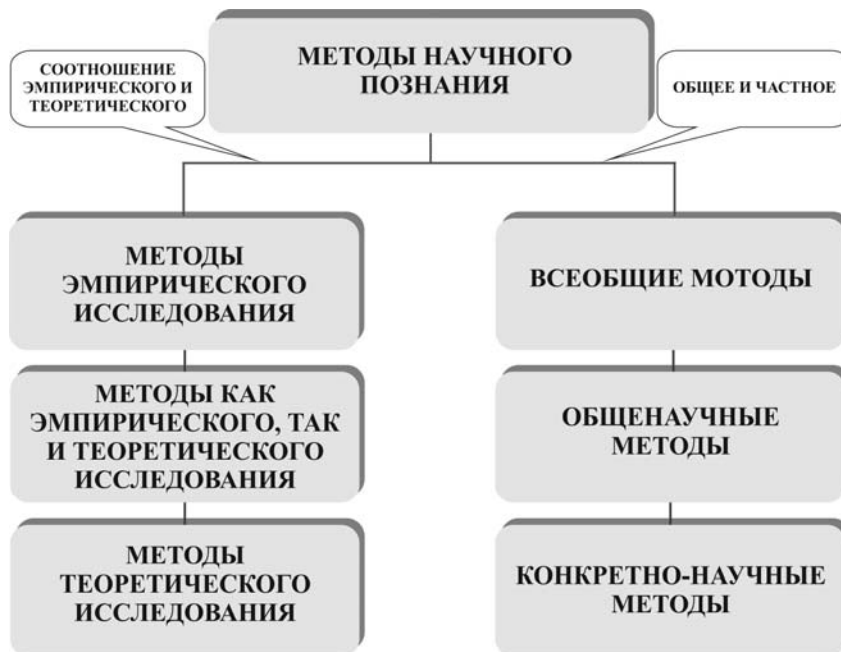


Рис. 1.1. Классификация методов научного познания

По степени общности и широте применения методы научного познания делятся на всеобщие (т.е. общечеловеческие приёмы мышления), общенаучные и методы конкретных наук (специальные методы).

Кроме того, методы познания классифицируют *по соотношению эмпирического знания* (т.е. знания, полученного в результате опыта, опытного знания) и *теоретического знания*, суть которого – познание сущности явлений, их внутренних связей.

3. ОБЩИЕ И ЧАСТНЫЕ МЕТОДЫ НАУЧНОГО ПОЗНАНИЯ

3.1. Всеобщие методы

Всеобщие методы познания касаются любого предмета, любой науки. Это общеполитические методы. В истории познания известны два прямо противоположных и несовместимых всеобщих метода: диалектический и метафизический.

Диалектический метод – это метод познания действительности в её противоречивости, целостности и развитии.

При *метафизическом подходе* объекты и явления окружающего мира рассматриваются изолированно друг от друга, без учёта их взаимной связи и развития.

До конца XIX в. в науке господствовал метафизический метод и лишь с XX в., благодаря новым научным идеям и открытиям, он уступил своё место диалектическому методу познания.

3.2. Общенаучные методы

Общенаучные методы используются в самых различных областях науки, т.е. имеют весьма широкий междисциплинарный спектр применения.

Соотношение общенаучных методов представлено на рис. 1.2.



Рис. 1.2. Общенаучные методы познания

Анализ и синтез

Анализ (от греч. *analysis* – расчленение) – *метод научного познания, в основе которого лежит процедура мысленного или реального разложения объекта на составляющие его части и их отдельное изучение.*

В качестве таких частей могут быть какие-то вещественные элементы объекта или же его свойства, признаки, отношения. Анализ – одна из начальных стадий исследования, на которой от целостного описания объекта переходят к его строению, составу, признакам и свойствам.

Когда путём анализа частности достаточно хорошо изучены, наступает следующая стадия познания – синтез.

Синтез (от греч. *synthesis* – соединение, сочетание, составление) – *метод научного познания, в основе которого лежит объединение познанных в результате анализа элементов в единое целое.*

Синтез не является простым механическим соединением элементов, разъединённых анализом. Он показывает место и роль каждого элемента в системе, его связь с другими составными частями системы.

Анализ и синтез – две стороны единого аналитико-синтетического метода познания, которые находятся в диалектическом единстве друг с другом. Анализ преобладает на начальной стадии исследования, а синтез – на заключительной.

Обобщение и абстрагирование

Обобщение – *логический процесс перехода от единичного к общему, от менее общего к более общему знанию.*

Путём обобщения устанавливаются общие свойства и признаки исследуемых объектов. Примерами обобщений являются: переход от суждения «этот металл проводит электричество» к суждению «все металлы проводят электричество»; от суждения «механическая форма энергии превращается в тепловую» к суждению «всякая форма энергии превращается в тепловую».

Результатом обобщения является обобщенное понятие, суждение, закон или теория.

Обобщение тесно связано с абстрагированием и идеализацией, в ходе которых образуются *научные понятия.*

Абстрагирование (от лат. *abstractio* – удаление, отвлечение) – *это мысленное отвлечение от каких-то менее существенных свойств, сторон, признаков изучаемого объекта с одновременным выделением и фиксированием одной или нескольких интересующих исследователя сторон этого объекта.*

Например, Иоганну Кеплеру были неважны красный цвет Марса или температура Солнца для установления законов обращения планет.

Посредством абстрагирующей работы мышления возникли все понятия и категории естественных и социально-экономических наук: материя,

движение, масса, энергия, пространство, время, растение, животное, биологический вид, товар, деньги, стоимость и др.

Специфическим видом абстрагирования является идеализация.

Идеализация – это мыслительное образование абстрактных объектов, не существующих и не осуществимых в действительности, но для которых имеются прообразы в реальном мире.

Такие идеальные объекты, как правило, наделены каким-либо одним интересующим исследователя свойством.

Примерами понятий, являющихся результатом идеализации, являются «материальная точка», «абсолютно чёрное тело», «идеальный газ». С помощью таких понятий можно строить абстрактные схемы реальных процессов, служащие для более глубокого их понимания.

Индукция и дедукция

Индукция (от лат. *inductio* – наведение, побуждение) – метод исследования и способ рассуждения, при котором общий вывод о свойствах предметов и явлений строится на основе отдельных фактов или частных посылок (познание от частного к общему).

Родоначальником классического индуктивного метода познания является *Френсис Бэкон*. Методом индукции осуществляется переход от анализа фактов к синтезу полученных знаний, то есть к нахождению эмпирических зависимостей между экспериментально наблюдаемыми свойствами объектов и явлений. Знание, получаемое с помощью этого метода, является не достоверным, а вероятным, причём различной степени точности.

Индукция не может существовать в отрыве от дедукции.

Дедукция (от лат. *deductio* – выведение) – переход от общих рассуждений или суждений к частным выводам (познание от общего к частному).

Дедукция позволяет, исходя из уже познанных законов и принципов, выводить новые положения с помощью законов и правил логики. Поэтому метод дедукции не приводит к получению содержательно нового знания. Этот метод имеет первостепенное значение в теоретических науках как орудие их логического упорядочения и построения, особенно когда известны истинные положения, из которых можно получить логически необходимые следствия. Особенно широко он используется математиками, которые оперируют математическими абстракциями и строят свои рассуждения на общих положениях. Эти общие положения применяются к решению частных, конкретных задач.

В науке Нового времени пропагандистом дедуктивного метода был *Рене Декарт*.

Аналогия и моделирование

Аналогия (от греч. *analogia* – соответствие, сходство) – метод познания, при котором происходит перенос знания, полученного при рассмотрении какого-либо объекта, на другой объект, менее изученный, но схожий с первым по каким-то существенным свойствам.

При этом объект, который подвергается исследованию, именуется *моделью*, а другой объект, на который переносится информация, полученная в результате исследования модели, называется *оригиналом* (прототипом, образцом).

Метод аналогии основывается на сходстве предметов по ряду каких-либо признаков, причём сходство устанавливается в результате сравнения предметов между собой.

Многие важные открытия в сфере естествознания были сделаны путём переноса общих закономерностей, свойственных одной области явлений, на явления другой области. Так, *Христиан Гюйгенс* на основании аналогии свойств света и звука пришел к выводу о волновой природе света. По аналогии с искусственным отбором лучших пород домашних животных *Чарльз Дарвин* открыл закон естественного отбора в животном и растительном мире. Аналогии с механизмом действия мышц, мозга, органов чувств животных и человека подтолкнули к изобретению многих технических сооружений: экскаваторов, роботов, логических машин.

Метод аналогии применяется в математике, физике, химии, в гуманитарных и других дисциплинах. Он тесно связан с методом моделирования.

Моделирование (от лат. *modelium* – мера, образ) – это изучение объекта (*оригинала*) путем создания и исследования его копии (*модели*), замещающей оригинал с определённых сторон, интересующих исследователя.

Сущность моделирования состоит в том, что непосредственно исследуется не сам объект, а его аналог (заместитель, модель), а затем полученные при изучении модели результаты по особым правилам переносятся на сам объект (прототип).

Потребность в моделировании возникает в тех случаях, когда сам объект либо труднодоступен, либо его прямое изучение экономически невыгодно (дорого) или требует слишком длительного времени.

Точнее всего свойства прототипа воспроизводят *математические* (и основанные на них *компьютерные*) модели. Они представляют собой совокупность математических уравнений для величин, характеризующих прототип. Математическое моделирование возможно, если закономерности, управляющие поведением и свойствами изучаемого объекта, известны достаточно точно. Поэтому использование математических моделей характерно для наиболее развитых разделов науки. Если же закономерности известны неточно или оказываются слишком сложными для

математического моделирования, то используют *натурные* модели, воспроизводящие геометрические, физические, динамические или функциональные характеристики объекта. Например, на таких моделях исследуются аэродинамические качества самолетов и других машин, ведётся разработка различных сооружений (плотин, мостов, электростанций и др.).

Исторический и логический методы

Для изучения сложных развивающихся объектов, которые не могут быть воспроизведены в опыте, применяются особые методы исследования: *исторический* и *логический*.

Исторический метод – это воспроизведение деталей и фактов познаваемого объекта во всем конкретном многообразии его исторического развития.

Этот метод предполагает изучение истории возникновения изучаемого явления, основных этапов его развития с учётом всех зигзагов и случайностей, а также его современного состояния.

Областью применения исторического метода является, прежде всего, исследование человеческой истории. Однако данный метод используется также в целях познания различных явлений живой и неживой природы. Так, изучение различных геологических явлений (образование морей, рек, лесных массивов, нефти, газа, горообразование) опирается на исследование всей истории происходивших на Земле процессов. Кроме того, исторический метод познания часто применяется в экономике. Он позволяет конкретно и наглядно представить все особенности каждой экономической системы на разных этапах её исторического развития. Однако исторический подход к анализу хозяйственной деятельности таит в себе существенные недостатки. Обилие описательного материала и частных исторических подробностей может затруднять теоретическое изучение экономики. Подобным путём не удастся четко выявить типические черты систем производства. Преодолеть эти недостатки помогает логический метод.

Логический метод – это метод воспроизведения в мышлении сложного развивающегося объекта в форме определенной теории.

При логическом исследовании объекта отвлекаются от всех исторических случайностей, несущественных фактов, зигзагов и даже попятных движений, вызванных теми или иными событиями. Из истории вычленяется самое главное, существенное, определяющее общий ход и направленность развития. Она рассматривается, грубо говоря, не такой, какой была, а в «исправленном» виде. Логически воспроизведенная история – это действительная история, но обобщенная, освобожденная от всего несущественного, случайного, наносного. В ней сохраняется только то, что существенно, необходимо и закономерно. Иначе говоря, логическое воспроизведение истории должно в общем и целом соответствовать дей-

ствительной, эмпирической истории. Этого требует и принцип единства исторического и логического.

Использование логического метода помогает глубже понять причинно-следственные зависимости в экономике. Например, люди не всегда замечают, что между хозяйственными процессами существуют определенные отношения, которые изменяются во времени и в пространстве с естественной последовательностью, называемой объективной логикой (внутренней закономерностью развития хозяйственных явлений). Если по какой-то причине приостанавливается добыча нефти, то это с неизбежностью влечет за собой множество нежелательных последствий: прекращают работать нефтеперерабатывающие заводы, предприятия нефтехимии, не производится моторное топливо, отключаются тепловые электростанции и т.д.

Чтобы освободиться от стихийных сил хозяйственного развития, или, по крайней мере, уменьшить их разрушительные последствия, экономическая наука стремится как можно полнее и глубже познать объективную логику экономического развития в масштабе каждого предприятия, страны и всего мира. Полученные теоретические и практические выводы используются для прогнозирования и улучшения управления хозяйством.

Исторический и логический методы взаимосвязаны. Исторический метод предполагает исследование конкретного процесса развития, а логический метод – исследование общих закономерностей движения объекта познания.

Классификация (от лат. *classis* – разряд, класс) – *разделение всех изучаемых объектов на отдельные группы в соответствии с каким-либо важным для исследователя признаком.*

Особенно часто классификация используется в описательных науках – многих разделах биологии, геологии, географии, кристаллографии. Классификация упорядочивает информацию. В процессе изучения новых объектов в отношении каждого такого объекта делается вывод: принадлежит ли он к уже установленным классификационным группам. В некоторых случаях при этом обнаруживается необходимость перестройки системы классификации. Существует специальная теория классификации – *таксономия*. Она рассматривает принципы классификации и систематизации сложноорганизованных областей действительности, имеющих обычно иерархическое строение (органический мир, объекты географии, геологии и т.п.).

Одной из первых классификаций в естествознании явилась классификация растительного и животного мира выдающегося шведского натуралиста *Карла Линнея* (1707–1778 гг.). Для представителей живой природы он установил определенную градацию: класс, отряд, род, вид, вариация.

3.3. Методы конкретных наук

Конкретно-научные (частные) методы научного познания – это специальные методы, действующие только в пределах отдельной отрасли науки.

Специальные методы, применяемые, например, в археологии, зоологии или географии, обычно не выходят за пределы этих наук. Таков, в частности, метод кольцевания птиц, применяемый в зоологии. Иногда частные методы могут использоваться за пределами той области знания, в которой они возникли. Так, методы физики, применяемые в других отраслях естествознания, привели к созданию астрофизики, геофизики, кристаллофизики и других междисциплинарных наук. Нередко комплекс взаимосвязанных частных методов применяется к изучению одного предмета. Например, молекулярная биология одновременно пользуется методами физики, математики, химии, кибернетики.

Хотя частные методы и способы исследования в разных науках могут заметно отличаться друг от друга, однако общий подход этих методов к процессу познания остается в сущности одним и тем же. Все они определяют тактику исследования. Стратегию исследования определяют особенные методы познания. Кроме того, все частные методы познания связаны с определенными сторонами или сочетаниями особенных методов.

4. МЕТОДЫ ЭМПИРИЧЕСКОГО И ТЕОРЕТИЧЕСКОГО ПОЗНАНИЯ

Методы научного познания можно классифицировать и по другим основаниям деления, например *по уровню познания явлений*.

В структуре естественнонаучного познания четко выделяются два уровня познавательной деятельности – *эмпирический* и *теоретический*, каждый из которых характеризуется особенными методами научного познания и формами организации научного знания.

Эмпирический уровень характеризуется непосредственным исследованием реально существующих, чувственно воспринимаемых объектов. На этом уровне осуществляется процесс накопления информации об исследуемых объектах (путем наблюдений, измерений, экспериментов) и происходит первичная систематизация полученных знаний (в виде таблиц, схем, графиков).

На эмпирическом уровне складываются основные формы знания – *научный факт* и *закон*.

Теоретический уровень научного исследования осуществляется на рациональной (логической) ступени познания. Здесь происходит выявление наиболее глубоких, существенных сторон, связей, закономерностей, присущих изучаемым объектам, явлениям.

К теоретическому уровню относятся те методы познавательной деятельности и способы организации знания, которые характеризуются той или иной степенью опосредованности и обеспечивают создание, построение и разработку научной теории (логически организованного знания о законах, необходимых связях и отношениях предметной области данной науки).

Эмпирический и теоретический уровни познания взаимосвязаны и обуславливают друг друга. Эмпирический уровень выступает в качестве основы (фундамента) теоретического.

Методы эмпирического и теоретического познания схематично представлены на рис. 1.3.



Рис. 1.3. Методы эмпирического и теоретического познания

Методы эмпирического познания используются в самых различных областях науки, т.е. имеют весьма широкий междисциплинарный спектр применения. К ним относятся наблюдение, описание, эксперимент, измерение, сравнение.

Наблюдение – это преднамеренное и целенаправленное восприятие явлений и процессов без прямого вмешательства в их течение, подчиненное задачам научного исследования.

Наблюдения используются там, где нельзя поставить прямой эксперимент (например, в вулканологии, космологии).

Научные наблюдения являются источником первичной информации об окружающем мире. Они проводятся для сбора фактов, подтверждающих или опровергающих ту или иную гипотезу и являющихся основой для определенных теоретических обобщений.

По способу проведения наблюдения могут быть *непосредственными* и *опосредованными*.

При непосредственных наблюдениях свойства объекта воспринимаются органами чувств человека.

Опосредованные наблюдения осуществляются с использованием приборов, которые, во-первых, усиливают органы чувств, а во-вторых, снимают налёт субъективизма с оценки наблюдаемых явлений.

В некоторых областях естествознания, например в астрономии, наблюдение остается единственным эмпирическим методом исследования.

Результаты наблюдения фиксируются в описании.

Описание – это фиксация результатов наблюдения с помощью соответствующих средств записи информации, таблиц, схем, графиков и т.п.

Описание отмечает те свойства и стороны изучаемого объекта, которые являются предметом исследования. Оно фиксирует и организует факты, даёт их качественную и количественную характеристику, вводит факты в систему выработанных в данной науке понятий, категорий, подготавливает фактический материал для объяснения.

Описание должно быть максимально полным, точным и объективным. Ведь оно должно дать достоверную и адекватную картину изучаемого явления. Именно описания результатов наблюдений составляют эмпирический базис науки, на их основе создаются эмпирические обобщения, систематизации и классификации.

Более сложным, по сравнению с наблюдением, методом эмпирического познания является эксперимент.

Эксперимент – это целенаправленное и строго контролируемое воздействие исследователя на изучаемый объект для изучения различных его сторон, связей и отношений.

Эксперимент включает в себя другие методы эмпирического исследования (наблюдение, измерение). В то же время он обладает рядом особенностей:

- 1) эксперимент позволяет изолировать исследуемый объект от влияния всякого рода побочных факторов;
- 2) в ходе эксперимента объект может быть поставлен в некоторые искусственные, в частности, экстремальные условия;
- 3) во время эксперимента многократно воспроизводится ход процесса;
- 4) экспериментатор может вмешиваться в изучаемый процесс и активно влиять на его протекание.

В зависимости от характера решаемых проблем, эксперименты подразделяются на исследовательские и проверочные.

Исследовательские эксперименты дают возможность обнаружить у объекта новые, неизвестные свойства. Результатом такого эксперимента могут быть выводы, которые не могли быть получены из имевшихся знаний об объекте исследования.

Примером могут служить эксперименты, поставленные в лаборатории Эрнеста Резерфорда, в ходе которых обнаружилось странное поведение альфа-частиц при бомбардировке ими золотой фольги: большинство частиц проходило сквозь фольгу, небольшое количество частиц отклонялось и рассеивалось, а некоторые частицы не просто отклонялись, а отскакивали обратно, как мяч от сетки. Такая экспериментальная картина, согласно расчётам, получалась в силу того, что вся масса атома сосредоточена в ядре, занимающем ничтожную часть его объема (отскакивали обратно альфа-частицы, соударявшиеся с ядром). Так, исследовательский эксперимент, проведенный Резерфордом и его сотрудниками, привел к обнаружению ядра атома, а тем самым и к зарождению ядерной физики.

Проверочные эксперименты служат для проверки и подтверждения тех или иных теоретических построений. Так, существование целого ряда элементарных частиц (позитрона, нейтрино и др.) было вначале предсказано теоретически, и лишь позднее они были обнаружены экспериментальным путём.

Наблюдение и эксперимент являются источниками научных фактов, под которыми в науке понимаются особого рода предположения, фиксирующие эмпирическое знание. Факты – фундамент здания науки, они образуют эмпирическую основу науки, базу для выдвижения гипотез и создания теорий.

Большинство научных экспериментов и наблюдений включают в себя проведение различных измерений.

Измерение – это определение количественных значений изучаемых сторон или свойств объекта исследования с помощью специальных технических устройств.

Эти устройства могут работать как в руках человека, так и в автоматическом режиме. Современные компьютеры позволяют проводить не только процедуру измерения, но и обрабатывать полученные данные.

Результатом измерения является получение некоторого числа единиц измерения. *Единица измерения* – это эталон, с которым сравнивается измеряемая сторона объекта или явления. В настоящее время в естествознании используется преимущественно Международная система единиц измерения (СИ), принятая в 1960 г. XI генеральной конференцией по мерам и весам. Частным случаем измерения является сравнение.

Сравнение – это метод научного познания, позволяющий установить сходство и различие изучаемых объектов.

Сравнение лежит в основе многих естественнонаучных измерений, составляющих неотъемлемую часть любых экспериментов. Сравнивая объекты между собой, человек получает возможность правильно познавать их и тем самым правильно ориентироваться в окружающем мире, целенаправленно воздействовать на него. Будучи необходимым приёмом познания, сравнение играет важную роль в практической деятельности человека

и в естественнонаучном исследовании, когда сравниваются действительно однородные и близкие по своей сущности объекты.

Если эмпирическое познание констатирует, *как происходит событие*, то теоретическое познание отвечает на вопрос, *почему оно происходит именно таким образом*.

К методам теоретического познания относятся формализация, аксиоматизация и гипотетико-дедуктивный метод.

Формализация – особый подход в научном познании, который заключается в *использовании специальной символики, позволяющей отвлечься от изучения реальных объектов, от содержания описывающих их теоретических положений и оперировать вместо этого некоторым множеством символов (знаков)*.

Примерами формализации являются широко используемые в науке математические описания различных объектов, явлений, основывающиеся на соответствующих содержательных теориях. Используемая при этом математическая символика не только помогает закрепить уже имеющиеся знания об исследуемых объектах и явлениях, но и выступает своего рода инструментом в процессе дальнейшего их познания. Формализация обеспечивает краткость и четкость записи научной информации, что открывает большие возможности для оперирования ею. Вряд ли удалось бы успешно пользоваться, например, теоретическими выводами *Джеймса Максвелла*, если бы они не были компактно выражены в виде математических уравнений, а описывались бы с помощью обычного, естественного языка.

Аксиоматизация – метод построения теории на основе аксиом – утверждений, доказательства истинности которых не требуется.

Этот метод широко используется практически во всех достаточно математизированных естественнонаучных теориях. Его суть заключается в том, что в этих теориях формулируют ограниченное число основных законов (аксиом), из которых путём строгих математических или логических выводов получают остальное содержание данной теории. Например, так выводят всё содержание классической механики из трёх законов *Ньютона*.

Гипотетико-дедуктивный метод – один из методов рассуждения, основанный на выведении (дедукции) заключений из гипотез и других посылок, истинное значение которых неопределенно.

В основе метода лежит постулат о том, что развитое теоретическое знание строится не за счет процедур индуктивного обобщения экспериментальных данных и фактов, т.е. «снизу», а разворачивается как бы «сверху» по отношению к последним. С логической точки зрения, гипотетико-дедуктивная система представляет собой *иерархию гипотез*, степень абстрактности и общности которых увеличивается по мере удаления от эмпирического базиса. На вершине располагаются гипотезы, имеющие

наиболее *общий характер* и поэтому обладающие наибольшей логической силой. Из них как из посылок выводятся гипотезы более низкого уровня. Они выступают как следствия к гипотезам верхнего уровня. На самом низшем уровне системы находятся гипотезы, которые можно сопоставить с эмпирическими данными.

В научном познании гипотетико-дедуктивный метод получил широкое распространение в XVII–XVIII вв., когда были достигнуты значительные успехи в области изучения механического движения земных и небесных тел. Первые попытки применения гипотетико-дедуктивного метода были предприняты в механике, в частности в исследованиях *Галилео Галилея*. Теория механики, изложенная в «Математических началах натуральной философии» *Исаака Ньютона*, представляет собой гипотетико-дедуктивную систему, посылками которой служат основные законы движения.

5. ПОГРЕШНОСТИ ИЗМЕРЕНИЙ

Изучение явлений материального мира связано с измерением физических величин.

Измерение – это последовательность экспериментальных и вычислительных операций, осуществляемых для нахождения значения заданной физической величины.

В зависимости от способа получения результата следует различать измерения прямые и косвенные.

При **прямых** измерениях результат получается непосредственно в ходе наблюдения или эксперимента. Например, измерение длины стола линейкой, силы тока – амперметром, напряжения на участке цепи – вольтметром.

При **косвенных** измерениях результат получается после вычислительных операций, произведенных над результатами прямых измерений. Например, косвенными являются измерения площади стола, сопротивление участка цепи и др. Площадь стола вычисляют по формуле

$$S = a \cdot b,$$

где a и b – длина и ширина стола.

Сопротивление участка цепи рассчитывают по формуле

$$R = \frac{U}{I},$$

где U и I – показания вольтметра и амперметра.

Косвенные измерения сложнее прямых, но они применяются достаточно часто, особенно при экспериментальных исследованиях.

Измерения включают в себя следующие элементы:

1) физический объект (например, цилиндр);

2) технические средства измерений (например, штангенциркуль и микрометр);

3) наблюдателя (или регистрирующее устройство), который воспринимает результат измерений.

В процессе прямых измерений всегда действует множество факторов, приводящих к искажению результата измерения. Степень искажения результата характеризуют величиной погрешности измерения.

Погрешностями измерений называют отклонения результатов измерений от истинного значения измеряемой величины.

Все погрешности принято подразделять на систематические, случайные и промахи.

Промахи (грубые погрешности) возникают вследствие недосмотра наблюдателя или необнаруженной неисправности инструмента (прибора). Промахи исключаются из результатов измерений.

Случайные погрешности обусловлены как несовершенством органов чувств наблюдателя, так и условиями проведения эксперимента. Случайных погрешностей избежать нельзя. Они могут и завышать результат измерения, и занижать его, причём каждый раз в разной степени. Для уменьшения влияния случайных погрешностей на результат необходимо многократно выполнить одно и то же измерение, затем найти среднее значение измеряемой величины. Чем больше измерений проведено, тем ближе будет результат усреднения к истинному значению измеряемой величины.

Систематические погрешности появляются вследствие неточности приборов и несовершенства методов измерений. Систематические погрешности не зависят от числа измерений. Они остаются постоянными в течение времени проведения эксперимента и могут быть исключены введением поправок.

Погрешности приборов

В лабораторных работах метод измерений обычно задан, поэтому из систематических погрешностей учитываются только приборные.

Все приборы и инструменты, используемые для измерений физических величин: амперметр, вольтметр и т.д., характеризуются классом точности и (или) ценой деления.

Класс точности L прибора – это обобщенная характеристика, показывающая относительную погрешность прибора, выраженную в процентах.

Класс точности обозначается числом на шкале прибора: 0,1; 0,2; 0,5; 1,0; 1,5; 2,5; 4. Приборы класса точности 0,1; 0,2; 0,5 применяются для точных измерений и называются *прецизионными*. В технике применяют приборы классов 1,0; 1,5; 2,5; 4, которые называются *техническими*. Если

на шкале прибора класс точности не указан, то данный прибор внеклассный, то есть имеет большую погрешность измерений.

Абсолютная систематическая погрешность $\Delta_c X$ прибора

$$\Delta_c X = \frac{L \cdot D}{100\%}, \quad (1.1)$$

где D – предел измерений, т.е. наибольшее значение физической величины, которое может быть измерено по шкале прибора.

Если класс точности прибора неизвестен, то его абсолютная систематическая погрешность $\Delta_c X$ принимается равной половине цены наименьшего деления шкалы:

$$\Delta_c X = \frac{\text{цена деления прибора}}{2}. \quad (1.2)$$

При измерении линейкой, наименьшее деление которой 1 мм, допускается погрешность $0,5$ мм.

Для приборов, оснащенных нониусом, за приборную принимают погрешность, определяемую нониусом. Для штангенциркуля (рис. 1.4) – $0,1$ мм или $0,05$ мм; для микрометра (рис. 1.6) – $0,01$ мм.

Штангенциркуль – прибор для наружных и внутренних измерений. Он построен по принципу штанги 1 с основной шкалой, представляющей собой миллиметровую линейку, и подвижной рамки 2 с нониусом 3 (см. рис.1.4). Рамка может передвигаться по штанге. Закрепление рамки на штанге осуществляется с помощью винта 4 . **Нониус** – это вспомогательная шкала штангенциркуля, расположенная на рамке и служащая для отсчета долей миллиметра. В нашей стране стандартизированы штангенциркули с нониусами $0,1$, $0,05$ и $0,02$ мм. Отсчет размеров производится по основной шкале и нониусу.

На рис. 1.4 представлен штангенциркуль с нониусом $0,05$ мм. Шкала этого нониуса получена при делении 39 мм на 20 частей. Следовательно, каждое деление нониуса равно $1,95$ мм, то есть на $0,05$ мм меньше делений основной шкалы. Если расположить нониус ровно так, что первый штрих нониуса совпадет с первым штрихом основной шкалы, то основное деление нониуса отойдет от основного деления шкалы на $0,05$ мм. Для получения нониуса с ценой деления $0,1$ мм делят 19 мм на 10 частей ($19 \text{ мм} : 10 = 1,9 \text{ мм}$), тогда каждое деление нониуса будет на $0,1$ мм меньше, чем 1 мм.

Измеряемый предмет располагают между ножками 5 и 6 штангенциркуля и закрепляют винтом 4 . Целые значения в миллиметрах отсчитывают по основной шкале от «0» основной шкалы до «0» нониуса. Затем смотрят, какое деление нониуса совпало с делением основной шкалы. Если номер совпавшего деления нониуса умножить на цену деления прибора, то полу-

чаются сотые доли миллиметра. Если с делением основной шкалы совпадает нулевое или последнее деления нониуса, то сотых долей не будет.

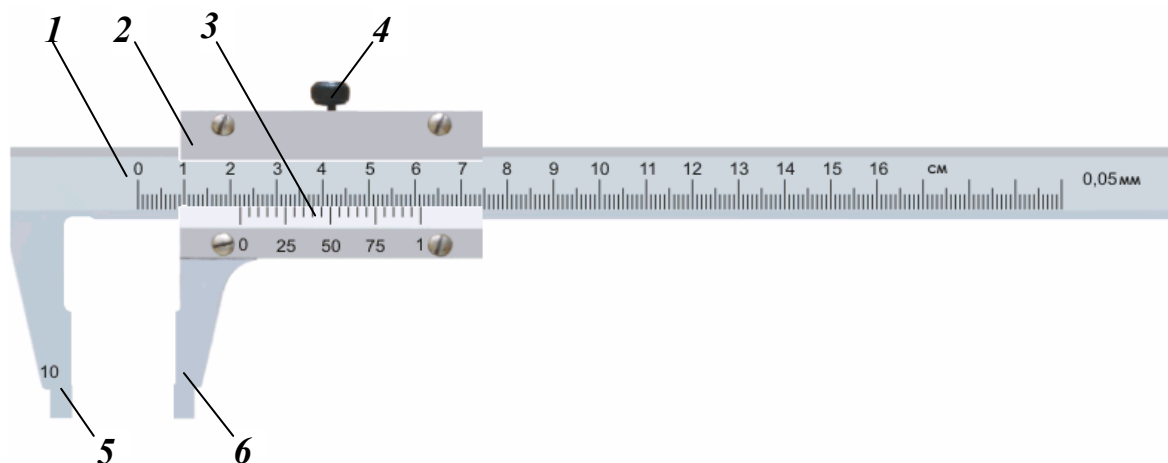


Рис. 1.4. Штангенциркуль

На рис. 1.5 представлены измерения штангенциркуля с нониусом $0,05\text{ мм}$.

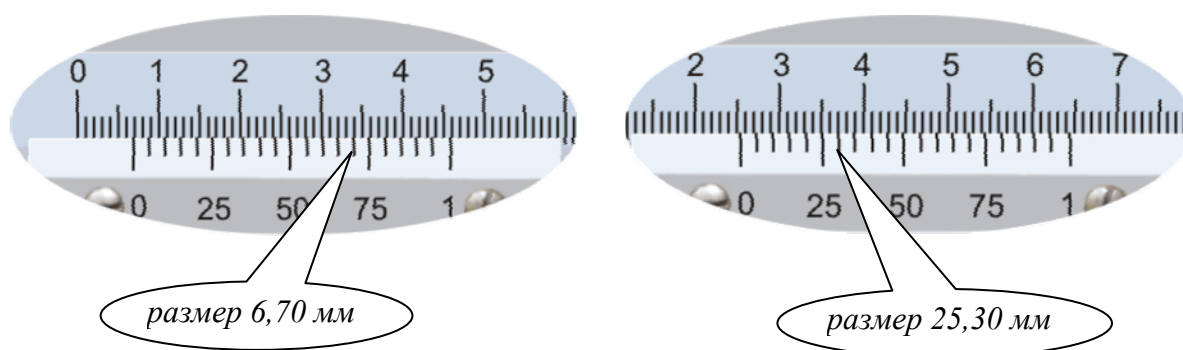


Рис. 1.5. Измерения штангенциркуля

Микрометр – это инструмент, применяемый для точных измерений. Принцип действия микрометра основан на работе винтовой пары, то есть преобразовании вращательного движения в поступательное.

В скобе 1 микрометра при вращении барабана 4 перемещается микрометрический винт 3, между торцом которого и пяткой 2 помещают измеряемую деталь (см. рис. 1.6). Шаг микрометрического винта равен $0,5\text{ мм}$, а конусная поверхность барабана разделена на 50 равных частей. Следовательно, поворот барабана на одно деление соответствует перемещению винта на $0,01\text{ мм}$. Вращение барабана нужно производить с помощью трещотки 6, обеспечивающей постоянное усилие на измеряемую деталь. Зажим детали производят, вращая трещотку до появления первого треска во избежание порчи инструмента.

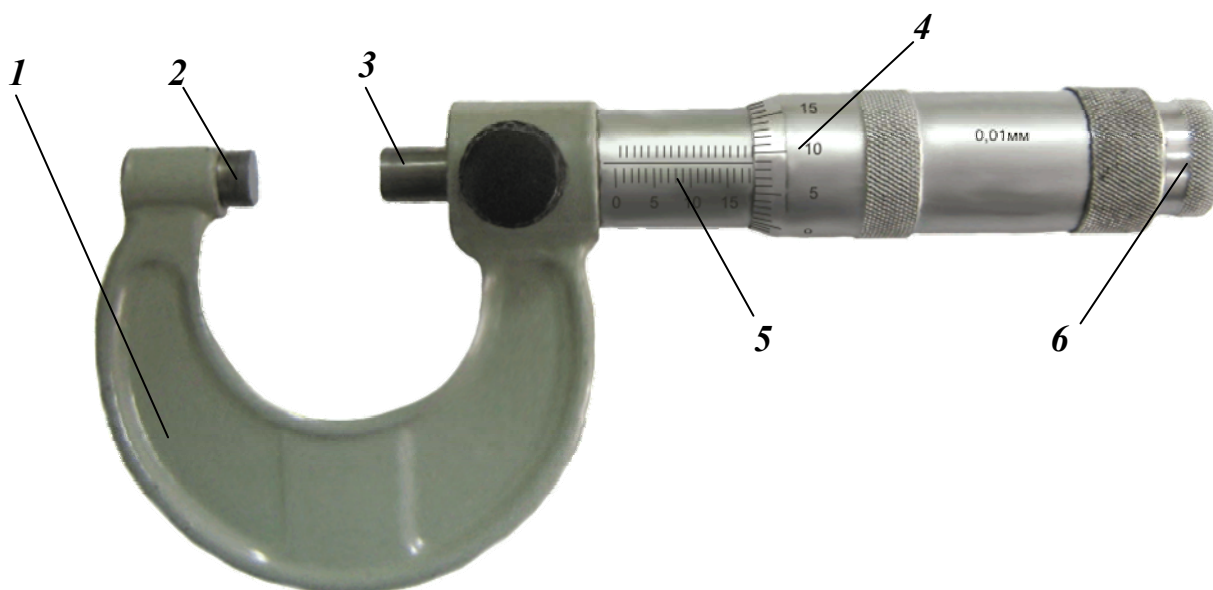


Рис. 1.6. Микрометр

На стебле 5 микрометра расположены две шкалы. Деления нижней шкалы нанесены через 1 мм, деления верхней расположены посередине между штрихами нижней шкалы. По нижней шкале отсчитывают целые миллиметры, а по верхней – половину миллиметра. При измерении встречаются два характерных случая. В первом случае (рис. 1.7) деления нижней шкалы расположены ближе к барабану, нежели деления верхней шкалы. При этом целые значения миллиметров отсчитываются по нижней шкале, а сотые доли – по барабану. Например, показания инструмента соответствуют размеру 18,04 мм. Во втором случае деления верхней шкалы расположены ближе к барабану, чем деления нижней шкалы. При этом учитываются целые, половинка и сотые доли миллиметра. Например, показания инструмента соответствует размеру 18 целых + половинка 0,50 + 9 сотых, то есть 18,59 мм.

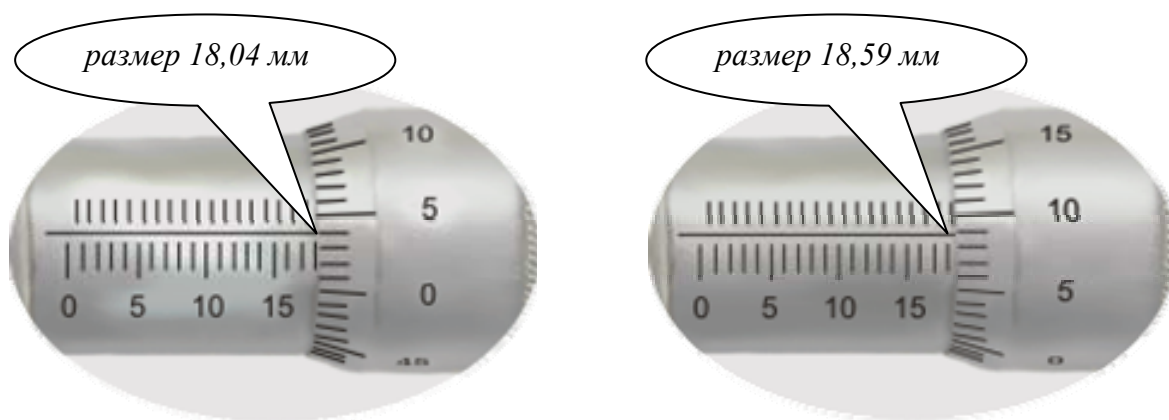


Рис. 1.7. Измерения микрометра

Оценка точности прямых измерений

Для наиболее точного определения искомой физической величины измерение её значения производят несколько раз. При многократном измерении возможно получение результата как большего, так и меньшего, чем истинное значение измеряемой величины.

Пусть величину X измеряли n раз и получили множество значений величины:

$$X = X_i \{X_1, X_2, X_3, \dots, X_n\}, \quad (1.3)$$

где i – номер измерения; n – число измерений.

Хорошим приближением к истинному значению измеряемой величины является его **среднеарифметическое значение** $\langle X \rangle$:

$$X_{\text{ист}} \approx \langle X \rangle = \frac{X_1 + X_2 + X_3 + \dots + X_n}{n} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i. \quad (1.4)$$

Абсолютная случайная погрешность $\overset{\circ}{\Delta} X$ n -измерений имеет размерность измеряемой величины и определяется по формуле

$$\begin{aligned} \overset{\circ}{\Delta} X &= \sqrt{\frac{(X_1 - \langle X \rangle)^2 + (X_2 - \langle X \rangle)^2 + (X_3 - \langle X \rangle)^2 + \dots + (X_n - \langle X \rangle)^2}{n(n-1)}} = \\ &= \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \langle X \rangle)^2}{n(n-1)}}. \end{aligned} \quad (1.5)$$

Для оценки **суммарной абсолютной погрешности измерений** ΔX необходимо знать случайную составляющую погрешности $\overset{\circ}{\Delta} X$ и систематическую составляющую погрешности $\Delta_c X$.

Тогда

$$\Delta X = \sqrt{\overset{\circ}{\Delta} X^2 + \Delta_c X^2} \quad (1.6)$$

Результат измерений записывается в виде:

$$X = \langle X \rangle \pm \Delta X. \quad (1.7)$$

Абсолютная погрешность ΔX не дает полной информации о точности измерений. Поэтому качество измерений характеризуют **относительной погрешностью** δX , показывающей, какая часть абсолютной погрешности приходится на каждую единицу измеряемой величины.

Относительная погрешность равна отношению абсолютной погрешности к среднеарифметическому значению измеряемой величины.

$$\delta X = \frac{\Delta X}{\langle X \rangle} \cdot 100\%. \quad (1.8)$$

Результат измерений физической величины считается хорошим, если относительная погрешность **не превышает 5 %** .

Оценка точности косвенных измерений

В случае косвенных измерений величина $\langle X \rangle$ определяется по результатам измерений других величин.

Пусть X является некоторой функцией y и z , то есть:

$$X = f(y; z). \quad (1.9)$$

Тогда среднее значение измеряемой величины $\langle X \rangle$ равно

$$\langle X \rangle = f(\langle y \rangle, \langle z \rangle); \quad (1.10)$$

$\langle y \rangle$ и $\langle z \rangle$ определяются по формуле (1.4).

Абсолютная суммарная погрешность ΔX косвенных измерений находится через погрешности прямых измерений по правилу дифференцирования.

$$\Delta X = f(\langle y \rangle + \Delta y; \langle z \rangle + \Delta z) - f(\langle y \rangle, \langle z \rangle) \approx \frac{\partial f}{\partial y} \Delta y + \frac{\partial f}{\partial z} \Delta z. \quad (1.11)$$

Относительная погрешность δX косвенных измерений рассчитывается по формуле (1.8).

Для определения абсолютной и относительной погрешностей косвенных измерений можно воспользоваться формулами дифференцирования (табл.1.1).

Т а б л и ц а 1.1

| Функция | Абсолютная погрешность | Относительная погрешность |
|-------------------|---|---|
| 1 | 2 | 3 |
| $A = x + y$ | $\Delta A = \Delta x + \Delta y$ | $\delta A = \frac{\Delta x + \Delta y}{x + y}$ |
| $A = x - y$ | $\Delta A = \Delta x - \Delta y$ | $\delta A = \frac{\Delta x + \Delta y}{x - y}$ |
| $A = xyz$ | $\Delta A = yz\Delta x + xz\Delta y + xy\Delta z$ | $\delta A = \frac{\Delta x}{x} + \frac{\Delta y}{y} + \frac{\Delta z}{z}$ |
| $A = \frac{x}{y}$ | $\Delta A = \frac{y\Delta x - x\Delta y}{y^2}$ | $\delta A = \frac{\Delta x}{x} - \frac{\Delta y}{y}$ |
| $A = x^n$ | $\Delta A = nx^{n-1}\Delta x$ | $\delta A = n \frac{\Delta x}{x}$ |
| $A = x^n + y^m$ | $\Delta A = nx^{n-1}\Delta x + my^{m-1}\Delta y$ | $\delta A = \frac{nx^{n-1}\Delta x + my^{m-1}\Delta y}{x^n + y^m}$ |

| 1 | 2 | 3 |
|----------------------------|--|--|
| $A = x^n \cdot y^m$ | $\Delta A = y^m n x^{n-1} \Delta x + x^n m y^{m-1} \Delta y$ | $\delta A = n \frac{\Delta x}{x} + m \frac{\Delta y}{y}$ |
| $A = \sqrt[n]{x}$ | $\Delta A = \frac{1}{n} x^{\frac{1}{n}-1} \Delta x$ | $\delta A = \frac{1}{n} \cdot \frac{\Delta x}{x}$ |
| $A = \frac{x}{1 \pm x}$ | $\Delta A = \frac{\Delta x}{(1 \pm x)^2}$ | $\delta A = \frac{\Delta x}{x(1 \pm x)}$ |
| $A = e^x$ | $\Delta A = e^x \Delta x$ | $\delta A = \Delta x$ |
| $A = \ln x$ | $\Delta A = \frac{\Delta x}{x}$ | $\delta A = \frac{\Delta x}{x \ln x}$ |
| $A = \sin x$ | | $\delta A = \operatorname{ctg} x \cdot \Delta x$ |
| $A = \cos x$ | $\Delta A = \sin x \cdot \Delta x$ | $\delta A = \operatorname{tg} x \cdot \Delta x$ |
| $A = \operatorname{tg} x$ | $\Delta A = \frac{\Delta x}{\cos^2 x}$ | $\delta A = \frac{2\Delta x}{\sin 2x}$ |
| $A = \operatorname{ctg} x$ | $\Delta A = \frac{\Delta x}{\sin^2 x}$ | $\delta A = \frac{2\Delta x}{\sin 2x}$ |

6. ПРАВИЛА ПРЕДСТАВЛЕНИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ФИЗИЧЕСКОГО ЭКСПЕРИМЕНТА

Точность экспериментально полученных физических величин ограничена точностью измерений. Например, при измерении длины тела с помощью обычной линейки нельзя получить результат с точностью большей, чем $\pm 0,5$ мм. В то же время, вычисляя значения $\langle X \rangle$ по формуле (1.4) и ΔX по формулам (1.6) и (1.11), можно точно получить числа с несколькими десятичными знаками, соответствующие микронам и даже их долям. Очевидно, что эти десятичные знаки не отражают реальной точности измерений и, следовательно, при представлении результатов в виде $X = \langle X \rangle \pm \Delta X$ численные значения величин $\langle X \rangle$ и ΔX должны быть предварительно обработаны.

Правила округления:

1. Погрешность ΔX округляется и записывается только с одной значащей цифрой. Например, результат вычислений 0,0263 записывается в виде $\Delta X = 0,03$, а 321 – в виде $\Delta X = 300$. Ноль значащей цифрой не является.

2. Среднеарифметическое значение $\langle X \rangle$ округляется так, что значащие цифры остаются только в тех разрядах, которые не младше значащей цифры погрешности ΔX . Например, результат вычислений 7714161,8434 при $\Delta X = 0,03$ округляется до $\langle X \rangle = 7714161,84$, а при $\Delta X = 300$ – до $\langle X \rangle = 7714200$.

Окончательно экспериментально измеренное значение физической величины представляется в виде $X=7714161,84 \pm 0,03$ при $\Delta X = 0,03$ и в виде $X=7714200 \pm 300$ при $\Delta X = 300$.

7. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

Задание № 1. Измерение объёма цилиндра

Приборы и принадлежности: штангенциркуль, микрометр, цилиндр.

Ход работы

1. Для регистрации результатов измерений подготовить табл. 1.2.
2. Штангенциркулем измерить высоту h цилиндра и микрометром – диаметр d основания цилиндра. Замеры выполнить 3 раза и данные h_i , d_i занести в табл. 1.2.
3. По формуле (1.4) рассчитать среднеарифметические значения размеров тела $\langle h \rangle$ и $\langle d \rangle$.
4. По формуле (1.5) определить случайные составляющие погрешностей измерений $\overset{\circ}{\Delta}h$ и $\overset{\circ}{\Delta}d$.
5. По формулам (1.1)–(1.2) найти систематические погрешности измерений $\Delta_c h$ и $\Delta_c d$ (погрешности инструмента).
6. Рассчитать абсолютные суммарные погрешности измерений Δh и Δd по формуле (1.6).
7. Результаты всех расчетов занести в табл. 1.2.

Т а б л и ц а 1.2

| Номер замера, i | h_i , мм | d_i , мм | $\langle h \rangle$, мм | $\langle d \rangle$, мм | $\overset{\circ}{\Delta}h$, мм | $\overset{\circ}{\Delta}d$, мм | $\Delta_c h$, мм | $\Delta_c d$, мм | Δh , мм | Δd , мм | $\langle V \rangle$, мм ³ | ΔV , мм ³ | δV , % |
|-------------------|------------|------------|--------------------------|--------------------------|---------------------------------|---------------------------------|-------------------|-------------------|-----------------|-----------------|---------------------------------------|------------------------------|----------------|
| 1 | | | | | | | | | | | | | |
| 2 | | | | | | | | | | | | | |
| 3 | | | | | | | | | | | | | |

8. Вычислить среднее значение объёма $\langle V \rangle$ цилиндра по формуле

$$\langle V \rangle = \frac{\pi \langle d \rangle^2}{4} \cdot \langle h \rangle.$$

9. Определить абсолютную погрешность ΔV косвенных измерений объема тела по формуле

$$\Delta V = \frac{\pi \langle d \rangle \langle h \rangle}{2} \cdot \Delta d + \frac{\pi \langle d \rangle^2}{4} \cdot \Delta h = \frac{\pi \langle d \rangle^2 \langle h \rangle}{4} \left(\frac{2\Delta d}{\langle d \rangle} + \frac{\Delta h}{\langle h \rangle} \right).$$

10. По формуле (1.8) найти относительную погрешность измерений δV .

11. Результат измерения объема цилиндра записать в виде:

$$V = \langle V \rangle \pm \Delta V, \text{ мм}^3.$$

Задание № 2. Измерение удельного сопротивления проволоки

Приборы и принадлежности: установка для измерения удельного сопротивления проволоки FPM – 01, микрометр.

Обоснование методики измерений

Электрическое сопротивление проводника длиной ℓ и сечением S определяется по формуле

$$R = \rho \frac{\ell}{S}. \quad (1.12)$$

Выразим из формулы (1.12) удельное сопротивление материала проводника

$$\rho = R \frac{S}{\ell}. \quad (1.13)$$

Для определения ρ необходимо измерить электрическое сопротивление R , длину отрезка проволоки ℓ и площадь сечения S проволоки.

Для измерения R собирают электрическую цепь (рис.1.8).

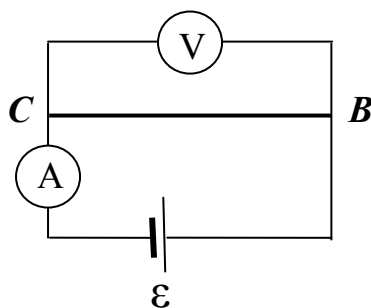


Рис.1.8

Участок **CB** – рассматриваемый отрезок проволоки,

A – амперметр,

V – вольтметр,

ϵ – источник тока.

Измерив напряжение U и силу тока I на участке **CB**, вычисляют сопротивление проволоки по формуле

$$R = \frac{U}{I}. \quad (1.14)$$

Площадь поперечного сечения S находят по формуле

$$S = \frac{\pi d^2}{4}, \quad (1.15)$$

где d – диаметр проволоки, измеренный микрометром.

Подставив значения R и S в формулу (1.13), получим:

$$\rho = \frac{U}{I} \cdot \frac{\pi d^2}{4\ell}. \quad (1.16)$$

Ход работы

1. Установить отрезок проволоки (участок **CB**) и измерить его длину ℓ . Результат измерений занести в табл. 1.4.

2. Измерить с помощью микрометра диаметр d проволоки в 5 точках. Результаты измерений d_i занести в табл. 1.3.

3. Рассчитать среднее значение диаметра $\langle d \rangle$ проволоки и погрешности измерений $\overset{\circ}{\Delta}d$, $\Delta_c d$, Δd , δd диаметра проволоки по формулам (1.4) – (1.8). Результаты всех расчетов занести в табл. 1.3.

Таблица 1.3

| Номер замера | d_i , мм | $\langle d \rangle$, мм | $\overset{\circ}{\Delta}d$, мм | $\Delta_c d$, мм | Δd , мм | δd , % |
|--------------|------------|--------------------------|---------------------------------|-------------------|-----------------|----------------|
| 1 | | | | | | |
| 2 | | | | | | |
| 3 | | | | | | |
| 4 | | | | | | |
| 5 | | | | | | |

4. Включить установку. Измерить напряжение U и силу тока I на участке **CB**.

Результаты измерений занести в табл. 1.4.

Таблица 1.4

| ℓ , м | $\Delta_c \ell$, м | U , В | $\Delta_c U$, В | I , А | $\Delta_c I$, А | $\langle \rho \rangle$, Ом·м | $\Delta \rho$, Ом·м | $\delta \rho$, % |
|------------|---------------------|---------|------------------|---------|------------------|-------------------------------|----------------------|-------------------|
| | | | | | | | | |

5. По формулам (1.1) и (1.2) рассчитать абсолютные систематические погрешности $\Delta_c \ell$, $\Delta_c U$, $\Delta_c I$ измерений. Абсолютные погрешности измерений $\Delta \ell$, ΔU , ΔI зависят, в основном, от погрешности прибора, поэтому $\Delta \ell = \Delta_c \ell$, $\Delta U = \Delta_c U$, $\Delta I = \Delta_c I$.

Данные расчетов занести в табл. 1.4.

6. По формуле $\langle \rho \rangle = \frac{U \pi \langle d \rangle^2}{I 4 \ell}$ рассчитать среднее значение удельного сопротивления $\langle \rho \rangle$ проволоки.

7. Вычислить абсолютную погрешность $\Delta \rho$ косвенных измерений:

$$\Delta \rho = \frac{U \pi \langle d \rangle^2}{4 I \ell} \left(\frac{\Delta U}{U} + \frac{2 \Delta d}{\langle d \rangle} + \frac{\Delta I}{I} + \frac{\Delta \ell}{\ell} \right).$$

8. По формуле (1.8) найти относительную погрешность $\delta \rho$ косвенных измерений. Результаты расчетов занести в табл. 1.4.

9. Результат измерения удельного сопротивления ρ проволоки записать в виде:

$$\rho = \langle \rho \rangle \pm \Delta \rho, \text{ Ом}\cdot\text{м.}$$

8. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ НА КОМПЬЮТЕРНОЙ МОДЕЛИ

1. Войдите в режим меню и с помощью «мыши», нажав её левую кнопку, откройте лабораторную работу. Данная программа представляет собой имитатор процесса измерения объема цилиндра и удельного сопротивления проволоки. Приступите к выполнению работы.

2. Ознакомьтесь с целью выполняемой работы.

3. Выберите задание, нажав указателем «мыши» на соответствующий пункт меню.

4. Приступите к выполнению задания №1 «Измерение объёма цилиндра».

4.1. Ознакомьтесь с приборами измерений: штангенциркулем и микрометром.

4.2. Для начала выполнения задания №1 выберите измеряемый цилиндр и, щелкнув на нем «мышью», расположите его между ножками штангенциркуля.

4.3. Перемещая с помощью «мыши» подвижную рамку, зафиксируйте измеряемый цилиндр между ножками штангенциркуля, нажав кнопку «Закрепить».

4.4. Снимите показания штангенциркуля и занесите их в соответствующую ячейку таблицы.

4.5. Повторите измерения по пунктам 4.3 и 4.4.

4.6. Нажмите кнопку «Далее» и перейдите к измерению диаметра цилиндра с помощью микрометра.

4.7. Нажав кнопку «Измерить», зафиксируйте цилиндр между торцом микрометрического винта и пяткой.

4.8. Снимите показания микрометра и занесите их в соответствующую ячейку таблицы.

4.9. Повторите измерения по пунктам 4.7 и 4.8.

4.10. Занесите в таблицу погрешности измерительных приборов (штангенциркуля и микрометра).

4.11. Рассчитайте погрешности измерений объема цилиндра.

5. Приступите к выполнению задания №2 «Измерение удельного сопротивления проволоки».

5.1. Ознакомьтесь с устройством установки FPM-01 для измерения удельного сопротивления проволоки.

5.2. Выберите исследуемый участок проволоки, перемещая с помощью «мыши» подвижный контакт. Занесите установленную длину проволоки и погрешность линейки в таблицу.

5.3. Нажав кнопку «Измерить», зафиксируйте положение микрометра на данной точке участка проволоки.

5.4. Занесите показания микрометра в таблицу.

5.5. Повторите измерения по пунктам 5.3 и 5.4.

5.6. Продолжите выполнение работы, нажав кнопку «Далее». Включите установку, нажав с помощью «мыши» кнопку «Сеть».

5.7. Снимите показания вольтметра и амперметра и занесите их в таблицу.

5.8. Запишите класс точности приборов (вольтметра и амперметра) и пределы их измерений в соответствующие графы таблицы.

5.9. Рассчитайте погрешности измерений удельного сопротивления проволоки.

6. Завершите выполнение работы, нажав кнопку «Выход».

Контрольные вопросы

1. Что называется научным познанием?
2. Охарактеризуйте ступени научного познания.
3. Что такое научный метод?
4. Как принято подразделять методы научного познания?
5. Опишите всеобщие методы познания.
6. Дайте понятие общенаучных методов. Укажите отличие общенаучных методов от всеобщих.
7. Что такое анализ, синтез?
8. Что такое обобщение, абстрагирование, идеализация?
9. Что такое индукция и дедукция? Приведите примеры.
10. Что такое аналогия, моделирование?

11. Охарактеризуйте исторический и логический методы познания.
12. В чём заключается метод классификации?
13. Охарактеризуйте методы эмпирического познания: наблюдение, описание, эксперимент, измерение, сравнение.
14. Дайте общую характеристику методам теоретического познания. В чём заключаются методы формализации, аксиоматизации, гипотетико-дедуктивный метод?
15. Дайте характеристику частнонаучным методам.
16. Что такое измерение? Назовите виды измерений.
17. Какие бывают погрешности и за счет чего они возникают?
18. Что указывает класс точности прибора? Назовите классы точности приборов.
19. Как определить среднее значение измеряемой величины?
20. Как определить случайную погрешность прямых измерений?
21. Как определить систематическую погрешность прямых измерений?
22. Как определить абсолютную суммарную погрешность прямых измерений?
23. Как определить погрешность косвенных измерений?
24. Что такое относительная погрешность? Как она определяется? При каком значении относительной погрешности результат измерений величины считают хорошим?
25. Как устроены штангенциркуль и микрометр? Как пользоваться этими приборами?
26. Объясните правила округления результатов физического эксперимента.
27. В каком виде следует представлять результаты измерений физических величин?

Лабораторная работа №2
ИЗУЧЕНИЕ РАВНОУСКОРЕННОГО ДВИЖЕНИЯ
НА МАШИНЕ АТВУДА И ЕЁ КОМПЬЮТЕРНОЙ МОДЕЛИ

Цель работы – экспериментальное исследование характера прямолинейного движения тел в поле земного тяготения, проверка формул равноускоренного движения и второго закона Ньютона методом прямого эксперимента с использованием машины Атвуда и методом компьютерного моделирования.

Приборы и принадлежности – машина Атвуда, IBM-совместимый персональный компьютер (ПК), пакет компьютерных программ по моделированию законов движения с помощью машины Атвуда.

1. ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ВВЕДЕНИЕ

Развитие взглядов на движение материи

В окружающем нас мире нет ничего абсолютно застывшего и неизменного, все материальные объекты существуют в движении. Во-первых, любое тело, покоящееся относительно Земли, движется вместе с ней вокруг Солнца, вместе с Солнцем – относительно других звёзд Галактики, которая, в свою очередь, перемещается относительно других звёздных систем. Во-вторых, каждое тело взаимодействует с окружающими его телами и в результате этого взаимодействия приобретает движение: поступательное или вращательное. В-третьих, внутри самих тел происходит непрерывное движение элементарных частиц, атомов, молекул.

В широком смысле, **движение** – это любое изменение материи, от простого механического перемещения до сложных процессов мышления.

В науке исторически сложились и параллельно развивались две концепции в понимании движения: диалектическая и метафизическая.

Диалектическая концепция предполагает изучение материальных объектов с учётом их взаимосвязей, а также реальных процессов их изменения и развития.

Основоположником диалектического подхода является древнегреческий мыслитель **Гераклит Эфесский** (ок. 540–480 гг. до н.э.). Основу учения Гераклита составляет идея о взаимосвязи, непрерывном движении и безостановочной изменчивости вещей. Он считал, что движение необратимо, невозможно вернуться в однажды пройденное состояние. Об этом свидетельствуют дошедшие до нас афоризмы Гераклита: «*Всё течет, всё меняется*», «*Нельзя дважды войти в одну и ту же реку*». Гераклит полагал, что нельзя понять субстанцию мира, природу Космоса, не учитывая его постоянную текучесть, изменчивость, то, что он всё время находится в состоянии становления.

Размышляя над проблемой первовещества (субстанции мира), он пришёл к выводу, что оно должно быть подвижным, текучим, непрерывно

изменчивым. Гераклит считал, что такой первоосновой бытия является не вода, воздух или земля, а *огонь*, который представлялся самым изменчивым веществом. (Тогда люди ещё не понимали, что огонь – это не вещество, как вода, воздух, земля, а реакция окисления с выделением теплоты и света.) Согласно Гераклиту, *космос рождается из огня и снова сгорает в нём*.

Диалектика изменчивости огня, его пневма (огненная энергия) была затем популярна у многих философов, в том числе у Аристотеля два века спустя.

Подобных взглядов на движение придерживался английский философ **Джон Толанд** (1670–1722 гг.). Именно он в XIII в. высказал убеждение, что *«движение есть способ существования материи»*. Французские философы-просветители Дени Дидро и Поль Гольбах, немецкий философ Фридрих Энгельс, венгерский философ Дьёрдь Лукач, немецкий физик Макс Борн, шведский физик Хуго Альвен также считали, что *вне движения нельзя даже мысленно представить себе ни один материальный объект*, и были убеждены в том, что характеристика любого объекта в итоге сводится к раскрытию присущих ему движений.

Сторонники диалектической концепции признают любые формы движения (поступательное, вращательное, хаотическое, круговороты) в развитии.

Метафизическая концепция признаёт разделение природы на составные части и изучение каждой в отдельности вне изменения и развития.

Она сформировалась в стенах элейской школы (г. Элея на юге Италии), создателями которой являются Ксенофан и его единомышленники Парменид и Зенон. Они отрицали движение, пытались доказать, что *окружающий мир неподвижен, неизменен*, ибо всякое изменение представляется противоречивым, а потому – невозможным.

Парменид (540–470 гг. до н. э.) был убеждён в том, что материальный мир неподвижен, шарообразен и однороден; он есть одно целое. Мир существует вечно, он никогда не возникал и никогда не исчезнет в будущем. Он был уверен, что изменения в мире невозможны, и относил видимые изменения за счет иллюзорности наших чувств. Парменид полагал, что Земля не движется, она находится в центре Космоса и постоянно остается в равновесии вследствие равного расстояния её от всех точек периферии Космоса, но иногда она может колебаться, что проявляется как землетрясение.

На определенном этапе научного познания природы метафизический метод, которым руководствовались учёные-естествоиспытатели, был вполне пригоден и даже неизбежен, ибо упрощал и облегчал сам процесс познания. В рамках метафизического подхода к миру учеными изучались многие объекты и явления природы, проводилась их классификация. Наглядным примером этого может служить весьма плодотворная деятель-

ность известного шведского ученого, метафизически мыслящего натуралиста **Карла Линнея** (1707–1778 гг.). Будучи талантливым, неутомимым исследователем, Линней все силы своего огромного ума, обогащённого наблюдениями в многочисленных путешествиях, употребил на создание классификации растительного и животного мира. Но, проделав огромную и очень полезную классификационную работу, Линней вместе с тем не вышел за рамки традиционного для науки XVIII века метафизического метода мышления. Распределив «по полочкам» разновидности представителей живой природы, расположив растения и животных в порядке усложнения их строения, он не усмотрел развития в этом усложнении. Линней считал виды растений и животных абсолютно неизменными, а самих «видов столько, сколько их создано Творцом».

Метафизической концепции движения длительное время придерживались сторонники двух различных философских направлений: *метафизического субстанциализма* и *идеалистического релятивизма*.

Представители метафизического субстанциализма (**Бенедикт Спиноза**, **Томас Гексли**, **Уильям Клиффорд**) полагали, что объект (субстанция) значит нечто сам по себе, вне присущих ему движений. А движение – *нечто внешнее, налагающееся на объект* (абсолютизация субстанции).

Сторонники идеалистического релятивизма (английские мыслители первой половины XVIII века **Джордж Беркли** и **Давид Юм**) отрицали субстанции вообще. Для них было характерно *провозглашение чистого движения, существующего без носителя* (абсолютизация движения).

Новые научные идеи и открытия второй половины XVIII – первой половины XIX веков (вывод Леонардом Эйлером основных уравнений движения идеальной жидкости, открытие Эрнстом Хладни продольных колебаний струн и стержней, измерение скорости звука в воздухе французскими учёными Домиником Араго и Александром Гумбольдтом и др.) продемонстрировали ограниченность метафизики и вскрыли диалектический характер явлений природы. На основе развития частных наук и анализа философских идей своих предшественников создатели диалектико-материалистической философии углубили понимание сущности движения, его непрерывной связи с материей, пространством и временем.

Они утверждают, что *материя не может существовать без движения*; в свою очередь, *движение не может существовать без материального носителя* (вещества или поля). Нет движения как такового, а есть движение конкретных материальных объектов.

Движение есть способ существования материи.

Свойства движения:

1) *Объективность* – независимость движения от сознания человека. Это означает, что материя сама по себе имеет причину своих изменений. Из объективности следует положение о бесконечности взаимопревращений материи.

2) *Универсальность* (всеобщность) – все материальные объекты находятся в движении.

3) *Несотворимость и неуничтожимость* – диалектики-материалисты отвергают какие-либо рассуждения о начале или конце движения и, утверждая *принцип самодвижения материи*, одновременно раскрывают его механизм. По их мнению (а оно подтверждается опытом человечества и данными естественных наук), *движение есть результат борьбы объективно существующих противоположностей*. Это, например, действие и противодействие в механическом движении, более высокая и более низкая температура (энергия) – в тепловом движении, положительный и отрицательный заряд – в электричестве, полярные интересы людей и их различных объединений – в общественном развитии.

4) *Абсолютность* – признавая абсолютность движения, диалектический материализм не отрицает его противоположности – *покоя*.

Под *покоем* понимается неизменность объектов, их стабильность, временное единство противоположностей, равновесие, сохранение объектов и их состояний. *Покой* относителен. Например, тело, находящееся в состоянии механического равновесия (*покоя*) относительно Земли, принимает участие в суточном вращении Земли вокруг её оси и движется вместе с Землёй вокруг Солнца. Мельчайшие частицы, входящие в состав покоящегося тела (электроны, атомы, молекулы) тоже непрерывно движутся. Таким образом, относительный покой существует в движении.

Если движение является причиной возникновения конкретных, качественно различных объектов, то покой является причиной сохранения относительной устойчивости этих конкретных объектов, условием их существования. Возможность относительного покоя тел, как и движение, является необходимым условием дифференциации материи.

Неисчерпаемость материи, многообразие объектов и явлений связаны с многообразием форм движения. Согласно представлениям диалектиков-материалистов, критерием выделения форм движения материи является связь каждой из них с определенным материальным носителем. Вместе с тем каждая форма движения характеризуется соответствующими законами, действующими на том или ином структурном уровне материи.

В современной науке выделяются три основные группы форм движения материи, которые, в свою очередь, имеют множество своих специфических форм движения.

Классификация форм движения материи (от низших к высшим):

1. *В неорганической природе:*

- пространственное перемещение (механическое движение);
- движение элементарных частиц и полей – электромагнитные, гравитационные, сильные и слабые взаимодействия, процессы превращения элементарных частиц;

- движение и превращение атомов и молекул, включающее в себя химические реакции (атомно-молекулярное движение);

- изменения в структуре макроскопических тел – тепловые процессы, изменение агрегатных состояний, звуковые колебания и другое;

- геологическая форма движения, включающая комплекс физико-химических процессов, связанных с образованием всевозможных минералов, руд и других веществ в условиях больших температур и давлений;

- изменение космических систем различных размеров: планет, звёзд, галактик и их скоплений. В масштабах мегамира – грандиозное расширение Метагалактики.

2. В живой природе:

- обмен веществ;

- саморегуляция, управление и воспроизводство в биоценозах и других экологических системах;

- взаимодействие всей биосферы с природными системами Земли;

- внутриорганизменные биологические процессы, направленные на обеспечение сохранения организмов, поддержание стабильности внутренней среды в меняющихся условиях существования;

- надорганизменные процессы, выражающие отношения между представителями различных видов в экосистемах и определяющие их численность, зону распространения (ареал) и эволюцию.

3. В обществе:

- многообразные проявления сознательной деятельности людей;

- все высшие формы отражения и целенаправленного преобразования действительности.

Каждая из этих форм включает в себя бесконечное множество видов движения. Даже простейшее механическое движение включает в себя такие виды, как *равномерное прямолинейное, равноускоренное (замедленное), криволинейное, хаотическое движение*.

На каждом структурном уровне материи проявляются свои формы движения и функционирования соответствующих материальных систем.

Наиболее сложной формой движения является *социальная*. Она включает изменения социальных групп, слоёв, классов, этнические изменения, демографические процессы, развитие производительных сил и производственных отношений и другие изменения, определяемые законами движения на социальном уровне материи. Проявлением социальных форм движения служат и процессы отражения действительности в мышлении, которые основываются на синтезе всех физико-химических и биологических форм движения в мозгу человека.

Между всеми формами движения материи существует тесная взаимосвязь. Она обнаруживается, прежде всего, в историческом развитии материи и в возникновении высших форм движения на основе относительно

низших. Высшие формы движения синтезируют в себе низшие. Так, человеческий организм функционирует на основе взаимодействия физико-химических и биологических форм движения, находящихся в нём в неразрывном единстве, и одновременно человек проявляет себя как личность – носитель социальной формы движения. Вместе с тем высшие формы движения материи качественно отличны от низших и несводимы к ним. Грубое сведение высших форм к низшим ведёт к механицизму и недопустимым упрощениям.

Движение – это любое изменение вообще, независимо от характера, направления и результатов.

Особый вид изменения, являющийся необратимым и обязательно включающий в себя качественные преобразования, называется *развитием*.

Развитие характеризуется направленностью, поступательностью, преемственностью, моментами повторяемости, отрицанием старого и появлением нового.

2. ЛАБОРАТОРНАЯ УСТАНОВКА

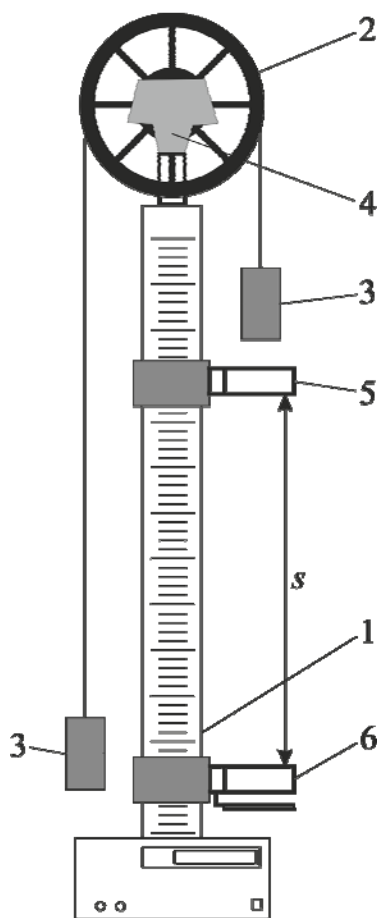


Рис. 2.1. Машина Атвуда

Наиболее очевидный путь исследования прямолинейного движения тел под действием силы тяжести – это изучение свободного падения. Однако этому методу существенно препятствует большая величина ускорения при свободном падении. Действительно, при малой высоте прибора время падения тела составит малые доли секунды, и ошибки фиксации начала и конца движения окажутся соизмеримыми со временем падения. При большой же высоте прибора падающее тело наберет значительную скорость, и сила сопротивления воздуха, которая при малых скоростях движения возрастает пропорционально скорости тела, окажется соизмеримой с силой тяжести. Это, в свою очередь, приведет к уменьшению ускорения. Преодолеть указанные трудности (уменьшив ускорение до приемлемых величин) позволяет устройство для проверки законов падения тел, изобретённое английским физиком **Джорджем Атвудом** (1746–1807 гг.) и получившее название «машина Атвуда».

Основой машины Атвуда (рис. 2.1) является вертикальная штанга 1 со шкалой. На верхнем торце штанги закреплен легкий блок 2, способный вращаться с незначительным трением. Через блок

перекинута тонкая нить с прикрепленными грузами 3 одинаковых масс m . С помощью тормоза 4 грузы могут удерживаться в состоянии покоя. На штанге крепятся два кронштейна 5 и 6 с фотоэлектрическими датчиками. Фотоэлектрический датчик верхнего кронштейна формирует импульс напряжения, сигнализирующий о начале движения, датчик нижнего кронштейна – импульс, сигнализирующий о конце движения. Верхний кронштейн – подвижный, его можно перемещать вдоль штанги и фиксировать в любом положении, задавая, таким образом, длину пути груза. Нижний кронштейн – неподвижный, он оснащен платформой с резиновым амортизатором, в которую ударяется правый груз, завершая движение. (На рисунках векторные величины выделены жирным шрифтом.)

Если на правый груз положить перегрузок массой m_1 , то система грузов, связанных нитью, начнет двигаться с некоторым ускорением a (рис. 2.2). Пренебрегая силой сопротивления воздуха, массой блока и силой трения в блоке, а также полагая нить нерастяжимой и невесомой, можно считать, что на каждый груз действуют две силы: сила тяжести со стороны Земли и сила натяжения нити. Причем силы натяжения, действующие на оба груза, в этом случае одинаковы.

Уравнения движения грузов имеют вид:

$$m\vec{g} + \vec{T} = m\vec{a} \quad (\text{для левого груза});$$

$$(m + m_1)\vec{g} + \vec{T} = (m + m_1)\vec{a} \quad (\text{для правого груза}).$$

Спроектировав уравнения на ось OX , направленную вертикально вниз, получим:

для левого груза

$$mg - T = -ma, \quad (2.1)$$

для правого груза

$$(m + m_1)g - T = (m + m_1)a, \quad (2.2)$$

где g – ускорение свободного падения; T – сила натяжения нити.

Совместное решение уравнений (2.1) и (2.2) даёт формулу для расчёта ускорения системы грузов:

$$a = \frac{m_1 g}{2m + m_1}. \quad (2.3)$$

Из формулы (2.3) следует, что ускорение системы прямо пропорционально результирующей внешних сил, действующих на систему (в данном случае – силе тяжести перегрузка массой m_1), и обратно пропорционально массе всей системы. В этом легко убедиться, записав второй закон Нью-

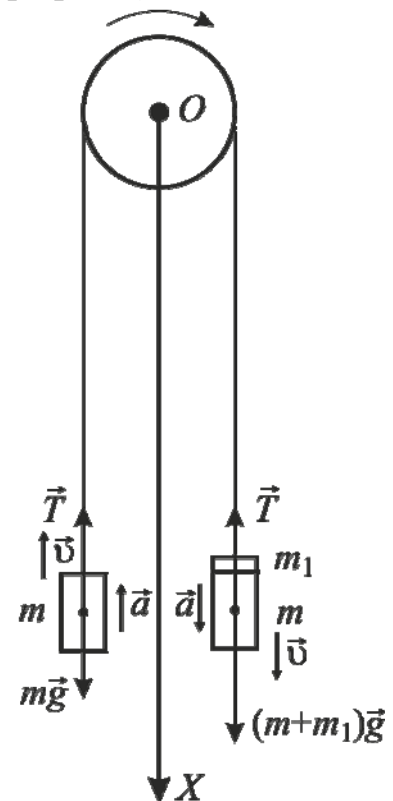


Рис. 2.2. Движение грузов под действием сил

тона для всей системы «грузы – нить» в целом. При этом для наглядности систему целесообразно развернуть вдоль одной горизонтальной оси, выбрав её направление, например, от одиночного груза к грузу с перегрузом (рис. 2.3).

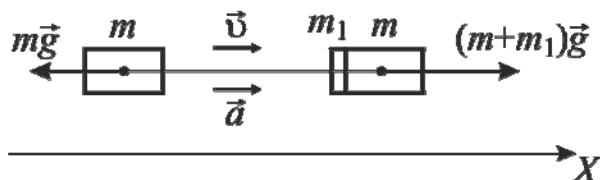


Рис. 2.3

Из рисунка видно, что результирующая внешних сил, приложенных к системе «грузы – нить», в соответствии со вторым законом Ньютона равна

$$(m + m_1)g - mg = (2m + m_1)a. \quad (2.4)$$

Формулы (2.3) и (2.4) справедливы лишь при условии принятых выше допущений. Здесь отметим, что масса блока и дополнительные внешние силы (сила трения в блоке и сила сопротивления воздуха) уменьшают величину ускорения.

Формулы кинематики для пути и скорости при прямолинейном равноускоренном движении имеют вид

$$\left. \begin{aligned} s &= v_0 t + \frac{at^2}{2} \\ v &= v_0 + at \end{aligned} \right\}, \quad (2.5)$$

где v_0 – начальная скорость тела; t – время ускоренного движения.

Используя формулы (2.5) и полагая в них $v_0 = 0$, ускорение тела можно найти по любой из двух формул:

$$a = 2s/t^2; \quad (2.6)$$

$$a = v/t. \quad (2.7)$$

Сопоставление значений ускорения, вычисленных по формулам (2.6) и (2.7), с величиной ускорения, рассчитанного по формуле (2.3), позволяет проверить кинематические формулы пути и скорости тела при равноускоренном движении, что и составляет содержание первых двух заданий работы.

3. ЗАПУСК КОМПЬЮТЕРНОГО ИМИТАТОРА

На экране монитора в меню «Физическая лаборатория», подведя курсор и щелкнув левой кнопкой мыши, откройте раздел «Механика и колебания». Затем этой же кнопкой выберите лабораторную работу «Изучение равноускоренного движения на машине Атвуда» и, подведя курсор, активируйте клавишу «Выполнить». При этом откроется окно с

изображением и описанием конструкции машины Атвуда. Ознакомившись с имитируемой установкой, активируйте левой кнопкой мыши клавишу «Выполнить» и далее выполняйте экспериментальную часть работы, действуя этой же кнопкой в соответствии с указаниями на экране монитора и пунктами одного из разделов «Порядок выполнения задания на компьютерном имитаторе».

4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Задание 1. ПРОВЕРКА ФОРМУЛЫ ПУТИ ПРИ РАВНОУСКОРЕННОМ ДВИЖЕНИИ

Порядок выполнения задания на машине Атвуда

1. Выберите самостоятельно значения масс грузов m и перегрузка m_1 и внесите их в табл. 2.1,а.

2. Вычислите по формуле (2.3) теоретическую величину ускорения $a_{\text{теор}}$, с которым будут двигаться грузы, и внесите значение этой величины в табл. 2.1,а.

Т а б л и ц а 2.1,а

| m , кг | m_1 , кг | $a_{\text{теор}}$, м/с ² |
|----------|------------|--------------------------------------|
| | | |

3. Включите установку в сеть, нажав клавишу «СЕТЬ». При этом на табло «ВРЕМЯ» должны быть нулевые показания. Если имеются какие-либо иные цифры, нажмите на клавишу «СБРОС». Клавиша «ПУСК» должна находиться в отжатом состоянии.

4. Установите верхний кронштейн в некотором фиксированном положении и значение расстояния s между рисками верхнего и нижнего кронштейнов внесите в табл. 2.1,б.

Т а б л и ц а 2.1,б

| № опыта | s , м | t , с | $\langle t \rangle$, с | $a_{\text{эксп}}$, м/с ² | $\langle a_{\text{эксп}} \rangle$, м/с ² | δa , % |
|---------|---------|---------|-------------------------|--------------------------------------|--|----------------|
| | | | | | | |
| | | | | | | |
| | | | | | | |
| | | | | | | |
| | | | | | | |
| | | | | | | |
| | | | | | | |
| | | | | | | |
| | | | | | | |

5. Поместите на правый груз перегрузок.

6. Нажмите клавишу «ПУСК». При этом тормоз блока отключится, система придёт в движение, и на табло «ВРЕМЯ» начнется отсчёт времени движения. После того как правый груз пересечёт оптическую ось фотоэлектрического датчика нижнего кронштейна, отсчёт времени прекратится, и на табло высветится время движения груза t , значение которого вносят в табл. 2.1,б.

7. Нажмите на клавишу «СБРОС», отожмите клавишу «ПУСК» и повторите п. 6 с тем, чтобы для данного расстояния s получить четыре значения времени t .

8. Вычислите среднее значение времени $\langle t \rangle$ прохождения грузом данного расстояния. Подставив в формулу (2.6) значения s и $\langle t \rangle$, рассчитайте величину ускорения $a_{\text{эксп}}$. Значения величин $\langle t \rangle$ и $a_{\text{эксп}}$ внесите в табл. 2.1,б.

9. Нажмите на клавишу «СБРОС», отожмите клавишу «ПУСК» и измените положение верхнего кронштейна. Значение расстояния s между чертами верхнего и нижнего кронштейнов внесите в табл. 2.1,б и повторите пп. 6-8 с тем, чтобы получить значения величин $\langle t \rangle$ и $a_{\text{эксп}}$ для трёх значений расстояния s .

10. Рассчитайте среднее значение ускорения $\langle a_{\text{эксп}} \rangle$ и внесите его в табл. 2.1,б.

11. Вычислите относительное отклонение δa величины $\langle a_{\text{эксп}} \rangle$ от значения $a_{\text{теор}}$ по формуле

$$\delta a = \frac{|a_{\text{теор}} - \langle a_{\text{эксп}} \rangle|}{a_{\text{теор}}} \cdot 100\%. \quad (2.8)$$

Величина δa характеризует точность экспериментальной проверки формулы (2.6).

Порядок выполнения задания на компьютерном имитаторе

1. В режиме меню с помощью «мыши», нажав на её левую кнопку, выберите задание 1.

2. Введите и запомните последовательно из заданных интервалов массу перегрузка m_1 и высоту подъема правого груза s . Активируйте клавишу «ОК».

3. Данные о массе основных грузов m и массе перегрузка m_1 внесите в табл. 2.1,а, а значение расстояния s – в табл. 2.1,б.

4. Вычислите по формуле (2.3) ускорение $a_{\text{теор}}$, с которым должны двигаться грузы, и внесите это значение в табл. 2.1,а.

5. Подведя курсор и используя левую кнопку мыши, нажмите клавишу «СЕТЬ», а затем – клавишу «ПУСК». При этом грузы придут в движение, а секундомер отсчитает время t прохождения ими данного расстояния s .

6. Подведя курсор и используя левую кнопку мыши, нажмите клавишу «СБРОС», а затем – клавишу «ПУСК» и повторите п. 7 с тем, чтобы для данного расстояния s получить четыре значения времени t .

7. Полученные значения времени t внесите в табл. 2.1,б

8. Вычислите среднее значение времени $\langle t \rangle$ прохождения грузами данного расстояния. Подставив в формулу (6) значения s и $\langle t \rangle$, рассчитайте величину ускорения $a_{\text{эксп}}$. Значения величин $\langle t \rangle$ и $a_{\text{эксп}}$ внесите в табл. 2.1,б.

9. Активируйте клавишу «Повторить опыт», введите и запомните новое значение расстояния s между нижней гранью правого груза и сплошной платформой. Величину s внесите в табл. 2.1,б и повторите пп. 5-9 с тем, чтобы получить значения величин $\langle t \rangle$ и $a_{\text{эксп}}$ для трех значений расстояния s . По завершении экспериментов активируйте клавишу «Выход в меню».

10. Рассчитайте среднее значение ускорения $\langle a_{\text{эксп}} \rangle$ и внесите его в табл. 2.1,б.

11. Вычислите относительное отклонение δa величины $\langle a_{\text{эксп}} \rangle$ от значения $a_{\text{теор}}$ по формуле (2.8). Величина δa характеризует точность экспериментальной проверки формулы (2.6).

Задание 2. ПРОВЕРКА ФОРМУЛЫ СКОРОСТИ ПРИ РАВНОУСКОРЕННОМ ДВИЖЕНИИ

Это задание выполняется только на *компьютерном имитаторе* машины Атвуда. Мгновенная скорость движения тела определяется косвенным путем, что достигается следующим образом. На пути движения правого груза к сплошной платформе помещается кольцевая платформа, проходя которую груз оставляет перегрузок. В результате от начала движения до кольцевой платформы груз движется равноускоренно, а на пути от кольцевой до сплошной платформы – равномерно. Если t_y – время ускоренного движения груза до кольцевой платформы, s и t_p – расстояние и время равномерного движения между кольцевой и сплошной платформами, то скорость груза в момент времени t_y , очевидно, можно найти как

$$v = s/t_p. \quad (2.9)$$

В результате после подстановки выражения (2.9) в формулу (2.7) получим:

$$a_{\text{эксп}} = \frac{s}{t_p t_y}. \quad (2.10)$$

Рекомендуется придерживаться следующего порядка выполнения данного задания:

1. В режиме меню с помощью «мыши», нажав на её левую кнопку, выберите задание 2.

2. Введите и запомните последовательно из заданных интервалов массу перегрузка m_1 и высоту подъема h правого груза от нижней сплошной платформы.

3. Введите и запомните из заданного интервала значение расстояния s между кольцевой и сплошной платформами. Активируйте клавишу «ОК».

4. Данные о массе грузов m и массе перегрузка m_1 внесите в табл. 2.2,а.

Т а б л и ц а 2.2,а

| m , кг | m_1 , кг | $a_{\text{теор}}$, м/с ² |
|----------|------------|--------------------------------------|
| | | |

5. Вычислите по формуле (2.3) ускорение $a_{\text{теор}}$, с которым должны двигаться грузы, и внесите это значение в табл. 2.2,а.

6. Внесите в табл. 2,б. значение расстояния s между кольцевой и сплошной платформами.

Т а б л и ц а 2.2,б

| № опыта | s , м | t_y , с | $\langle t_y \rangle$, с | t_p , с | $\langle t_p \rangle$, с | $a_{\text{эксп}}$, м/с ² | $\langle a_{\text{эксп}} \rangle$, м/с ² | δa , % |
|---------|---------|-----------|---------------------------|-----------|---------------------------|--------------------------------------|--|----------------|
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |

7. Подведя курсор и используя левую кнопку мыши, нажмите клавишу «СЕТЬ», а затем – клавишу «ПУСК». При этом грузы придут в движение, верхний секундомер отсчитает время t_y прохождения груза от начала движения до кольцевой платформы, а нижний секундомер – время t_p прохождения груза от кольцевой до сплошной платформы. Значения t_y и t_p внесите в табл. 2.2,б.

8. Подведя курсор и используя левую кнопку мыши, нажмите клавишу «СБРОС», а затем – клавишу «ПУСК» и повторите п. 7 с тем, чтобы для данного расстояния s получить по четыре значения времени t_y и t_p .

9. Вычислите средние значения времён $\langle t_y \rangle$ и $\langle t_p \rangle$. Подставив в формулу (2.10) значения s , $\langle t_y \rangle$ и $\langle t_p \rangle$, рассчитайте величину ускорения $a_{\text{эксп}}$. Значения величин $\langle t_y \rangle$, $\langle t_p \rangle$ и $a_{\text{эксп}}$ внесите в табл. 2.2,б.

10. Активируйте клавишу «Повторить опыт», введите и запомните новое значение расстояния s между кольцевой и сплошной платформами. Величину s внесите в табл. 2.2,б и повторите пп. 7-9 с тем, чтобы получить значения величин $\langle t_y \rangle$, $\langle t_p \rangle$ и $a_{\text{эксп}}$ для трех значений расстояния s . После завершения экспериментов активируйте клавишу «Выход в меню».

11. Рассчитайте среднее значение ускорения $\langle a_{\text{эксп}} \rangle$ и внесите это значение в табл. 2.2,б.

12. Вычислите по формуле (2.8) относительное отклонение δa величины $\langle a_{\text{эксп}} \rangle$ от значения $a_{\text{теор}}$. Величина δa характеризует точность экспериментальной проверки выражения (2.10), а следовательно, и формулы (2.7).

Задание 3. ПРОВЕРКА ВТОРОГО ЗАКОНА НЬЮТОНА

Из второго закона Ньютона следует, что ускорение тела или системы тел данной массы изменятся пропорционально результирующей всех сил, действующих на тело или систему. При использовании машины Атвуда изменение результирующей силы при постоянной массе движущейся системы можно осуществить, воспользовавшись двумя перегрузками разных масс m_1 и m_2 ($m_1 < m_2$), перекладывая перегрузок меньшей массы с одного груза на другой.

Результирующая сила, приводящая систему в движение, равна разности сил тяжести, действующих на правый и левый грузы. Следовательно, если оба перегрузка находятся на правом грузе, то результирующая сила

$$F_1 = (m_1 + m_2)g. \quad (2.11)$$

Если перегрузок массой m_1 переложить на левый груз, то результирующая сила

$$F_2 = (m_2 - m_1)g. \quad (2.12)$$

С другой стороны, на основании второго закона Ньютона для системы тел, состоящей из двух грузов массой m каждый и двух перегрузков массами m_1 и m_2 , имеем

$$F_1 = (2m + m_1 + m_2)a_1 \quad (2.13)$$

и

$$F_2 = (2m + m_1 + m_2)a_2. \quad (2.14)$$

Откуда, поделив уравнение (2.13) на уравнение (2.14), получим:

$$k_F = k_a, \quad (2.15)$$

где $k_F = F_1/F_2$, (2.16)

$$k_a = a_1/a_2. \quad (2.17)$$

Содержанием третьего задания как раз и является проверка формулы (2.15), являющейся следствием второго закона Ньютона. Рассчитать же величины k_F и k_a можно, воспользовавшись формулами (2.11), (2.12) и (2.6), из которых найдём

$$k_F = \frac{m_1 + m_2}{m_2 - m_1} \quad (2.18)$$

и

$$k_a = (t_2/t_1)^2, \quad (2.19)$$

где t_1 – время прохождения грузами расстояния s в случае, когда оба перегрузка находятся на правом грузе; t_2 – время прохождения грузами этого же расстояния, когда перегрузок массой m_1 лежит на левом грузе, а перегрузок массой m_2 – на правом грузе.

Порядок выполнения задания на машине Атвуда

1. Данные о массах перегрузков m_1 и m_2 внесите в табл. 2.3,а.
2. Вычислите по формуле (2.18) величину k_F и внесите это значение в табл. 2.3,а.

Т а б л и ц а 2.3,а

| m_1 , кг | m_2 , кг | $k_F = F_1/F_2$ |
|------------|------------|-----------------|
| | | |

3. Включите установку в сеть, нажав клавишу «СЕТЬ». При этом на табло «ВРЕМЯ» должны быть нулевые показания. Если имеются какие-либо иные цифры, нажмите на клавишу «СБРОС». Клавиша «ПУСК» должна находиться в отжатом состоянии.

4. Установите верхний кронштейн в некотором фиксированном положении и значение расстояния s между чертами верхнего и нижнего кронштейнов внесите в табл. 2.3,б.

Таблица 2.3,б

| № опыта | s , м | t_1 , с | $\langle t_1 \rangle$, с | t_2 , с | $\langle t_2 \rangle$, с | $k_a = a_1/a_2$ | $\langle k_a \rangle$ | δk , % |
|---------|---------|-----------|---------------------------|-----------|---------------------------|-----------------|-----------------------|----------------|
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |

5. Поместите на правый груз оба перегрузка.

6. Нижнюю грань правого груза совместите с оптической осью фотоэлектрического датчика, укрепленного на верхнем кронштейне, и нажмите клавишу «ПУСК». При этом тормоз блока отключится, грузы придут в движение, и на табло «ВРЕМЯ» начнется отсчет времени движения. После того как правый груз пересечёт оптическую ось фотоэлектрического датчика нижнего кронштейна, отсчёт времени прекратится и на табло высветится время движения груза t_1 , значение которого вносят в табл. 2.3,б.

7. Нажмите на клавишу «СБРОС», отожмите клавишу «ПУСК» и повторите п.6 с тем, чтобы для данного расстояния s и данного расположения перегрузков получить четыре значения времени t_1 .

8. Переложите перегрузок меньшей массы m_1 на левый груз и повторите пп. 6–7, определяя теперь время t_2 .

9. Вычислите средние значения времён $\langle t_1 \rangle$ и $\langle t_2 \rangle$. Подставив в формулу (2.19) значения $\langle t_1 \rangle$ и $\langle t_2 \rangle$, рассчитайте величину k_a при прохождении грузами данного расстояния s . Значения величин $\langle t_1 \rangle$, $\langle t_2 \rangle$ и k_a внесите в табл. 2.3,б.

10. Нажмите на клавишу «СБРОС», отожмите клавишу «ПУСК» и измените положение верхнего кронштейна. Значение расстояния s между чертами верхнего и нижнего кронштейнов внесите в табл. 2.3,б и повторите пп. 6–9 с тем, чтобы получить значения величин $\langle t_1 \rangle$, $\langle t_2 \rangle$ и k_a для трёх значений s .

11. Рассчитайте среднее значение величины $\langle k_a \rangle$ и внесите это значение в табл. 2.3,б.

12. Вычислите относительное отклонение δk величины $\langle k_a \rangle$ от значения k_F по формуле

$$\delta k = \frac{|k_F - \langle k_a \rangle|}{k_F} \cdot 100\%. \quad (2.20)$$

Величина δk характеризует точность экспериментальной проверки второго закона Ньютона.

Порядок выполнения задания на компьютерном имитаторе

1. В режиме меню с помощью «мыши», нажав на её левую кнопку, выберите задание 3.

2. Введите и запомните высоту подъёма правого груза s .

2. Данные о массах перегрузков m_1 и m_2 внесите в табл. 2.3,а.

3. Вычислите по формуле (2.18) величину k_F и внесите это значение в табл. 2.3,а.

4. Внесите значение высоты подъёма правого груза s в табл. 2.3,б.

5. Подведя курсор и используя левую кнопку мыши, нажмите клавишу «СЕТЬ», а затем – клавишу «ПУСК». При этом грузы придут в движение, а секундомер отсчитает время t_1 прохождения грузами данного расстояния s . Значение времени t_1 внесите в табл. 2.3,б.

6. Подведя курсор и используя левую кнопку мыши, нажмите клавишу «СБРОС», а затем – клавишу «ПУСК» и повторите п. 6 с тем, чтобы для данного расстояния s и данного расположения перегрузков получить четыре значения времени t_1 .

7. Подведя курсор и используя левую кнопку мыши, нажмите клавишу «СБРОС». В результате система вернётся в исходное состояние, а перегрузок меньшей массы m_1 переместится на левый груз.

8. Нажмите на клавишу «ПУСК» и повторите п. 6 определяя теперь время t_2 .

9. Вычислите средние значения времён $\langle t_1 \rangle$ и $\langle t_2 \rangle$. Подставив в формулу (2.19) значения $\langle t_1 \rangle$ и $\langle t_2 \rangle$, рассчитайте величину k_a при прохождении системой данного расстояния s . Значения величин $\langle t_1 \rangle$, $\langle t_2 \rangle$ и k_a внесите в табл. 2.3,б.

10. Активируйте клавишу «Повторить опыт», введите и запомните новое значение расстояния s между нижней гранью правого груза и сплошной платформой. Величину s внесите в табл. 2.3,б и повторите пп. 5–9 с тем, чтобы получить значения величин $\langle t_1 \rangle$, $\langle t_2 \rangle$ и k_a для трёх значений s . После завершения экспериментов активируйте клавишу «Выход в меню», а затем клавишу «Выход».

12. Рассчитайте среднее значение величины $\langle k_a \rangle$ и внесите это значение в табл. 2.3,б.

13. Вычислите относительное отклонение δk величины $\langle k_a \rangle$ от значения k_F по формуле (2.20). Величина δk характеризует точность экспериментальной проверки второго закона Ньютона.

Контрольные вопросы

1. Что называется движением?
2. Как понимали сущность движения сторонники диалектического материализма?
3. Опишите подход к движению сторонников метафизической концепции.
4. Опишите свойства движения.
5. Приведите классификацию форм движения в природе.
6. Какое движение называется механическим?
7. Что такое материальная точка?
8. Что называется телом отсчёта, системой отсчёта?
9. В чём суть координатного и векторного способов описания движения материальной точки?
10. Что называется траекторией движения тела и пройденным путём?
11. Что такое вектор перемещения тела?
12. Что характеризует скорость движения тела? Как определяется мгновенная скорость? В каких единицах измеряется скорость?
13. Что характеризует вектор ускорения? Как определяется вектор мгновенного ускорения? В каких единицах измеряется ускорение?
14. Какое движение называется равноускоренным? Запишите формулы кинематики прямолинейного равноускоренного движения.
15. Постройте графики зависимости от времени координаты тела, движущегося равноускоренно, пройденного им пути, скорости и ускорения тела.
16. Дайте определение массы и назовите единицу измерения массы.
17. Что называется импульсом тела?
18. Дайте определение силы и назовите единицу измерения силы.
19. Что называется импульсом силы?
20. Сформулируйте законы Ньютона.
21. Каковы цель и порядок выполнения работы?

Лабораторная работа № 3
ИЗУЧЕНИЕ АБСОЛЮТНО УПРУГОГО
И НЕУПРУГОГО СОУДАРЕНИЙ ШАРОВ

Цель работы – изучение законов сохранения импульса и энергии.

1. ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ВВЕДЕНИЕ

1.1. Принципы симметрии и законы сохранения в природе

Экспериментально установлено, что в природе возможны не любые процессы и движения, а только те, которые не нарушают законов сохранения.

Законы сохранения – это физические законы, согласно которым числовые значения некоторых физических величин, характеризующих состояние системы, в определённых процессах не изменяются.

Формулировка любого закона сохранения включает две части. В одной утверждается, что рассматриваемая величина сохраняется, а в другой указываются условия, при которых сохранение данной величины имеет место.

Законы сохранения тесно связаны с фундаментальными свойствами симметрии в природе.

С симметричными объектами мы постоянно встречаемся в природе, в технике, в быту. Например, симметричны фасады зданий, корпуса технических устройств, кристаллы, звёзды, галактики, стихотворные строфы, композиции живописных полотен и т.д. Для многих высших животных характерна двухсторонняя симметрия, для более примитивных организмов – радиальная (морские звёзды) или даже сферическая (радиолярии).

Симметрия – это инвариантность (неизменность) объектов или их свойств относительно того или иного преобразования.

В зависимости от того, какие преобразования сохраняют объект инвариантным, различают разные виды симметрий.

Простейшие симметрии – *геометрические (пространственные)*. Они сводятся к инвариантности относительно того или иного геометрического преобразования (поворота вокруг оси, сдвига, отражения в плоскости).

Чем больше преобразований оставляют геометрическую фигуру неизменной, тем она более симметрична. Например, квадрат более симметричен, чем прямоугольник, потому что переходит сам в себя при повороте не только на 180, но и на 90 градусов в своей плоскости. Кроме того, его диагонали являются осями симметрии, а диагонали прямоугольника – нет.

Самая симметричная фигура – шар. Любая прямая, проходящая через центр шара, является его осью симметрии, любая плоскость, проходящая через центр шара, – плоскостью симметрии. Следовательно, сфера инвариантна относительно любого поворота.

Наличие инвариантных физических величин в окружающем нас мире отражает *симметрию пространства и времени*.

Физическое пространство и время характеризуют три основных типа симметрии: *однородность пространства, изотропность пространства и однородность времени*.

Однородность пространства означает эквивалентность (или равноправие) всех точек физического пространства.

То есть параллельный сдвиг физической системы в любом направлении не влияет на характер протекающих в ней процессов. Однородность пространства проявляется в возможности произвольного выбора начала отсчёта пространственных координат.

Изотропность пространства соответствует эквивалентности всех направлений в пространстве и симметрии физической системы относительно её произвольного поворота, который не влияет на процессы, протекающие в системе.

Пространство неразрывно связано с материей. Поэтому наша Вселенная также изотропна.

Однородность времени отражает симметрию по отношению к сдвигу времени (выбору момента начала отсчёта времени), не влияющему на характер процессов в физической системе, то есть эквивалентность всех моментов времени.

Однородность времени проявляется в одинаковости свойств времени в прошлом, настоящем и будущем.

Гипотезу о том, что геометрические симметрии пространства и времени связаны с законами природы, высказывали ещё античные мыслители. На фундаментальный характер свойств симметрии также обращал внимание Иоганн Кеплер в своем труде «О гармонии мира» (1619 г.).

В 1918 г. немецкий математик Амали **Нётер** сформулировала **теорему**:

каждому типу непрерывной симметрии пространства и времени соответствует закон сохранения определённой физической величины.

Возможно обратное утверждение:

каждый закон сохранения отражает определённый тип непрерывной симметрии пространства и времени.

Установлено, что:

с однородностью времени связан закон сохранения энергии,

с однородностью пространства – закон сохранения импульса,

с изотропностью пространства – закон сохранения момента импульса.

Особую значимость для познания природы приобрёл закон сохранения энергии.

Энергия есть общая мера различных форм движения и взаимодействия всех видов материи.

Закон сохранения и превращения энергии, экспериментальное открытие которого связано с именами немецкого врача **Роберта Майера** (1814–1878 гг.), английского физика **Джеймса Джоуля** (1818–1889 гг.) и немецкого естествоиспытателя **Германа Гельмгольца** (1821–1894 гг.) утверждает, что

суммарная энергия изолированной системы не изменяется; при эволюции системы могут изменяться доли энергий различного вида, что объясняется переходом энергии из одного вида в другой.

Преобразование энергии происходит в любых природных процессах, и выполняющийся при этих преобразованиях закон сохранения и превращения энергии связывает все явления природы воедино. Он выполняется при протекании сложных комплексных природных явлений (энергообмена в живых организмах, климатических процессов, химического превращения веществ), а следовательно, может быть положен в основу соответствующих количественных моделей всех подобных процессов.

С сохранением энергии напрямую связано сохранение массы. Закон сохранения массы вещества был экспериментально доказан выдающимся русским мыслителем-материалистом **Михаилом Васильевичем Ломоносовым** (1711–1765 гг.). В 1756 году он выполнил классический опыт: поместил в стеклянный сосуд кусок металла и взвесил сосуд. Затем, запаяв узкое горлышко сосуда, нагрел его на огне. После охлаждения, не открывая сосуд, взвесил его вместе с содержимым ещё раз.

Опыт показал, что в запаянном сосуде без доступа воздуха вес металла не увеличивается и при этом общая масса сосуда и помещённого в него тела остаётся неизменной. Через 17 лет после Ломоносова этот закон экспериментально подтвердил французский химик **Антуан Лавуазье** (1743–1794 гг.).

Он сформулировал **закон сохранения массы** в химических процессах:

сумма масс исходных веществ (соединений) равна сумме масс продуктов химической реакции.

Мерой механического поступательного движения тела является количество движения или импульс \vec{p} , определяемый произведением массы m тела на его скорость \vec{v} :

$$\vec{p} = m\vec{v}.$$

Вектор импульса сонаправлен с вектором скорости тела. Импульс механической системы определяется как геометрическая сумма импульсов всех её точек или как произведение массы системы на скорость её центра масс.

Закон сохранения импульса был установлен в 1665 году английским физиком **Христианом Гюйгенсом** (1629–1695 гг.):

в замкнутой системе (не испытывающей внешних воздействий) векторная сумма импульсов тел остаётся постоянной при любых взаимодействиях тел системы между собой.

$$\sum m_i \vec{v}_i = \text{const.}$$

Экспериментальные исследования систем различных тел – от планет и звёзд до атомов, электронов и элементарных частиц – показали, что в любой системе взаимодействующих между собой тел при отсутствии действия сил со стороны других тел, не входящих в систему, или равенстве нулю суммы действующих на систему сил векторная (геометрическая) сумма импульсов тел остается постоянной.

На законе сохранения импульса основано реактивное движение. Его используют также при расчете направленных взрывов, например при прокладке туннелей в горах.

Мерой механического вращательного движения тела является момент импульса \vec{L} , определяемый векторным произведением векторов \vec{p} и \vec{r} .

$$\vec{L} = [\vec{p} \times \vec{r}],$$

где \vec{r} – радиус-вектор, проведённый из неподвижной точки O оси вращения в данную точку тела.

Закон сохранения момента импульса, установленный в 1746 г. швейцарскими математиками и механиками **Леонардом Эйлером** (1707–1783 гг.) и **Даниилом Бернулли** (1700–1782 гг.), утверждает, что

момент импульса замкнутой системы тел относительно любой неподвижной точки не изменяется с течением времени.

Эти законы сохранения стали фундаментальными законами природы потому, что определяются свойствами симметрии пространства-времени, в котором движутся материальные тела.

Кроме простых (геометрических) симметрий, в природе существуют весьма сложные симметрии, связанные не с пространством и временем, а с определённым типом взаимодействий и сводящиеся к инвариантности хода того или иного процесса относительно изменения условий его протекания. В физике их называют *динамическими* симметриями. Они не являются наглядными, и даже простейшие из них, например так называемые *калибровочные симметрии*, трудно объяснить без использования довольно сложной физической теории. Калибровочным симметриям в

физике также отвечают некоторые законы сохранения. Например, одна из них соответствует закону сохранения электрического заряда:

алгебраическая сумма зарядов электрически изолированной системы постоянна

$$q_1 + q_2 + q_3 + \dots + q_n = \text{const}.$$

Этот закон экспериментально доказал английский физик **Майкл Фарадей** в 1843 г.

Следствием других калибровочных симметрий являются законы сохранения лептонного и барионного зарядов в любой ядерной реакции.

1.2. Абсолютно упругое и неупругое столкновения

Столкновения движущихся тел присущи всем уровням мироздания – от микроскопического до космического, поэтому ударные явления весьма многообразны. В механике изучают влияние соударений на движение механических систем. Эта задача привлекала внимание многих известных ученых, включая Христиана Гюйгенса, Исаака Ньютона, Жана Даламбера, Жана Дарбу, Эрхарда Дж. Рауса, А. М. Ляпунова, Н. Е. Жуковского, С.П. Тимошенко и других.

Специфика ударов состоит в их интенсивности и скоротечности. Это свойство может оказаться и полезным, как, например, при забивке свай, добыче руды или игре в мяч, и опасным, как, например, при транспортных происшествиях. Следовательно, проблема удара важна не только для теоретиков, но и для конструкторов, автолюбителей, спортсменов и др.

Удар твёрдых тел – это совокупность явлений, возникающих при столкновении тел.

Промежуток времени, в течение которого длится удар, обычно очень мал ($\sim 10^{-4}$ – 10^{-5} с), а ударные силы очень велики. За время удара они изменяются в широких пределах и достигают значений, при которых средние величины давления на площадках контакта имеют порядок 10^4 и даже 10^5 атм. Действие ударных сил приводит к значительному изменению скоростей точек тел за время удара. Следствиями ударов могут быть также остаточные деформации, нагревание тел, изменение механических свойств их материалов, а при больших скоростях соударения – разрушение тел в месте удара.

Анализ явлений, имеющих место при ударе сплошных тел, довольно сложен, поэтому рассмотрим самый простой случай – центральное соударение двух однородных шаров. В этом случае векторы скорости шаров до удара направлены по прямой, проходящей через их центры.

Для классификации результата соударения вводят понятие абсолютно упругого и абсолютно неупругого ударов.

Абсолютно упругий удар – столкновение, при котором деформация тел оказывается обратимой, т.е. исчезающей после прекращения взаимодействия.

Например, после абсолютно упругого удара о стенку футбольный мяч восстанавливает шарообразную форму.

Абсолютно упруго сталкиваются многие элементарные частицы, бильярдные шары, теннисный мяч с ракеткой.

Чтобы удар был абсолютно упругим, взаимодействующие тела должны обладать определенными свойствами. А именно, силы, возникающие при ударе, должны *зависеть от величины деформации и не зависеть от её скорости*. К материалам, имеющим такие свойства, относятся, в первую очередь, инструментальные сорта стали, слоновая кость.

Их соударение происходит следующим образом. При ударе возникают деформации тел, а значит и силы, сообщающие обоим телам ускорения в противоположных направлениях. В какой-то момент времени скорости шаров становятся равными, деформации достигают максимального значения, силы продолжают действовать, изменяя скорости в тех же направлениях, что и раньше. Поэтому шары будут «отодвигаться» друг от друга, а деформации уменьшаться, пока совсем не исчезнут. К этому моменту времени упругие силы, возникающие в телах, совершат такую же работу, какая была затрачена на деформацию тел. В результате *вся кинетическая энергия, которой обладали тела до удара, снова перейдет в кинетическую энергию тел после удара*.

Силы взаимодействия между сталкивающимися телами (ударные или мгновенные силы) столь велики, что внешними силами, действующими на них, можно пренебречь. Это позволяет систему тел в процессе их соударения приближенно рассматривать как замкнутую систему и применять к ней законы сохранения. Для абсолютно упругого удара выполняются закон сохранения импульса и закон сохранения кинетической энергии.

Рассмотрим столкновение двух шаров массами m_1 и m_2 , движущихся до удара со скоростями \vec{v}_1 и \vec{v}_2 , направленными вдоль линии, соединяющей центры шаров (рис. 3.1). Найдём скорости шаров \vec{v}'_1 и \vec{v}'_2 после удара.

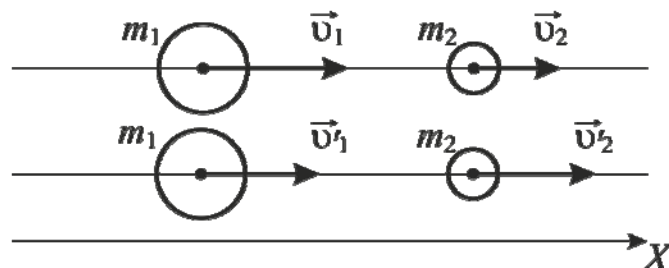


Рис. 3.1. Абсолютно упругий удар шаров

Закон сохранения импульса для шаров

$$m_1 \vec{v}_1 + m_2 \vec{v}_2 = m_1 \vec{v}'_1 + m_2 \vec{v}'_2$$

в проекции на горизонтальную ось X имеет вид

$$m_1 v_1 + m_2 v_2 = m_1 v'_1 + m_2 v'_2. \quad (3.1)$$

Уравнение (3.1) содержит два неизвестных v'_1 и v'_2 .

Для их однозначного определения требуется ещё одно уравнение – закон сохранения энергии

$$\frac{m_1 v_1^2}{2} + \frac{m_2 v_2^2}{2} = \frac{m_1 v'^2_1}{2} + \frac{m_2 v'^2_2}{2}. \quad (3.2)$$

Решая систему уравнений (3.1) и (3.2), определяют скорости шаров после удара

$$v'_1 = \frac{(m_1 - m_2)v_1 + 2m_2 v_2}{m_1 + m_2}, \quad v'_2 = \frac{(m_2 - m_1)v_2 + 2m_1 v_1}{m_1 + m_2}.$$

Абсолютно неупругий удар – столкновение тел, в результате которого они движутся как единое целое.

Примерами абсолютно неупругого удара являются столкновение метеорита с Землёй, мухи с лобовым стеклом автомобиля, пули с песком, захват нейтрона ядром урана, присоединение электрона ионом и т.д.

После абсолютно неупругого удара скорости соударяющихся тел одинаковы. Это возможно, если тела обладают такими свойствами, что силы, возникающие при их деформации, зависят не от величины, а от скорости изменения деформации. Такие свойства присущи, например, мягкой глине, пластилину.

При неупругом соударении происходит следующее. В начальный момент удара скорость деформации велика (шары сжимаются), поэтому возникают значительные силы, сообщающие обоим шарам ускорения, направленные в противоположные стороны. В процессе удара скорости деформации шаров уменьшаются, а сами деформации увеличиваются до тех пор, пока скорости шаров не окажутся равными. В этот момент деформации шаров перестанут изменяться, исчезнут силы, и оба шара будут двигаться с одинаковой скоростью.

При абсолютно неупругом ударе выполняются законы сохранения импульса и полной энергии. Механическая же энергия тел до удара больше механической энергии после удара, так как при ударе она частично (или полностью) переходит во внутреннюю энергию тел и расходуется на работу по деформации тел.

Рассмотрим абсолютно неупругий удар двух шаров, движущихся навстречу друг другу (рис. 3.2).

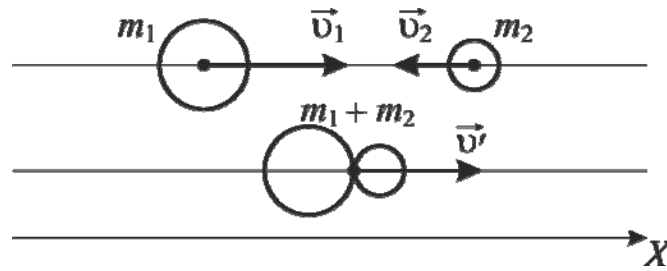


Рис. 3.2. Абсолютно неупругий удар

Если массы шаров m_1 и m_2 , их скорости до удара \vec{v}_1 и \vec{v}_2 , то, используя закон сохранения импульса, можно записать

$$m_1 \vec{v}_1 + m_2 \vec{v}_2 = (m_1 + m_2) \vec{v}'.$$

В проекции на горизонтальную ось это уравнение имеет вид

$$m_1 v_1 - m_2 v_2 = (m_1 + m_2) v'. \quad (3.3)$$

После неупругого удара шары движутся вместе в том направлении, в котором до удара двигался шар с большим импульсом.

Решая уравнение (3.3), определяют величину скорости шаров v' после удара.

Закон сохранения энергии для неупругого удара шаров имеет вид:

$$\frac{m_1 v_1^2}{2} + \frac{m_2 v_2^2}{2} = \frac{(m_1 + m_2) v'^2}{2} + \Delta K, \quad (3.4)$$

где ΔK – потеря кинетической энергии, перешедшей в тепловую или другие формы энергии.

Из формулы (3.4) следует, что

$$\Delta K = \left(\frac{m_1 v_1^2}{2} + \frac{m_2 v_2^2}{2} \right) - \frac{(m_1 + m_2) v'^2}{2}.$$

На практике абсолютно упругий и абсолютно неупругий удары могут быть реализованы лишь с определенной степенью приближения.

2. ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ

Внешний вид лабораторной установки представлен на рис. 3.3.

Лабораторная установка состоит из корпуса 1, на котором закреплен штатив 2. К штативу на тонких нерастяжимых нитях 3 длиной ℓ подвешены металлические шары 4 и 5. На лицевой панели корпуса имеются кнопки «ВКЛ» и «ПУСК» для управления электромагнитом. Электромагнит 6 установлен на корпусе так, что его ось проходит через центр тяжести шара 5. На штативе 2 закреплен транспортер 7, в котором имеются правая и левая шкалы. Нити 3 выполняют функцию указателей при определении углов их отклонения от вертикали. В исходном положении нити обоих

шаров строго вертикальны и пересекают шкалы в нулевом делении. При этом шары 4 и 5 касаются друг друга. Характеристики установки приведены в табл. 3.1.

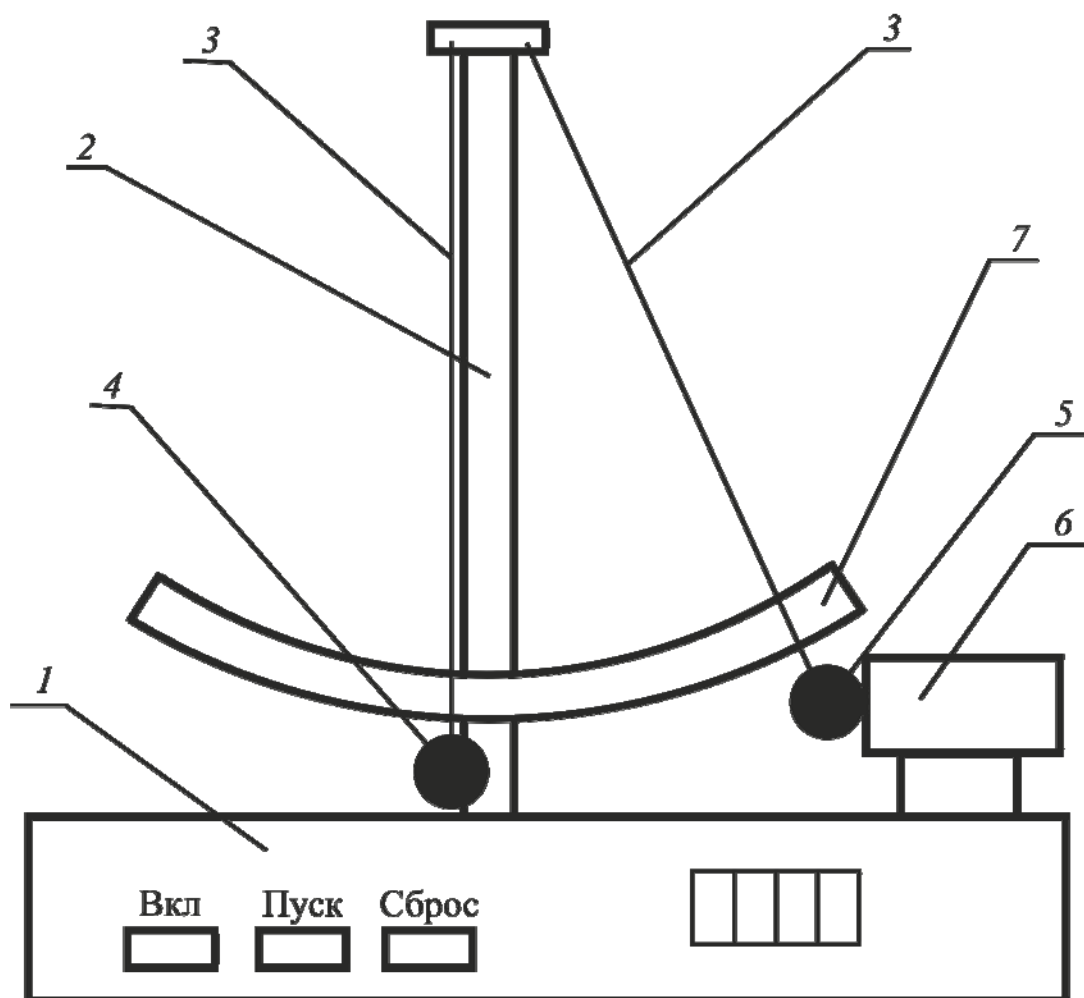


Рис. 3.3. Лабораторная установка для изучения соударений шаров

Т а б л и ц а 3.1

| m_1 , кг | m_2 , кг | m_3 , кг | m_4 , кг |
|------------|------------|------------|------------|
| 0,105 | 0,105 | 0,172 | 0,192 |

Подготовка установки к работе:

Включите вилку в сеть и нажмите кнопку «ВКЛ». При этом загорится индикатор в правой части прибора. Возьмите шар 5 рукой и поднесите его к сердечнику электромагнита 6. Электромагнит захватывает и удерживает шар 5. Нить отклоняется от вертикали на угол α , который отсчитывается по правой шкале транспортира 7. Если шар 4 при этом качается, следует остановить его рукой.

Чтобы освободить шар 5, нужно нажать кнопку «ПУСК», при этом электромагнит отключится. Освободившись, шар 5 движется вниз и ударяет по шару 4. В результате центрального удара шары расходятся, при

этом нити отклоняются на углы β и γ от вертикали. В какой-то момент времени шары останавливаются. В этот момент надо измерить углы β и γ по правой и левой шкалам транспортира 7.

Меняя шары, можно исследовать центральный упругий удар шаров одинаковой и различной массы, а добавляя к шарам пластилиновую проставку, – и неупругий удар шаров. Для повышения точности рекомендуется продублировать каждый опыт не менее 5 раз.

3. МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Методика эксперимента заключается в организации центрального упругого и неупругого соударения шаров, экспериментальном определении скоростей шаров до и после удара, расчете и сравнении суммарного импульса шаров до и после соударения.

В идеальном эксперименте закон сохранения импульса $\vec{p}_1 + \vec{p}_2 = \vec{p}'_1 + \vec{p}'_2$ в проекции на горизонтальную ось для упругого удара имеет вид

$$p_1 = -p'_1 + p'_2,$$

для неупругого удара

$$p_1 = p'_1 + p'_2, \quad (3.5)$$

где p_1 – импульс шара 5 до удара; p'_1 – импульс шара 5 после удара; p'_2 – импульс шара 4 после удара.

В реальном эксперименте за счет погрешностей измерений и потерь энергии равенство не выполняется. Абсолютную погрешность эксперимента вычисляют по формулам:

$$\begin{aligned} \Delta p &= p_1 - (p'_2 - p'_1) \text{ – для упругого удара;} \\ \Delta p &= p_1 - (p'_1 + p'_2) \text{ – для неупругого удара.} \end{aligned} \quad (3.6)$$

Относительная погрешность измерений равна

$$\delta p = \frac{\Delta p}{p_1} 100\%. \quad (3.7)$$

Для определения импульса шаров требуется знать их скорости до и после соударения. Экспериментальное определение скоростей связано с некоторыми трудностями метрологического плана. Более просто можно определить скорости шаров расчётным путём на основе закона сохранения энергии. Будем рассматривать систему, состоящую из шара 4 или 5 и Земли, как изолированную, в которой действуют только консервативные силы.

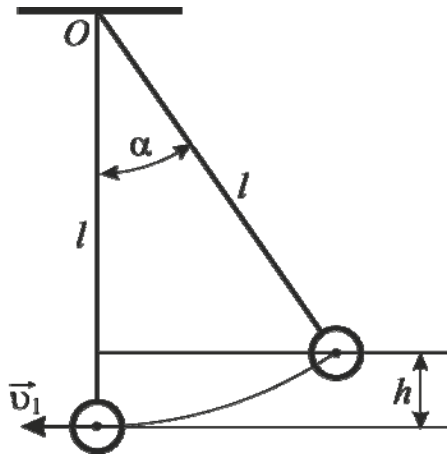


Рис. 3.4

Механическая энергия шара складывается из кинетической K и потенциальной Π и в любой точке траектории остается постоянной. В состоянии готовности шар 5 массой m_1 , захваченный электромагнитом, поднят на некоторую высоту h по отношению к исходному положению (рис. 3.4). Потенциальная энергия шара рассчитывается по формуле

$$\Pi = m_1gh. \quad (3.8)$$

Высота h связана с длиной ℓ нити и углом α её отклонения от вертикали соотношением

$$h = \ell(1 - \cos \alpha). \quad (3.9)$$

Под действием силы тяжести шар 5 будет опускаться вниз, двигаясь по дуге окружности радиусом ℓ . При этом его потенциальная энергия уменьшается, а кинетическая – растёт. Кинетическая энергия шара в любой точке траектории

$$K = \frac{m_1v^2}{2}. \quad (3.10)$$

В нижней точке траектории потенциальная энергия переходит в кинетическую

$$\frac{m_1v_1^2}{2} = m_1g\ell(1 - \cos \alpha). \quad (3.11)$$

Из формулы (3.11) следует, что скорость шара 5 перед ударом о неподвижный шар 4 равна

$$v_1 = \sqrt{2g\ell(1 - \cos \alpha)}. \quad (3.12)$$

В результате соударения шары отскакивают друг от друга, имея начальные скорости v'_1 и v'_2 , и спустя некоторое время останавливаются. При этом нити отклоняются на углы β и γ от вертикали. Начальные скорости шаров и углы отклонения нитей также связаны законом сохранения энергии. Скорость шара 5 после соударения

$$v'_1 = \sqrt{2g\ell(1 - \cos \beta)}. \quad (3.13)$$

Скорость шара 4 после соударения

$$v'_2 = \sqrt{2g\ell(1 - \cos \gamma)}. \quad (3.14)$$

Импульс шара 5 до удара

$$p_1 = m_1v_1. \quad (3.15)$$

Импульс шара 5 после удара

$$p'_1 = m_1 v'_1. \quad (3.16)$$

Импульс шара 4 после удара

$$p'_2 = m_2 v'_2. \quad (3.17)$$

Таким образом, измеряя длину нитей и углы отклонения нитей до и после соударения шаров по формулам (3.12)–(3.14) и (3.15)–(3.17), можно подсчитать скорости и импульсы шаров, а также абсолютную и относительную погрешности эксперимента. Если относительная погрешность не превышает 5 %, то можно считать, что закон сохранения импульса выполняется.

4. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

Задание 1 . Упругий удар шаров одинаковой массы

1. Подвесьте на установке шары 4 и 5 одинаковой массой m_1 и m_2 .
2. Измерьте длину нити ℓ от точки подвеса до центра шаров, занесите полученные данные в табл. 3.2.
3. Зафиксируйте шар 5 электромагнитом, измерьте угол α , образованный нитью с вертикалью. Запишите значение угла в табл. 3.2.
4. Нажмите кнопку «ПУСК» и приведите шар 5 в движение. После соударения шаров измерьте углы β и γ , на которые отклоняются нити шаров 5 и 4. При заданном значении α повторите опыт 3 раза.
5. Подсчитайте средние значения углов β и γ . Запишите их в табл. 3.2.
6. Изменяя α , повторите пп. 3–5 четыре раза.
7. По формулам (3.12)–(3.14) подсчитайте скорости шаров до и после удара.
8. По формулам (3.15)–(3.17) подсчитайте значения импульсов шаров до и после удара. Запишите значения скоростей и импульсов шаров в табл. 3.2.
9. Подсчитайте абсолютную Δp и относительную δp ошибку эксперимента по формулам (3.6) и (3.7) и занесите значение δp в табл. 3.2.

Т а б л и ц а 3.2

| № | ℓ , м | $m_1 = \text{кг}$ | | | | | | $m_2 = \text{кг}$ | | | δp , % |
|---|------------|-------------------|-------------|----------------|---------|--------------|-----------------|-------------------|--------------|-----------------|----------------|
| | | α | v_1 , м/с | p_1 , кг·м/с | β | v'_1 , м/с | p'_1 , кг·м/с | γ | v'_2 , м/с | p'_2 , кг·м/с | |
| 1 | | | | | | | | | | | |
| 2 | | | | | | | | | | | |
| 3 | | | | | | | | | | | |
| 4 | | | | | | | | | | | |
| 5 | | | | | | | | | | | |

Задание 2. Упругий удар шаров различной массы

1. Подвесьте на установке шары 4 массой m_3 и 5 массой m_4 .
2. Измерьте длину нити ℓ занесите значения m_3 , m_4 и ℓ в табл. 3.3.
3. Зафиксируйте шар 5 электромагнитом, измерьте угол α , образованный нитью с вертикалью. Запишите значение угла в табл. 3.3.
4. Нажмите кнопку «ПУСК» и приведите шар 5 в движение. После соударения шаров измерьте углы β и γ , на которые отклоняются нити шаров 5 и 4. Повторите опыт 3 раза.
5. Подсчитайте средние значения углов β и γ . Запишите их в табл. 3.3.
6. Изменяя α , повторите пп. 3–5 четыре раза.
7. Подсчитайте скорости шаров до и после удара по формулам (3.12)–(3.14). Подсчитайте значения импульсов шаров до и после удара по формулам (3.15)–(3.17). Запишите их в табл. 3.3.
8. Подсчитайте абсолютную Δp и относительную δp погрешности эксперимента по формулам (3.6) и (3.7). Занесите значение δp в табл. 3.3.

Т а б л и ц а 3.3

| № | ℓ , м | $m_3 = \text{кг}$ | | | | | $m_4 = \text{кг}$ | | | δp , % | |
|---|---------------|-------------------|-------------------|-------------------|---------|--------------------|--------------------|----------|--------------------|-------------------|--------------------|
| | | α | $v_1, \text{м/с}$ | p_1 , кг·м/с | β | $v'_1, \text{м/с}$ | p'_1 , кг·м/с | γ | $v'_2, \text{м/с}$ | | p'_2 , кг·м/с |
| 1 | | | | | | | | | | | |
| 2 | | | | | | | | | | | |
| 3 | | | | | | | | | | | |
| 4 | | | | | | | | | | | |
| 5 | | | | | | | | | | | |

Задание 3. Неупругий удар шаров одинаковой массы

1. Подвесьте на установке шары 4 и 5 одинаковой массой m_1 и m_2 . На шаре 4 в точке касания его с шаром 5 прилепите маленький пластилиновый шарик.
2. Измерьте длину нити ℓ . Занесите значения m_1 , m_2 и ℓ в табл. 3.4.
3. Зафиксируйте шар 5 электромагнитом, измерьте угол α , образованный нитью с вертикалью. Запишите значение угла α в табл. 3.4.
4. Нажмите кнопку «ПУСК» и приведите шар 5 в движение. После соударения шаров измерьте угол β , на который отклоняются нити шаров 5 и 4. При заданном значении α повторите опыт 3 раза.
5. Подсчитайте средние значения β . Запишите их в табл. 3.4.
6. Изменяя α , повторите пп. 3–5 четыре раза.
7. Подсчитайте скорости и значения импульсов шаров до и после удара. Запишите их в табл. 3.4. После удара шары движутся вместе, поэтому $v'_1 = v'_2 = v'$.

8. Подсчитайте абсолютную Δp и относительную δp ошибку эксперимента по формулам (3.6) и (3.7). Занесите значение δp в табл. 3.4.

9. Выключите установку.

Т а б л и ц а 3.4

| № | ℓ , м | $m_1 = \text{кг}$ | | | | | $m_2 = \text{кг}$ | | | δp , % | |
|---|---------------|-------------------|-------------|-------------------|---------|--------------|--------------------|---------|--------------|-------------------|--------------------|
| | | α | v_1 , м/с | p_1 , кг·м/с | β | v'_1 , м/с | p'_1 , кг·м/с | β | v'_2 , м/с | | p'_2 , кг·м/с |
| 1 | | | | | | | | | | | |
| 2 | | | | | | | | | | | |
| 3 | | | | | | | | | | | |
| 4 | | | | | | | | | | | |
| 5 | | | | | | | | | | | |

Задание 4. Выполнение лабораторной работы на компьютере

1. Нажмите клавишу «Enter», после чего в режиме меню с помощью «мыши», нажав на её левую кнопку, выберите задание № 1.

2. В поля ввода введите из заданных интервалов начальные данные: массу шаров, длину нити, угол отклонения нити α .

3. Приведите систему в движение, нажав дважды на кнопку «ПУСК». При каждом α повторите опыт три раза. Средние значения углов β и γ отклонения нитей после соударения шаров занесите в табл. 3.2.

4. Чтобы выйти в меню, нажмите кнопку «ВЫХОД». Выберите задание № 2.

5. Введите начальные данные: массу большего и меньшего шаров, длину и угол отклонения нити α .

6. Нажмите кнопку «ПУСК». При этом система придет в движение. Средние значения углов β и γ отклонения нитей после соударения шаров занесите в табл. 3.3.

7. Повторите п. 4 и выберите задание № 3.

8. Для изучения неупругого удара введите значения массы обоих шаров, длины нити и угла отклонения нити α .

9. Приведите установку в начальное положение и запустите систему двойным нажатием кнопки «ПУСК». При каждом α повторите опыт три раза. Средние значения β внесите в табл. 3.4.

10. Рассчитайте скорости, импульсы шаров до и после удара, а также величины Δp , δp при абсолютно упругом и неупругом ударах и внесите результаты вычислений в соответствующие табл. 3.2, 3.3 и 3.4.

Контрольные вопросы

1. Что понимается под симметрией в естествознании?
2. Какими основными свойствами симметрии обладают пространство и время?

3. Что означают однородность и изотропность пространства, однородность времени?

3. В чём суть теоремы Нётер? Какова связь между симметрией пространства–времени и законами сохранения?

4. Какие симметрии называются динамическими? Каким законам сохранения они соответствуют?

5. Какое взаимодействие называется ударом? Какие виды ударов существуют в природе?

6. Какой удар является абсолютно упругим? Приведите примеры такого удара.

7. Запишите и сформулируйте законы сохранения импульса и энергии при абсолютно упругом ударе.

8. Какой удар считается абсолютно неупругим? Приведите примеры такого удара.

9. Запишите и сформулируйте законы сохранения импульса и энергии при абсолютно неупругом ударе. Почему после абсолютно неупругого удара тел их суммарная кинетическая энергия уменьшается?

10. Проанализируйте случай упругого соударения двух шаров одинаковой массы, один из которых до удара движется, а другой покоится. Определите скорости тел после удара.

2. ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ КАРТИНА МИРА

Электромагнитная концепция устройства мира сформировалась во второй половине XIX – начале XX в.в. на базе научных открытий и теоретических разработок в области электромагнетизма:

– законов электродинамики английского химика и физика Майкла Фарадея (1791–1867 гг.), экспериментально доказавшего, что между электричеством и магнетизмом существует прямая динамическая связь;

– теории электромагнитного поля выдающегося английского учёного Джеймса Максвелла (1831–1879 гг.), осуществившего математическую обработку идей Фарадея;

– классической электронной теории нидерландского физика-теоретика Хендрика Лоренца (1853–1928 гг.);

– постулатов теории относительности Альберта Эйнштейна (1879–1955 гг.), позволивших полностью обосновать электромагнитную теорию.

В рамках электромагнитной картины мира (ЭМКМ) сложилась *полевая, континуальная* (непрерывная) модель реальности, согласно которой:

- *материя* – единое непрерывное поле с точечными силовыми центрами (электрическими зарядами) и волновыми движениями в нём;
- *мир* – электродинамическая система, построенная из электрически заряженных частиц, взаимодействующих посредством электромагнитного поля;
- *движение* – распространение электромагнитных колебаний в поле, которое описывается законами электродинамики;
- *пространство и время* – несамостоятельны, зависят от материи, то есть связаны с процессами, происходящими в поле (реляционная (относительная) концепция пространства и времени).

2.1. Основные экспериментальные законы электромагнетизма

Электрические и магнитные явления были известны человечеству с глубокой древности.

Древние греки заметили, что два куска янтаря, потёртые о шерсть, отталкиваются друг от друга, а также притягивают к себе различные мелкие предметы (соломинки, пушинки, ворсинки меха и т.д.). Однако только в 1600 г. благодаря английскому физика **Уильяму Гильберту** появилось учение об электричестве. С помощью простейшего электроскопа он выяснил, что подобными свойствами обладают и другие вещества: стеклянная палочка, потёртая о шёлк, палочка из органического стекла, натёртая о бумагу, эбонит (каучук с большой примесью серы), потёртый о

сукно или мех. Именно Гильберт ввёл термин *электричество* (от греч. *electron* – янтарь) и понятие *электризации*.

Электризация представляет процесс приобретения телом электрических свойств.

Магнитные явления были известны человечеству более 2000 лет назад. Начиная со II в. н.э. в Китае изготавливались *постоянные магниты*, надолго сохраняющие магнитные свойства. В 1269 г. французский исследователь **Пьер де Марикур**, помещая стальные иголки вблизи шара из магнетита, заметил, что они испытывают наибольшее притяжение вблизи двух диаметрально противоположных точек. Он назвал их *магнитными полюсами*. Магнит, изготовленный Марикуром в виде стержня, ориентировался в направлении юг–север подобно стрелке компаса. Полюс, указывающий направление на север, называли северным (**N**), а на юг – южным (**S**). Опыты Марикура показали, что *одноимённые магнитные полюса отталкиваются друг друга, а разноимённые притягиваются*. Предполагая, что взаимодействие магнитов обуславливается магнитными зарядами, находящимися на полюсах, Марикур пытался их разделить. Однако все его попытки получить *магнитный монополюс* (магнитный заряд) не увенчались успехом. Каждый фрагмент разделённого магнита имел два полюса: северный и южный.

В 1600 г. **Гильбертом** была выдвинута гипотеза о том, что Земля представляет собой большой магнит: этим и обусловлена возможность определения направления с помощью компаса. Почти через 50 лет **Рене Декарт** обнаружил, что постоянный магнит действует на мельчайшие железные опилки, насыпанные вокруг него, подобно Земле, ориентирующей магнитную стрелку компаса. Тем самым он показал, что в пространстве существует *магнитное взаимодействие (поле)*.

XVIII век ознаменовался *систематическими исследованиями электрических явлений*.

В 1729 г. англичанин **Стефен Грей** обнаружил, что электричество может передаваться от одного тела к другому по металлической проволоке, но не может передаваться по шёлковой нити. Грей ввёл понятия *проводник* и *изолятор*. В 1733 г. французский учёный **Шарль Дюфе** открыл существование *отрицательного и положительного электричества* и установил, что «однородные электричества отталкиваются, а разнородные притягиваются». Важным шагом в изучении электрических явлений стало изобретение в 1745 г. в городе Лейдене голландским учёным **Питером ван Мушенбруком** и его учеником **Кюнеусом** первого электрического конденсатора – *лейденской банки*. Благодаря этому изобретению физики смогли получить значительные электрические заряды и экспериментировать с ними.

Первая последовательная теория электрических явлений была создана в 1749 г. американским учёным **Бенджамин Фрэнклином**. Он высказал гипотезу о том, что оба рода электричества представляют собой избыток или недостаток «электрической жидкости», содержащейся в определённом количестве в нейтральном теле. Недостаток «электрической жидкости» определялся как отрицательное электричество, а избыток – как положительное.

В 1759 г. английский естествоиспытатель **Роберт Симмер** сделал заключение о том, что в *обычном состоянии любое тело электрически нейтрально*, т.е. содержит равное количество разноимённых зарядов, взаимно нейтрализующих друг друга. При электризации происходит перераспределение зарядов.

В 1800 г. итальянский учёный **Алесандро Вольт** создал первый химический источник тока – *гальванический элемент* и открыл *контактную разность потенциалов*.

В результате многочисленных исследований электрических явлений, предпринятых в XVIII веке, был открыт ряд важнейших законов электростатики:

В 1843 г. **Майкл Фарадей** экспериментально открыл **закон сохранения электрического заряда**:

в замкнутой системе алгебраическая сумма электрических зарядов остаётся постоянной при любых взаимодействиях (электрические заряды могут возникать и исчезать, но при этом обязательно появляется и исчезает равное количество элементарных зарядов противоположных знаков).

$$q_1 + q_2 + q_3 + \dots + q_n = \text{const.}$$

В 1785 г. французский физик **Шарль Кулон** с помощью крутильных весов установил **закон взаимодействия двух неподвижных точечных зарядов (закон Кулона)**:

сила F взаимодействия двух неподвижных точечных зарядов q_1 и q_2 в вакууме прямо пропорциональна произведению модулей зарядов и обратно пропорциональна квадрату расстояния r между ними.

$$F = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{|q_1||q_2|}{r^2},$$

где ϵ_0 – электрическая постоянная $\left(\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \frac{\text{Кл}^2}{\text{Н} \cdot \text{м}^2} \right)$.

Кулоновские силы существенны до расстояний порядка 10^{-15} м (нижний предел). На меньших расстояниях начинают действовать ядерные силы. Что касается верхнего предела, то он стремится к бесконечности.

Важные результаты в области электромагнетизма были получены французским учёным **Андре Мари Ампером**. В 1820г. Ампер открыл магнитное взаимодействие токов и установил закон этого взаимодействия.

Закон Ампера:

два параллельных проводника с токами одинакового направления притягиваются друг к другу с силой F прямо пропорциональной величине токов I_1 и I_2 , длине проводников l и обратно пропорциональной расстоянию d между проводниками.

$$F = \frac{\mu_0 \mu}{2\pi} \frac{I_1 I_2 l}{d},$$

где μ_0 – магнитная постоянная $\left(\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{\text{Гн}}{\text{м}} \right)$; μ – магнитная проницаемость среды.

Параллельные проводники отталкиваются, если токи текут в противоположных направлениях.

В 1826 г. был издан основной труд Ампера «Теория электродинамических явлений, выведенная исключительно из опыта». Он использовал понятия «сила тока», «напряжение», хотя и не приводил четкой формулировки этих понятий. Амперу также принадлежат идеи создания прибора для измерения силы тока (*амперметра*) и *электромагнитного телеграфа*. По существу, Ампером была создана новая наука об электричестве и магнетизме, названная *электродинамикой*. Он пришел к заключению, что все магнитные явления в природе, в том числе и связанные с постоянными магнитами, вызваны электрическими токами (теория молекулярных токов Ампера).

Важнейшими открытиями в области электричества явились **законы Георга Ома** (1826 г.) и **Джоуля – Ленца** (1842 г.) (см. законы в лаб. раб. №2).

Природа магнетизма оставалась неясной до конца XIX в., а *электрические и магнитные явления рассматривались независимо друг от друга*, пока в 1820 г. датский физик **Ханс Эрстед** не открыл магнитное действие электрического тока. Поместив над проводником, по которому идет электрический ток, магнитную стрелку, Эрстед обнаружил, что она отклоняется от первоначального положения. Это привело учёного к мысли, что электрический ток создает магнитное поле. Открытие Эрстеда показало, что *между электрическими и магнитными явлениями существует связь и*

что магнитные действия можно получить при помощи электрических токов.

Исследования английского физика **Майкла Фарадея** придали определенную завершенность изучению электромагнетизма. Зная об открытии Эрстеда и разделяя идею о взаимосвязи электрических и магнитных явлений, в 1821 г. Фарадей поставил обратную задачу «превратить магнетизм в электричество». Вращая замкнутый контур в магнитном поле, он получил в нём электрический ток. Через 10 лет экспериментальной работы Фарадей открыл явление *электромагнитной индукции*, которое ещё более укрепило представление о связи между электричеством и магнетизмом.

Электромагнитная индукция – это явление возникновения вихревого электрического поля, вызывающего электрический ток в замкнутом проводнике при изменении потока магнитной индукции через поверхность, ограниченную проводником.

Фарадей сформулировал **закон электромагнитной индукции**:

Электродвижущая сила (ЭДС) электромагнитной индукции ε_i в замкнутом проводнике прямопропорциональна скорости изменения магнитного потока Φ , охватываемого проводником:

$$\varepsilon_i = -\frac{d\Phi}{dt},$$

где $\frac{d\Phi}{dt}$ – скорость изменения магнитного потока, пронизывающего контур замкнутого проводника.

Знак « $-$ » в формуле закона отражает соответствие направления индукционного тока правилу **Эмилия Ленца**, сформулированному в 1833 г.

Правило Ленца:

Индукционный ток в замкнутом проводнике имеет такое направление, что созданный им магнитный поток через поверхность, ограниченную проводником, препятствует изменению магнитного потока, вызвавшего этот ток.

Важнейшей идеей в работах Фарадея было признание основной, определяющей роли промежуточной среды в электрических и магнитных явлениях. Фарадей не допускал действия на расстоянии и считал, что электрические и магнитные взаимодействия передаются промежуточной средой и что именно в этой среде протекают основные электрические и магнитные процессы. В теории электромагнитной индукции Фарадей развил новые взгляды на природу электричества, основанные на **принципе близкодействия** (согласно которому взаимодействия между телами осуществляются посредством тех или иных полей, непрерывно распределенных в пространстве). Распределение электрических и магнитных полей

в пространстве Фарадей описывал с помощью силовых линий, которые, по его представлению, напоминают обычные упругие линии в гипотетической среде – *мировом эфире*.

К другим открытиям Фарадея в области электромагнетизма относятся открытие в 1848г. явления *вращения плоскости поляризации света*, распространяющегося в прозрачных веществах вдоль линий напряженности магнитного поля (эффект Фарадея), открытие в 1845 г. явлений *диамагнетизма* и *парамагнетизма*, установление связи оптических явлений с магнетизмом.

Основные теоретические представления Фарадея, его концепция близкодействия не были восприняты современниками. Первым обратил на них серьезное внимание английский математик и физик **Джеймс Максвелл**. Он полностью воспринял идеи Фарадея о реальности процессов в пространстве возле зарядов и токов. В явлении электромагнитной индукции Максвелл усмотрел **новое свойство полей**:

переменное магнитное поле порождает в пустом пространстве электрическое поле с замкнутыми силовыми линиями (так называемое вихревое электрическое поле).

Следующий (и последний) шаг в открытии основных свойств электромагнитного поля был сделан Максвеллом без какой-либо опоры на эксперимент. Им была высказана гениальная догадка о том, что

переменное электрическое поле порождает магнитное поле, как и обычный электрический ток (гипотеза о токе смещения).

В 60-х годах XIXв. Максвелл разработал теорию электромагнитного поля, которая значительно расширила взгляды физиков на материю и привела к созданию электромагнитной картины мира (ЭМКМ).

2.2. Теория электромагнитного поля Максвелла

Теория электромагнитного поля описана Максвеллом в 1873 г. в книге «Трактат об электричестве и магнетизме».

Суть теории Максвелла состоит в следующем:

переменное магнитное поле, возбуждаемое изменяющимся током, создает не только в окружающих телах, но и в вакууме вихревое электрическое поле, которое, в свою очередь, возбуждает магнитное поле, и т.д. Изменяющиеся электрические и магнитные поля, взаимно порождая друг друга, образуют единое переменное электромагнитное поле.

Таким образом, в физику была введена новая реальность – электромагнитное поле.

Электромагнитное поле – особый, отличный от вещества вид материи, посредством которого осуществляется взаимодействие между электрически заряженными частицами.

Материальность электромагнитного поля проявляется, в частности, в том, что полю присущи энергия, импульс, момент импульса, давление. В макроскопическом рассмотрении эти характеристики считаются равномерно распределёнными с некоторой плотностью во всём объёме, занимаемом полем.

Электромагнитные поля возникают вокруг движущихся зарядов, от которых распространяются в окружающее пространство. Они не локализованы в чётко ограниченных областях пространства и обладают проникаемостью – в одной области пространства могут существовать одновременно несколько полей, созданных различными источниками.

Электромагнитное поле в вакууме характеризуется векторами напряжённости \vec{E} электрического поля и индукции \vec{B} магнитного поля.

Для описания электромагнитного поля используют его силовое действие на неподвижные и движущиеся заряженные частицы. Вектор силы \vec{F} , действующей со стороны поля на неподвижные и движущиеся заряженные частицы, можно представить в виде суммы двух векторов

$$\vec{F} = q\vec{E} + q[\vec{v} \cdot \vec{B}],$$

где $q\vec{E}$ – электрическая составляющая силы, действующая как на неподвижные, так и на движущиеся заряды; $q[\vec{v} \cdot \vec{B}]$ – магнитная составляющая силы, действующая только на движущиеся заряды и зависящая от скорости \vec{v} их движения.

Основу теории Максвелла составляют четыре фундаментальных уравнения.

Уравнения Максвелла связывают в любой точке пространства в любой момент времени силовые характеристики электромагнитного поля (\vec{E} и \vec{B}) с характеристиками источников поля.

Первое уравнение определяет, что электрическое поле порождается электрическими зарядами.

Это уравнение устанавливает связь между объёмной плотностью заряда ρ и вектором напряжённости электрического поля \vec{E} .

Если в некоторой области пространства объёмом V , ограниченной замкнутой поверхностью площадью S , произвольным образом распределён заряд $q = \int_V \rho dV$, то

$$\oint_S \vec{E} d\vec{S} = \frac{1}{\epsilon_0} \int_V \rho dV, \quad (1)$$

где $\oint_S \vec{E} d\vec{S}$ – поток вектора напряжённости \vec{E} электрического поля, создаваемого в вакууме зарядом q через поверхность S .

Уравнение (1) носит название **теоремы Гаусса**:

поток вектора напряжённости электростатического поля в вакууме через замкнутую поверхность пропорционален заряду, находящемуся в объёме, ограниченном этой поверхностью.

Линии напряжённости электрического поля, созданного зарядами, не замкнуты: они начинаются на положительных зарядах и оканчиваются на отрицательных зарядах или уходят в бесконечность.

Второе уравнение определяет ещё один источник электрического поля – *изменяющееся во времени магнитное поле*.

Это уравнение является обобщением закона электромагнитной индукции Фарадея.

Пусть ℓ – длина замкнутого контура, ограничивающего поверхность S ; $\int_S \vec{B} d\vec{S}$ – изменяющийся во времени поток вектора индукции \vec{B} магнитного поля через поверхность S .

Второе уравнение определяет, что при всяком изменении магнитного потока через поверхность S возникает электрическое поле, циркуляция вектора напряжённости \vec{E} которого по контуру ℓ ($\oint_{\ell} \vec{E} d\vec{\ell}$) пропорциональна скорости изменения магнитного потока:

$$\oint_{\ell} \vec{E} d\vec{\ell} = -\frac{\partial}{\partial t} \int_S \vec{B} d\vec{S}. \quad (2)$$

Чем быстрее изменяется магнитное поле, тем сильнее возникающее при этом (индуцированное) электрическое поле. Индуцированное поле имеет вихревой характер. Знак «минус» перед правой частью уравнения (2) отвечает правилу Ленца.

Третье уравнение определяет *факт отсутствия в природе магнитных зарядов (подобных электрическим) как источников магнитного поля*.

Поток вектора магнитной индукции $\oint_S \vec{B} d\vec{S}$ через произвольную замкнутую поверхность S равен нулю.

$$\oint_S \vec{B} d\vec{S} = 0. \quad (3)$$

Из (3) следует, что линии магнитной индукции (магнитные силовые линии) всегда замкнуты. Магнитное поле – *вихревое*.

Четвёртое уравнение определяет, что источниками магнитного поля являются движущиеся электрические заряды (т.е. электрический ток ($\int_S \vec{j} d\vec{S}$)) и изменяющееся во времени электрическое поле ($\frac{\partial}{\partial t} \int_S \vec{E} d\vec{S}$).

$$\oint_{\ell} \vec{B} d\vec{\ell} = \mu_0 \int_S \vec{j} d\vec{S} + \frac{1}{c^2} \cdot \frac{\partial}{\partial t} \int_S \vec{E} d\vec{S}, \quad (4)$$

где j – плотность тока; c – скорость света в вакууме.

Циркуляция вектора магнитной индукции \vec{B} по произвольному замкнутому контуру ℓ , мысленно проведённому в электромагнитном поле, равна сумме двух слагаемых: первое из них пропорционально плотности тока \vec{j} , протекающего сквозь контур, второе – пропорционально скорости изменения потока вектора напряжённости электрического поля $\frac{\partial}{\partial t} \int_S \vec{E} d\vec{S}$

через поверхность S , ограниченную контуром ℓ .

Из уравнений (2) и (4) следует, что электрическое и магнитное поля нельзя в общем случае рассматривать независимо друг от друга. Они составляют неразрывную совокупность – *электромагнитное поле*.

Из решения уравнений (1)–(4) вытекает, что *электромагнитное поле распространяется в пространстве в виде волн и скорость электромагнитных волн равна скорости света (300000 км/с)*, которая в виде универсальной константы входит в четвертое уравнение Максвелла.

Тем самым устанавливается факт, что свет является совокупностью электромагнитных волн. Этот факт стал неоспоримым после знаменитых опытов русского физика-экспериментатора **Петра Николаевича Лебедева** по измерению давления света.

Развивая теорию электромагнитного поля, Максвелл не отвергал и дискретность материи. В книге «Материя и движение» Максвелл рассматривал понятия дискретности и непрерывности, не отдавая предпочтения ни тому, ни другому, допуская возможность и одного, и другого.

Подтверждением электромагнитной теории Максвелла явилось *экспериментальное обнаружение электромагнитных волн Генрихом Герцем* в 1888 г.

Разработанная Максвеллом теория электромагнитного поля значительно расширила взгляды физиков на материю и привела к созданию электромагнитной картины мира. Сам Максвелл, по мнению Эйнштейна, еще был убежден в том, что электродинамические процессы можно рассматривать как движение эфира, и даже использовал механику при выводе уравнений поля, однако со временем становилось все более ясным, что сведение уравнений электромагнитного поля к уравнениям механики невозможно.

Теория Максвелла явилась предшественницей электронной теории Хендрика Лоренца и специальной теории относительности Альберта Эйнштейна.

2.3. Электронная теория Лоренца

Нидерландский физик-теоретик **Хендрик Лоренц** считал, что теория Максвелла нуждается в дополнении, так как в ней не учитывается структура вещества. Он высказал свои представления об электронах, т.е. малых электрически заряженных частицах, которые в громадном количестве присутствуют во всех телах.

В 1895 г. Лоренц совместно с немецким физиком Паулем Друде дал систематическое изложение электронной теории электропроводности металлов, опирающейся, с одной стороны, на теорию Максвелла, а с другой – на представления об «атомарности» (дискретности) электричества.

Основные положения электронной теории:

1. *В металле есть свободные электроны – электроны проводимости, рассматриваемые как электронный газ, обладающий свойствами одноатомного идеального газа.*

2. *Остов металла образует кристаллическая решётка, в узлах которой находятся положительные ионы, совершающие беспорядочные тепловые колебания около положений равновесия.*

3. *В отсутствие электрического поля электроны проводимости хаотически движутся и сталкиваются с ионами металла. Средняя длина свободного пробега $\langle \lambda \rangle$ электронов имеет величину порядка расстояния между узлами решётки металла, т.е. $\langle \lambda \rangle \sim 10^{-10}$ м.*

4. *Электрический ток в металле возникает под действием электрического поля, которое вызывает упорядоченное движение электронов проводимости – дрейф электронов в направлении, противоположном направлению вектора напряженности поля. Это движение накладывается на беспорядочное тепловое движение электронов.*

5. *Электрическое сопротивление металлического проводника обусловлено столкновениями электронов проводимости с ионами решётки.*

Электронная теория позволила количественно описать многие явления, однако в ряде случаев, например при объяснении зависимости сопротивления металлов от температуры, была практически бессильна. Это связано с тем, что к электронам в общем случае нельзя применять законы механики Ньютона и законы идеальных газов, что было выяснено в 30-х годах XX в.

В 1902 г. в опытах немецкого физика **Вальтера Кауфмана** по измерению массы движущихся электронов было обнаружено, что отношение

заряда электрона к его массе не является постоянной величиной, а зависит от скорости (с ростом скорости оно уменьшается). Так как заряд электрона является постоянной величиной, то, очевидно, это обусловлено ростом массы. Увеличение массы электрона при движении его со скоростью, близкой к скорости света, объясняется в специальной теории относительности.

2.4. Специальная теория относительности

Предпосылкой к созданию теории относительности явилось развитие электродинамики в XIX веке. Результатом обобщения и теоретического осмысления экспериментальных фактов и закономерностей в областях электричества и магнетизма стали уравнения Максвелла, описывающие эволюцию электромагнитного поля и его взаимодействие с зарядами и токами.

Из уравнений Максвелла следовало, что скорость распространения электромагнитного поля в пустоте постоянна и равна скорости света. Этот факт не совместим с принципом относительности Галилея. Аналогичной оказалась и ситуация с магнитоэлектрическими явлениями, вытекающими из уравнений Максвелла. Статические магнитные поля и силы Лоренца, действующие на движущиеся в магнитных полях заряды, зависят от скоростей зарядов по отношению к наблюдателю, то есть уравнения Максвелла оказались неинвариантными относительно преобразований Галилея, что противоречило классической механике.

Специальная теория относительности была разработана в начале XX века усилиями Хендрика Лоренца, Жюль Анри Пуанкаре, Альберта Эйнштейна и других ученых. Экспериментальной основой для создания специальной теории относительности (СТО) послужил опыт Майкельсона. Его результаты оказались неожиданными для классической физики своего времени: *независимость скорости света от системы отсчёта*. Попытка проинтерпретировать этот результат в начале XX века вылилась в пересмотр классических представлений не только электромагнетизма, но и всей механики вообще, и привела к созданию СТО.

Основу СТО, сформулированной в 1905 г. Эйнштейном, составляют два постулата (принципа):

1. Принцип относительности Эйнштейна:

все физические процессы при одних и тех же условиях в инерциальных системах отсчета (ИСО) протекают одинаково.

Это означает, что *никакими физическими опытами, проведенными внутри замкнутой ИСО, нельзя установить, покоится ли она или движется прямолинейно и равномерно.*

Все ИСО равноправны, а физические законы инвариантны по отношению к выбору ИСО (т.е. уравнения, выражающие эти законы, имеют одинаковый вид во всех инерциальных системах отсчета).

Этот принцип явился обобщением принципа относительности Галилея на любые физические явления.

2. Принцип постоянства скорости света:

Скорость света в вакууме постоянна и не зависит от скорости движения источника и приемника света. Она одинакова во всех направлениях и во всех инерциальных системах отсчета.

Скорость света в вакууме – предельная скорость передачи сигнала. Это одна из важнейших физических постоянных, так называемых мировых констант ($c = 300000$ км/с). Этот принцип противоречит закону сложения скоростей в классической механике.

Глубокий анализ постулатов СТО показывает, что они противоречат представлениям о пространстве и времени, принятым в механике Ньютона и отражённым в преобразованиях Галилея. Действительно, согласно принципу относительности все законы природы, в том числе законы механики и электродинамики, должны быть инвариантны по отношению к одним и тем же преобразованиям координат и времени, осуществляемым при переходе от одной системы отсчета к другой. Уравнения Ньютона этому требованию удовлетворяют, а уравнения электродинамики Максвелла – нет, т.е. оказываются не инвариантными. Это обстоятельство привело Эйнштейна к выводу о том, что уравнения Ньютона нуждаются в уточнении, в результате которого как уравнения механики, так и уравнения электродинамики оказались бы инвариантными по отношению к одним и тем же преобразованиям. Необходимое видоизменение законов механики и было осуществлено Эйнштейном. В результате возникла механика, согласующаяся с принципом относительности Эйнштейна, – релятивистская механика.

Релятивистская механика описывает механические процессы, в которых скорости тел (v) сопоставимы со скоростью света в вакууме (c).

В СТО между координатами и временем в двух ИСО существуют соотношения, называемые *преобразованиями Лоренца*. Если система K' движется относительно неподвижной системы K вдоль оси X (рис. 2.1), то их можно записать в виде

$$x = \frac{x' + vt'}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}, y = y', z = z', t = \frac{t' + \frac{x'v}{c^2}}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}, \quad (5)$$

где x, y, z – пространственные координаты относительно системы K ; x', y', z' – пространственные координаты относительно системы K' ; t – время, измеренное в системе K ; t' – время, измеренное в системе K' ; v – скорость системы K' в направлении оси X , измеренная в системе K ; c – скорость света в вакууме.

При малых скоростях (по сравнению со скоростью света), т.е. когда $v \ll c$, преобразования Лоренца переходят в классические преобразования Галилея (в этом заключается *принцип соответствия*). При $v > c$ выражения (5) теряют физический смысл (становятся мнимыми). Это означает, что движение со скоростью, большей скорости света в вакууме, невозможно.

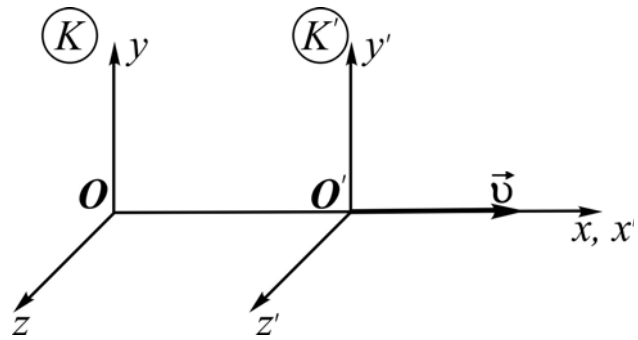


Рис. 2.1. Инерциальные системы отсчёта: неподвижная K и подвижная K'

Из (5) следует, что пространственные и временные преобразования не являются независимыми. Действительно, в закон преобразования координат входит время, а в закон преобразования времени – пространственные координаты. Таким образом, преобразования Лоренца, связывающие пространственные координаты и время, исторически стали основой для формирования концепции *единого четырехмерного пространства–времени*.

К наиболее распространённым эффектам СТО, также называемым *релятивистскими эффектами*, относят:

- **эффект релятивистского замедления хода движущихся часов** относительно неподвижных

$$\tau = \frac{\tau_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}, \quad (6)$$

где τ_0 – промежуток времени, отсчитанный по часам, движущимся вместе с объектом со скоростью v (собственное время), т.е. в системе отсчёта K' ; τ – промежуток времени, отсчитанный по часам в неподвижной системе отсчёта K .

Из формулы (6) следует, что собственное время меньше времени, отсчитанного по часам в неподвижной системе отсчёта, т.е. физические процессы в движущейся системе отсчёта замедляются (относительно неподвижной системы). Разумеется, это становится заметным только при скоростях, соизмеримых со скоростью света. Замедление хода времени подтверждается в ядерной физике, в частности, в опытах с мюонами. Относительностью промежутков времени объясняется и так называемый **«парадокс близнецов»**, часто обыгрываемый в научно-популярной или научно-фантастической литературе. Он заключается в том, что *если один близнец остаётся на Земле (неподвижная система отсчёта), а другой улетает на ракете (движущаяся система отсчёта), движущейся со*

скоростью, близкой к скорости света, то, возвратившись на Землю, он констатирует, что его брат-близнец стал намного старше его. В ракете промежуток времени, прожитый одним из близнецов, составил τ_0 , а для брата на Земле он оказался равным τ , причём $\tau > \tau_0$.

• **эффект релятивистского сокращения продольных размеров движущихся объектов**

$$l = l_0 \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}. \quad (7)$$

Из (7) следует, что длина l тела в системе отсчёта K , относительно которой оно движется, меньше его длины l_0 в системе отсчёта K' , относительно которой тело покоится. Поперечные размеры тела не изменяются.

• **зависимость массы релятивистской частицы от скорости её движения**

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}, \quad (8)$$

где m_0 – масса покоя частицы (масса частицы в системе отсчёта K'), а m – масса частицы, движущейся со скоростью v (масса движения) в системе отсчёта K .

Из (8) следует, что релятивистская масса движущейся частицы больше массы покоя.

Если $m_0 \neq 0$, то частица не может двигаться со скоростью $v \geq c$, т.к. это соответствовало бы бесконечно большой или мнимой массе, что абсурдно. Если же масса покоя частицы $m_0 = 0$ (фотон, нейтрино), то её скорость может быть равна только c . (Действительно, при $v > c$ или $m = 0$ отрицается само существование частицы.)

Зависимость массы частиц от скорости была обнаружена в конце XIX в. в опытах с быстрыми электронами.

• **релятивистский закон сложения скоростей**

$$u_x = \frac{u'_x + v}{1 + \frac{u'_x v}{c^2}}, \quad (9)$$

где u_x – скорость объекта относительно неподвижной системы отсчёта K ; u'_x – скорость объекта в подвижной системе отсчёта K' ; v – скорость подвижной системы K' относительно неподвижной системы K ; c – скорость света в вакууме.

Если u'_x и v намного меньше c , то релятивистский закон сложения скоростей переходит в классические преобразования Галилея для скоростей. Из (9) следует, что если скорость частицы относительно какой-либо инерциальной системы отсчёта равна скорости света в вакууме, то она будет такой же относительно любой другой ИСО. Более того, при $u'_x = c$ и $v = c$

$$u_x = \frac{c + c}{1 + \frac{cc}{c^2}} = \frac{2c}{2} = c.$$

Формула (9) не позволяет получить скорость, превышающую скорость света, ни при каких реальных величинах «складываемых» скоростей. Это утверждение находится в соответствии со вторым постулатом СТО.

● **Эквивалентность энергии и массы**

$$E = mc^2. \quad (10)$$

Массе m соответствует определённая энергия E .

Согласно (10), какие бы взаимные превращения разных видов материи ни происходили, изменению энергии в системе соответствует эквивалентное изменение массы. Энергия и масса являются двумя однозначно связанными характеристиками материи. Уравнение (10) раскрывает источник энергии, используемой ядерной энергетикой. Масса продуктов радиоактивного распада, протекающего в ядерном реакторе, меньше массы исходного вещества. Эта разность называется *дефектом массы*. Дефект массы Δm , помноженный на большую величину (квадрат скорости света), обуславливает возможность выделения громадной энергии $\Delta E = \Delta mc^2$, которая и производится в ядерном реакторе АЭС. Практика использования ядерной энергии является одним из самых наглядных и убедительных свидетельств справедливости СТО.

2.5. Основные идеи общей теории относительности

Идеи СТО получили дальнейшее развитие и конкретизацию в общей теории относительности, которая была создана Эйнштейном в 1916 году. Общая теория относительности (ОТО) обобщила СТО на ускоренные, т.е. неинерциальные системы отсчета.

В основе ОТО лежит экспериментальный факт равенства инертной массы (входящей во второй закон Ньютона) и гравитационной массы (входящей в закон тяготения) для любого тела, приводящий к **принципу эквивалентности**:

ускоренное движение физически полностью эквивалентно покою в гравитационном поле (т.е. они не различимы никакими измерениями).

Пользуясь принципом эквивалентности, можно заменить любую неинерциальную (ускоренную) систему отсчёта эквивалентной ей инерциальной системой, в которой имеется гравитационное поле.

Равенство инертной и гравитационной масс проявляется в том, что движение тела в поле тяготения не зависит от его массы. Тяготение совершенно одинаково действует на разные тела, сообщая им одинаковые ускорения независимо от массы, химического состава и других свойств тел. Так, на поверхность Земли все тела падают под влиянием её поля тяготения с одинаковым ускорением – *ускорением свободного падения*. Если все тела в одной и той же точке пространства получают одинаковое ускорение, то это ускорение можно связать не со свойствами тел, а со свойствами самого пространства в этой точке.

Принцип эквивалентности утверждает эквивалентность пространственно-временных отношений (ускоренное движение – не что иное, как определенная зависимость пространственных координат от времени) материальному объекту (гравитационное поле – это материальный объект, обладающий определенной структурой, энергией). Таким образом, в ОТО размывается сама грань между пространством-временем и материей. *Пространство-время неразрывно связано с движущейся материей.*

В соответствии с принципом эквивалентности общая теория относительности трактует гравитационное взаимодействие (тяготение) как результат искривления пространства-времени вокруг материальных тел. Искривление пространства означает отличие его геометрических свойств от теорем геометрии Евклида. Искривление времени сводится к изменению его темпа, причем разному в разных точках пространства. Правильнее же рассматривать искривление всего четырехмерного пространства-времени как целого. Оно описывается знаменитыми **уравнениями Эйнштейна**, которые *связывают между собой свойства материи, присутствующей в искривленном пространстве-времени, с его кривизной:*

$$R_{ik} - \frac{1}{2} R g_{ik} = \chi T_{ik}, \quad (11)$$

где R_{ik} – тензор Риччи, получающийся из тензора кривизны пространства-времени посредством свертки его по паре индексов; R – скалярная кривизна, то есть свернутый тензор Риччи; g_{ik} – дважды ковариантный метрический тензор; T_{ik} – тензор энергии-импульса материи. (Тензор – *математический термин, обозначающий особого рода величины, преобразующиеся по особому закону.*)

В левой части уравнения (11) стоят геометрические величины, описывающие, как именно искривлено пространство-время. Величина T_{ik} в правой части описывает распределение и движение материальных тел. Чем массивнее тело, тем больше T_{ik} и тем сильнее искривлено пространство-

время в окрестности тела. Коэффициент пропорциональности χ содержит скорость света в вакууме c и постоянную G из закона всемирного тяготения.

Таким образом, в ОТО одно лишь присутствие материальных объектов изменяет свойства пространства-времени. И наоборот, геометрия пространства-времени влияет на характер движения тел. С точки зрения ОТО Земля обращается вокруг Солнца не потому, что оно её притягивает, а потому, что присутствие Солнца искривило пространство-время настолько, что траектория свободного (по инерции) движения Земли из прямой превратилась в замкнутый эллипс.

Из ОТО был получен ряд важных выводов:

1. Геометрия пространства–времени определяется характером поля тяготения, которое, в свою очередь, определено взаимным расположением тяготеющих масс. Вблизи больших тяготеющих масс происходит искривление пространства и замедление хода времени.

2. Пространство и время – не самостоятельные субстанции, а формы существования единственной субстанции – движущейся материи.

Наиболее убедительными экспериментальными подтверждениями ОТО являются:

1. Дополнительный сдвиг перигелия орбиты Меркурия по сравнению с предсказаниями механики Ньютона.

И ОТО, и ньютоновская механика утверждают, что планеты обращаются вокруг Солнца по эллиптическим орбитам, но ОТО уточняет: сами эти эллипсы должны медленно вращаться. Сильнее всего этот эффект проявляется для Меркурия, ближайшей к Солнцу планеты: его орбита делает один полный оборот за 3 млн лет. Это явление, которое астрономы обнаружили ещё до Эйнштейна и над причиной которого долго ломали голову, оказалось хорошо согласующимся с предсказаниями ОТО.

2. Отклонение светового луча в гравитационном поле Солнца.

ОТО предсказывает, что луч света, проходя рядом с Солнцем, должен отклониться из-за искривления пространства-времени на $\alpha = 1,75$ угловой секунды. В 1919г. это явление было подтверждено астрономическими наблюдениями звёзд во время полного солнечного затмения (рис. 2.2).

3. Гравитационное красное смещение, или замедление времени в гравитационном поле.

Согласно формулам ОТО время течёт медленнее в более сильных полях тяготения. Непосредственно связанный с этим эффект – *гравитационное красное смещение света* (уменьшение частоты

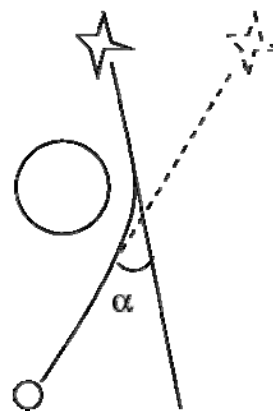


Рис. 2.2. Искривление луча света вблизи Солнца

света относительно локальных часов; соответственно, смещение линий к красному концу спектра относительно локальных масштабов при удалении от гравитирующего тела). Гравитационное красное смещение было обнаружено в спектрах звёзд и Солнца и надёжно подтверждено в контролируемых земных условиях в эксперименте сотрудников Гарвардского университета Роберта Паунда и Глена Ребки (1960 г.).

Кроме перечисленных, существует множество других эффектов, поддающихся экспериментальной проверке. Среди них: отклонение и запаздывание электромагнитных волн в гравитационном поле Солнца и Юпитера (*эффект Шапиро*); прецессия гироскопа вблизи вращающегося тела (*эффект Лензе-Тирринга*); астрофизические доказательства существования чёрных дыр; доказательства излучения гравитационных волн тесными системами двойных звёзд и расширение Вселенной.

До сих пор надёжных экспериментальных свидетельств, опровергающих общую теорию относительности, не обнаружено. Для указанных выше трёх классических явлений отклонения измеренных величин эффектов от предсказываемых ОТО не превышают 0,1 %.

ОТО стала последней крупной теорией, созданной в рамках электромагнитной картины мира.

2.6. Основные принципы ЭМКМ

Важным следствием развития электродинамики стал переход от ньютоновского принципа дальнего действия к принципу **близкого действия**, сформулированному Фарадеем.

Принцип близкого действия:

взаимодействия любого характера передаются полем от точки к точке непрерывно и с конечной скоростью.

К основным принципам ЭМКМ относятся также **принцип относительности Эйнштейна, принцип постоянства и предельности скорости света, принцип эквивалентности инертной и гравитационной масс, принцип суперпозиции, принцип соответствия и принцип причинности.**

Принцип соответствия утверждает, что

любая новая научная теория, являющаяся развитием предыдущих классических теорий, справедливость которых была экспериментально установлена для определённых групп явлений, не отвергает эти классические теории, а включает их в себя как частный случай.

Этот принцип выражает требование преемственности знаний в процессе научного познания природы: новая теория, будучи более глубокой и общей по своему содержанию, в предметной области определяет границы

применимости идей и расчётных методов предыдущих (старых) теорий. Предыдущие теории сохраняют своё значение для определённых групп явлений как предельная форма и частный случай новой теории.

Например, в специальной теории относительности в пределе малых скоростей ($v \ll c$) получаются те же следствия, что и в классической механике. Так, преобразования Лоренца переходят в преобразования Галилея, время течёт одинаково во всех инерциальных системах отсчета, кинетическая энергия становится равной $\frac{mv^2}{2}$ и т.д.

Согласно принципу соответствия в слабых гравитационных полях при малых скоростях ($v \ll c$) предсказания общей теории относительности совпадают с результатами применения ньютоновского закона всемирного тяготения с небольшими поправками, которые растут по мере увеличения напряженности поля.

Какого-либо нового понимания **причинности**, запрещающего влияние данного события на все прошедшие события («событие-причина предшествует по времени событию-следствию»), по сравнению с механической картиной мира в ЭМКМ не произошло. Например, применение принципа причинности к электродинамике материальной среды требует выбора в качестве *события-причины* – возмущения электрической индукции, совпадающей с полем внешних источников, а в качестве *события-следствия* – соответствующего изменения напряжённости электрического поля (часто практикуемый обратный выбор неправилен, т.к. возмущение напряжённости поля включает в себя неконтролируемый вклад самой среды). Примеры применения принципа причинности в аппарате теоретической физики многочисленны и разнообразны. Он служит средством выбора начальных условий к динамическим уравнениям, обеспечивая однозначность их решения. Так, при решении уравнений Максвелла принцип причинности позволяет сделать выбор между опережающими и запаздывающими потенциалами в пользу последних.

Более сильный **релятивистский принцип причинности** также исключает взаимное влияние событий, разделенных пространственноподобным интервалом, для которых сами понятия «раньше», «позже» не абсолютны, а меняются местами с изменением системы отсчёта. Взаимное влияние таких событий было бы возможно лишь с помощью объекта, движущегося со скоростью, превышающей скорость света в вакууме. Поэтому известное утверждение о невозможности сверхсветовых движений в рамках теории относительности вытекает именно из релятивистского принципа причинности.

2.7. Общие положения ЭМКМ

В электромагнитной картине мира:

1) материя рассматривается как единство двух взаимодополняющих друг друга видов: *вещества* (совокупности атомов), характеризующегося прерывностью, и *поля*, которому свойственна непрерывность. Они строго разделены и их превращение друг в друга невозможно. *Главным является поле*, а значит, основным свойством материи является *непрерывность* (континуальность) в противовес дискретности;

2) известны два вида поля – *гравитационное* и *электромагнитное*, соответственно – два вида фундаментальных взаимодействий. Поля, в отличие от вещества, непрерывно распределяются в пространстве. Электромагнитное взаимодействие объясняет не только электрические и магнитные явления, но и другие – оптические, химические, тепловые;

3) первоначально считалось, что весь мир заполнен *электромагнитным эфиром*, пустоты в нём нет. Электрическое, магнитное и электромагнитное поля трактовались как состояния эфира, который был их носителем. Американский физик Альберт Майкельсон экспериментально доказал, что эфира нет, электромагнитное поле само является видом материи, для его распространения нет необходимости в какой-либо особой среде – эфире;

4) механистическая концепция *абсолютного пространства и времени* (не зависящих друг от друга и не связанных с материальными объектами) уступила место **реляционному** их пониманию:

пространство и время связаны с процессами, происходящими в поле, т. е. они несамостоятельны и зависят от материи.

Эйнштейн ввел в электромагнитную картину мира *идею относительности* пространства и времени. Из преобразований Лоренца следует, что пространство и время связаны между собой и образуют единый четырехмерный мир (пространственно-временной континуум), являясь его проекциями. ОТО показала, что свойства пространственно-временного континуума (метрика Мира, его геометрия) определяются распределением и движением материи;

5) обогатилось понимание движения: первичным по отношению к механическому движению постулировалось *колебательное движение в поле*;

6) ньютоновский принцип дальнего действия был заменен **фарадеевским принципом ближнего действия**, согласно которому *взаимодействие передается с помощью полей, заполняющих пространство, не мгновенно, а с конечной скоростью*;

7) была установлена взаимосвязь массы и энергии. *Масса стала не только мерой инертности и гравитации, но и мерой содержания энергии.*

В результате два закона сохранения – массы и энергии – были объединены в один общий закон сохранения массы и энергии;

8) все законы природы сводились к законам электромагнетизма, которые математически выражались уравнениями Максвелла.

Вещество представлялось состоящим из электрически заряженных частиц. Ставилась задача «построить модель атома, составленного из определенных сочетаний положительного и отрицательного электричества». К тому времени, когда возникли представления об атомах, состоящих из электронов и протонов, электромагнитная картина мира приобрела почти завершённую форму, ей удалось объединить разрозненные факты путём обращения к единообразной сущности, каковой считалось электромагнитное поле.

2.8. Ограниченность ЭМКМ

Дальнейшее развитие физики показало, что ЭМКМ имеет ограниченный характер. Главная трудность заключалась в том, что континуальное понимание материи не согласовывалось с опытными фактами, подтверждающими дискретность многих её свойств – заряда, излучения, действия. Не удавалось объяснить соотношения между полем и зарядом, устойчивость атомов, их спектры, явление фотоэффекта, излучение абсолютно чёрного тела. В 1897 году было открыто явление радиоактивности, установлено, что оно связано с превращением одних химических элементов в другие и сопровождается испусканием α, β, γ -излучения. На этой основе появились эмпирические модели атома, противоречащие электромагнитной картине мира. Все это свидетельствовало об относительном характере ЭМКМ и необходимости замены её новой картиной мира. Вскоре на смену ЭМКМ пришла *новая квантово-полевая картина мира, объединившая дискретность МКМ и непрерывность ЭМКМ.*

Контрольные вопросы

1. На базе каких научных открытий и теоретических разработок сформировалась ЭМКМ?

2. Расскажите об истории открытия электрических и магнитных явлений.

3. Сформулируйте важнейшие законы электричества и магнетизма, положенные в основу ЭМКМ.

4. В чем состоит суть открытия Эрстеда?

5. Охарактеризуйте вклад Фарадея в создание ЭМКМ.

6. Раскройте суть теории Максвелла. В чём смысл уравнений Максвелла? Запишите уравнения Максвелла.

7. Какая новая физическая реальность была введена в научную картину мира в результате исследований Максвелла? Дайте её определение.

8. Назовите основные положения электронной теории проводимости металлов.

9. Сформулируйте постулаты СТО.

10. Запишите преобразования координат Лоренца и сформулируйте вытекающие из них следствия.

11. Что такое пространственно-временной континуум?

12. Сформулируйте основное положение ОТО.

13. Назовите основные принципы ЭМКМ.

14. Какой подход к описанию мира характерен для ЭМКМ – корпускулярный или континуальный?

15. Сформулируйте основные положения ЭМКМ.

Лабораторные работы

Лабораторная работа №1

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ

Цель работы:

1) изучить методику измерения пространственных распределений потенциалов электростатических полей, создаваемых различными по форме заряженными проводниками;

2) построить эквипотенциальные линии, оценить напряжённость электростатического поля на основе данных о потенциале в отдельных точках плоского пространства между заряженными проводниками, построить линии напряжённости электростатического поля.

Приборы и принадлежности – лабораторный комплекс ЛКЭ-7, содержащий: двухполярный источник постоянного тока; вольтметр на базе мультиметра М 890 F; четыре текстолитовые платы с двумя металлическими электродами различной формы, укреплёнными на электропроводящей плёнке из графита; пантограф для отсчёта координат электрического зонда; миллиметровая бумага размером 140x180 мм; набор фломастеров.

1. ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

По современным представлениям, электрические заряды не действуют друг на друга непосредственно. Каждое заряженное тело создает в окружающем пространстве электрическое поле.

Электрическое поле – материальный объект, непрерывный в пространстве и способный действовать на другие заряженные тела.

Таким образом, взаимодействие заряженных тел на расстоянии осуществляется посредством их электрических полей.

Для исследования электрического поля в него вносят пробный заряд.

Пробный заряд – это небольшой по величине точечный заряд, который не искажает исследуемого поля.

Для характеристики силового действия электрического поля на заряд вводится напряжённость.

Напряжённость \vec{E} в данной точке электрического поля – это векторная физическая величина, численно равная силе, действующей на единичный положительный заряд, помещенный в эту точку.

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q_0}, \quad (1.1)$$

где q_0 – заряд, помещенный в данную точку электрического поля (пробный заряд); \vec{F} – сила, действующая на заряд со стороны поля.

Направление вектора напряжённости электрического поля совпадает с направлением силы, действующей на пробный положительный заряд, помещенный в данную точку поля.

Напряженность – силовая характеристика электрического поля.

В СИ единица напряжённости – ньютон на кулон (1 Н/Кл).

Электрическое поле неподвижных и не меняющихся со временем зарядов называется **электростатическим**.

Если на пробный заряд действуют одновременно электрические поля нескольких источников, то результирующая сила оказывается равной геометрической сумме сил, действующих со стороны каждого поля в отдельности. Это свойство электрических полей означает, что они подчиняются **принципу суперпозиции**:

если в данной точке пространства различные заряженные частицы создают электрические поля с напряжённостями \vec{E}_1 , \vec{E}_2 и т.д., то вектор напряжённости результирующего поля равен сумме векторов напряжённостей всех электрических полей:

$$\vec{E} = \sum_{i=1}^n \vec{E}_i. \quad (1.2)$$

В соответствии с законом Кулона напряженность электростатического поля, создаваемого точечным зарядом q на расстоянии r от него, равна по модулю

$$E = \frac{|q|}{4\pi\epsilon_0 r^2}. \quad (1.3)$$

Поле, создаваемое неподвижным точечным зарядом, называется кулоновским.

В кулоновском поле направление вектора \vec{E} зависит от знака заряда q : если $q > 0$, то вектор \vec{E} направлен по линии r от заряда; если $q < 0$, то вектор \vec{E} направлен по линии r к заряду (см. рис. 1.1).

Майкл Фарадей предложил изображать электрическое поле графически силовыми линиями, называемыми линиями напряженности.

Линии напряженности – это линии, касательные к которым в каждой точке поля совпадают с направлением вектора напряженности поля в данной точке.

Свойства линий напряженности:

☑ линии напряженности электростатического поля незамкнуты; они начинаются на положительных зарядах (или в бесконечности) и заканчиваются на отрицательных зарядах (или в бесконечности) (рис 1.1-1.2);

☑ линии напряженности не пересекаются, так как в каждой точке поля вектор напряженности имеет лишь одно направление;

☑ плотность силовых линий характеризует модуль напряженности электростатического поля. Вблизи точечных зарядов линии сгущаются, и напряженность поля \vec{E} возрастает.

Из (1.1) следует, что направление вектора напряженности электростатического поля совпадает с направлением силы, действующей на положительный заряд в данной точке поля.

Для экспериментального воспроизведения линий напряженности в стеклянный сосуд с плоским дном наливают какую-либо изолирующую жидкость (дистиллированную воду, глицерин, касторовое масло). В жидкости равномерно распределяют игольчатые частички (асбест, измельченный волос, гипсовые опилки). При погружении в жидкость электродов опилки под действием электростатического поля выстраиваются вдоль силовых линий.

Вектор силы \vec{F} , действующей на точечный заряд величиной q_0 , помещенный в данную точку электрического поля, полностью определяется величиной самого заряда и вектором напряженности \vec{E} поля в этой точке:

$$\vec{F} = q_0 \vec{E}. \quad (1.4)$$

Так как силы кулоновского взаимодействия двух точечных зарядов направлены вдоль линии, их соединяющей, и зависят лишь от расстояния между ними, то сила, действующая на заряд, помещенный в электростатическое поле, является центральной и, следовательно, консервативной.

Консервативной называется сила, работа которой по перемещению заряда в электростатическом поле не зависит от формы траектории

движения заряда и определяется только начальным и конечным положениями заряда на этой траектории.

Поле, в котором действуют консервативные силы, называют **потенциальным**.

Электростатическое поле – потенциальное.

Работа сил электростатического поля над зарядом q_0 при перемещении его из точки 1 в точку 2 равна изменению потенциальной энергии заряда

$$A = \Pi_1 - \Pi_2, \quad (1.5)$$

где Π_1 – потенциальная энергия заряда q_0 в точке 1; Π_2 – потенциальная энергия заряда q_0 в точке 2.

Разделим обе части уравнения (1.5) на q_0 :

$$\frac{A}{q_0} = \frac{\Pi_1}{q_0} - \frac{\Pi_2}{q_0}.$$

Отношение $\frac{\Pi}{q_0} = \varphi$ является энергетической характеристикой электростатического поля, называемой потенциалом данной точки поля.

Потенциал электростатического поля в данной точке – это скалярная физическая величина, равная потенциальной энергии, которой обладает единичный положительный заряд, помещенный в эту точку.

За единицу потенциала в СИ принимают вольт (1 В).

1 В равен потенциалу точки поля, в которой заряд 1 Кл обладает потенциальной энергией 1 Дж.

Если электрическое поле создано системой зарядов, то, по **принципу суперпозиции**, потенциал в данной точке результирующего поля равен алгебраической сумме потенциалов полей, созданных отдельными зарядами.

$$\varphi = \sum_{i=1}^n \varphi_i.$$

Обозначив $\frac{\Pi_1}{q_0} = \varphi_1$ (φ_1 – потенциал в точке 1 поля); $\frac{\Pi_2}{q_0} = \varphi_2$ (φ_2 – потенциал в точке 2 поля), получим $\frac{A}{q_0} = \varphi_1 - \varphi_2$, откуда

$$A = q_0 (\varphi_1 - \varphi_2), \quad (1.6)$$

где $(\varphi_1 - \varphi_2)$ – разность потенциалов между точками 1 и 2 поля.

$$(\varphi_1 - \varphi_2) = \frac{A}{q_0} \quad (1.7)$$

Разность потенциалов между точками 1 и 2 численно равна работе сил электростатического поля при перемещении единичного положительного заряда из точки 1 в точку 2.

При бесконечно малом перемещении $d\vec{l}$ заряда в произвольном направлении силой поля совершается элементарная работа

$$\delta A = \vec{F} d\vec{l}, \quad (1.8)$$

где $\vec{F} = q_0 \vec{E}$.

С другой стороны, эту работу можно выразить через приращение потенциала

$$\delta A = -q_0 \cdot d\varphi. \quad (1.9)$$

Из формул (1.8) и (1.9) следует, что

$$\vec{F} d\vec{l} = q_0 |\vec{E}| \cdot |d\vec{l}| \cdot \cos \alpha = q_0 E_{dl} \cdot |d\vec{l}| = -q_0 d\varphi,$$

откуда

$$E_{dl} = -\frac{d\varphi}{dl}. \quad (1.10)$$

Формула (1.10) устанавливает связь между проекцией вектора \vec{E} на направление перемещения $d\vec{l}$ и потенциалом φ электрического поля.

С помощью формулы (1.10) установим связь потенциала с вектором напряжённости. При этом учтём, что

$$\vec{E} = E_x \vec{i} + E_y \vec{j} + E_z \vec{k}, \quad (1.11)$$

где $\vec{i}, \vec{j}, \vec{k}$ – орты осей x, y, z соответственно.

Согласно формуле (1.10)

$$E_x = -\frac{\partial \varphi}{\partial x}, \quad E_y = -\frac{\partial \varphi}{\partial y}, \quad E_z = -\frac{\partial \varphi}{\partial z}. \quad (1.12)$$

Подставив выражения (1.12) в формулу (1.11), получим

$$\vec{E} = -\left(\frac{\partial \varphi}{\partial x} \vec{i} + \frac{\partial \varphi}{\partial y} \vec{j} + \frac{\partial \varphi}{\partial z} \vec{k} \right) = -\text{grad} \varphi \quad (1.13)$$

Градиент потенциала – это вектор, направленный в сторону наибольшего возрастания потенциала, модуль которого равен изменению потенциала, приходящемуся на единицу длины линии напряжённости.

Из формулы (1.13) следует, что вектор напряжённости в любой точке электростатического поля равен градиенту потенциала, взятому со знаком минус. Поле сильнее там, где быстрее изменяется потенциал.

Поверхность, во всех точках которой потенциал имеет одно и то же значение, называется **эквипотенциальной**.

Перемещение заряда вдоль этой поверхности не сопровождается работой ($\varphi = \text{const}$, $d\varphi = 0$, $A = 0$). Это означает, что силы электрического поля, а следовательно, и *линии напряжённости перпендикулярны к эквипотенциальным поверхностям и направлены от поверхности с большим потенциалом к поверхности с меньшим потенциалом*.

На рис. 1.1 приведены графические изображения полей двух разноимённых бесконечно удалённых друг от друга точечных зарядов, а на рис. 1.2 – поле системы близко расположенных разноимённых точечных зарядов. Сплошными линиями показаны *линии напряжённости*, а пунктиром – *эквипотенциальные линии*.

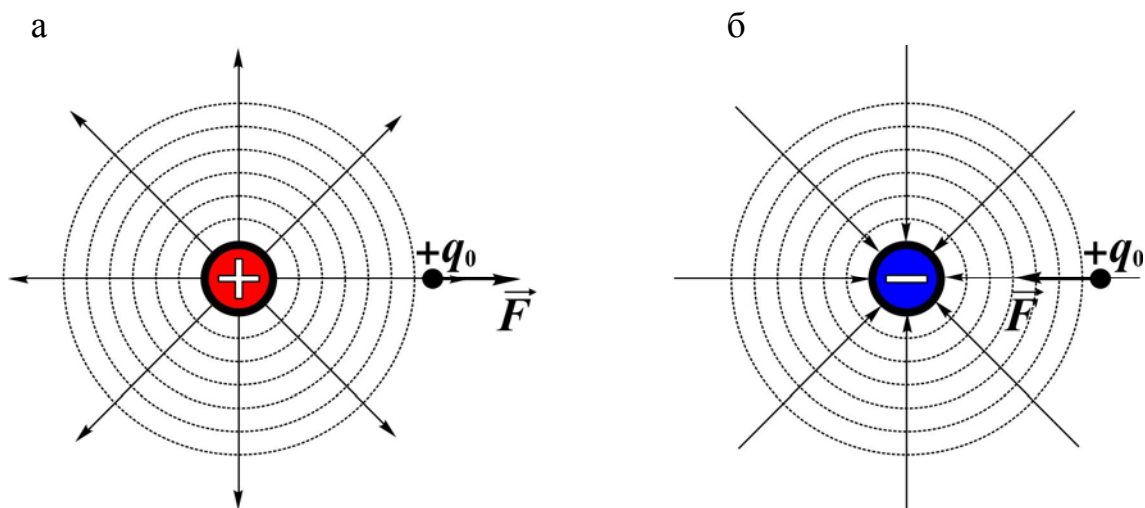


Рис. 1.1. Линии напряжённости и эквипотенциальные линии электростатического поля точечных зарядов:
а – уединенного положительного; б – уединенного отрицательного

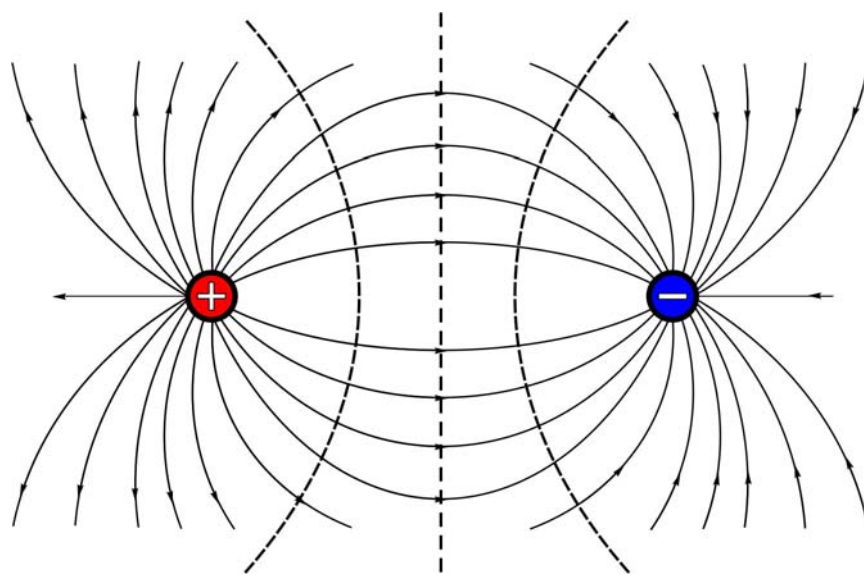


Рис. 1.2. Линии напряжённости и эквипотенциальные линии электростатического поля двух разноимённых зарядов

В 1902 г. немецким нейрофизиологом **Юлиусом Бернштейном** была создана первая количественная *теория биопотенциалов*, в которой он показал, что электрические явления в живом организме и в технических устройствах имеют одну природу.

Каждая клетка живого организма представляет собой замкнутый объём, покрытый жёсткой оболочкой – *мембраной*, толщиной ~7–15 нм. Она отделяет внутреннюю среду клетки от внешней среды. *Межклеточная среда* – жидкость, содержащая значительное количество носителей заряда (положительных и отрицательных ионов). В ней концентрация ионов калия в 30 раз меньше концентрации ионов натрия. Однако внутри клетки концентрация ионов калия в 30–40 раз выше, чем в наружной среде. В мембране имеются каналы, открытые в состоянии покоя. Благодаря различию концентраций через мембрану возникают потоки ионов. В результате на её поверхности образуется двойной заряженный слой, создающий сильное электрическое поле, влияющее на ионообмен в клетке. Разделение зарядов продолжается до тех пор, пока не установится динамическое равновесие, соответствующее разности потенциалов между внешней и внутренней поверхностями мембраны ~50–60 мВ. Это и есть *потенциал покоя клетки*.

При переходе ткани организма к активной деятельности проницаемость и электрическое состояние клеточных мембран резко меняются, в результате чего возникает импульс (электрический по своей природе), который распространяется по нервному волокну со скоростью около 20 м/с. *Способность преобразовывать все внешние воздействия в электрические – универсальное свойство живого организма*. Электрические процессы в отдельных клетках и волокнах суммируются и обуславливают распределение зарядов в тканях и органах. В работающей мышце постепенно увеличивается положительный заряд. Это способствует повышенному снабжению её кислородом. Работа мышц, нервных клеток приводит к определенному распределению потенциала в работающем органе. Каждый орган имеет специфическое электрическое поле и характерные потенциалы действия, отражающие его функциональное состояние. Их регистрация используется для физиологических исследований. Большое значение приобрела регистрация биопотенциалов сердца (электрокардиография), мозга (электроэнцефалография), мышц (электромиография).

Исследования показывают, что тело рыб является своего рода электрическим диполем, образующим в окружающей среде электрическое поле. Поэтому рыбы очень чувствительны к внешним электрическим полям. Например, электрические органы акул и скатов реагируют на поля напряженностью 0,1 мкВ/м. Эти хищники способны обнаружить добычу по электрическому полю, возникающему при работе сердца и сокращении мышц. Некоторые виды рыб (например, электрический скат) имеют специальный орган для накопления электрической энергии – своеобразную батарею конденсаторов из множества чередующихся прослоек нервной

(проводящей) и соединительной (непроводящей) ткани. Напряжение такой батареи может достигать 600–1000 В, а мощность электрического импульса при разряде – 1 кВт

Все жизненно важные процессы в живых организмах теснейшим образом связаны с *электрическими эффектами*. Опыты показывают, что постоянное электрическое поле может ускорять фотосинтез и рост растений (если линии напряжённости направлены сверху вниз) и замедлять их (при обратной полярности). Измерения показали, что земной шар заряжен отрицательно (его заряд $\approx 6 \cdot 10^5$ Кл), а верхние слои атмосферы – положительно. Напряжённость электрического поля у поверхности Земли в среднем составляет 130 В/м. Изменение околоземного поля в результате различных атмосферных явлений (циклоны, грозы и т.д.) приводит к перераспределению зарядов в организме человека и влияет на его состояние.

2. МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Трудности электростатических измерений (в том числе измерения потенциала) обусловили разработку особого экспериментального метода изучения электростатических полей путём искусственного воспроизведения их структуры в проводящих средах, по которым пропускается постоянный ток. Оказывается, что при некоторых условиях распределение потенциала в среде, по которой течёт ток между установленными в ней электродами (разноименно заряженными телами, имеющими высокую электропроводность), может быть сделано тождественным с распределением потенциалов между теми же электродами, когда между ними имеется электростатическое поле в вакууме или в однородном диэлектрике. Измерения же распределения потенциалов в проводящей среде, по которой течёт постоянный ток, – сравнительно легкая экспериментальная задача.

Условиями тождественности являются:

- равенство разности потенциалов между электродами, создающими поле в проводящей среде и диэлектрике;
- несоизмеримость удельных сопротивлений электродов и проводящей среды.

Сама же тождественность объясняется отсутствием объёмных зарядов в однородной электропроводящей среде при прохождении по ней постоянного тока.

Изучение поля в проводящей среде осуществляется с помощью специального иглообразного электрода-зонда, при введении которого в проводящую среду он автоматически приобретает потенциал данной точки поля. Сам зонд соединяется с вольтметром – прибором, измеряющим разность потенциалов между отдельными точками электрической цепи. При этом, чтобы не исказить распределение потенциалов в исследуемом поле, электрическая цепь зонда должна обладать большим сопротивлением по

сравнению с сопротивлением проводящей среды между точкой, в которую помещён зонд, и ближайшим электродом.

Современные цифровые вольтметры являются приборами интегральной электроники. Они имеют достаточно большое сопротивление (порядка 1 МОм) и не искажают распределения потенциалов поля между электродами.

Типичная эквивалентная электрическая схема цепи, моделирующая исследуемое электростатическое поле, приведена на рис. 1.3. Схема включает два источника тока с одинаковой электродвижущей силой ε , два одинаковых сопротивления R , каждое из которых является суммарным сопротивлением соответствующего электрода, токоподводящих проводников и внутреннего сопротивления источника тока. Кроме того, на схеме показаны сопротивления R' и R'' , каждое из которых является сопротивлением проводящей среды между соответствующим электродом и зондом. В отличие от суммарного сопротивления среды

$$R_c = R' + R'' \quad (1.14)$$

составляющие R' и R'' зависят от координат x и y точки среды, в которой расположен зонд.

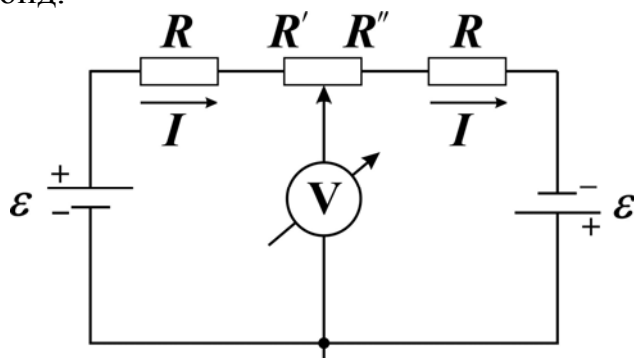


Рис. 1.3. Эквивалентная схема цепи, моделирующая исследуемое поле

Связь потенциала зонда с составляющими сопротивления среды можно получить, полагая сопротивление вольтметра столь большим, что ток, проходящий через него, близок к нулю. В соответствии с законом Ома для замкнутой цепи, сила тока в цепи

$$I = \frac{2\varepsilon}{2R + R_c}. \quad (1.15)$$

С другой стороны, эту же силу тока можно найти, воспользовавшись законом Ома для неоднородного участка цепи от заземлённой точки до зонда

$$I = \frac{(\varphi_0 - \varphi) + \varepsilon}{R + R''}, \quad (1.16)$$

где φ_0 – потенциал заземлённой точки, а φ – потенциал зонда.

Приравнивая правые части выражений (1.15) и (1.16), учитывая соотношение (1.13) и полагая потенциал заземленной точки равным нулю, получим, что потенциал зонда

$$\varphi(x, y) = \varepsilon(R'' - R') / (2R + R_c). \quad (1.17)$$

Из выражения (1.17) следует, что в зависимости от координат зонда, т.е. соотношения между составляющими сопротивления электропроводящей среды R'' и R' потенциал зонда может изменяться как по величине, так и по знаку.

Как отмечалось выше, экспериментально напряжённость поля не измеряют, а используют её связь с потенциалом. В случае однородного электростатического поля ($E = \text{const}$) для модуля его напряжённости, в соответствии с выражением (1.10), можно записать

$$E = \frac{\varphi_1 - \varphi_2}{l}, \quad (1.18)$$

где $\varphi_1 - \varphi_2$ – разность потенциалов двух эквипотенциальных плоскостей; l – расстояние между ними.

В общем случае неоднородного поля, когда вектор напряженности \vec{E} изменяется как по величине, так и по направлению, найти его модуль в заданной точке поля можно, используя приближенную формулу

$$E \approx \frac{\Delta\varphi}{\Delta l}, \quad (1.19)$$

где $\Delta\varphi$ – разность потенциалов двух эквипотенциальных поверхностей в окрестности заданной точки; Δl – длина отрезка прямой, проведенной через заданную точку перпендикулярно к эквипотенциальным поверхностям.

Получая из зондовых измерений информацию о потенциалах поля в различных точках слабо проводящей пластины, на которой устанавливаются создающие поле электроды, определяют пространственную структуру потенциалов поля, $\varphi(x, y)$, затем, используя уравнение (1.19) и свойство ортогональности силовых и эквипотенциальных линий, получают пространственную структуру напряжённости электрического поля $\vec{E}(x, y)$ между электродами.

3. ЛАБОРАТОРНАЯ УСТАНОВКА

Общий вид установки ЛКЭ-7 изображён на рис. 1.4. Вверху слева расположен мультиметр М890F, использующийся в режиме измерения напряжения постоянного тока, внизу слева – панель двухполярного источника постоянного тока с клеммой « \perp » («земля») и двумя потенциальными клеммами «+» и «-». Вверху справа расположена пластина разборного

конденсатора, используемая в данном случае в качестве столика, на котором закрепляется лист миллиметровой бумаги. Ниже пластины располагается исследуемая плата с двумя металлическими электродами, укрепленными на электропроводящей плёнке из графита. Над платой расположены направляющие пантографа, имеющего два отверстия: верхнее – для фломастера и нижнее – для электрического зонда. Две миллиметровые линейки, ориентированные по осям X и Y , используются для отсчёта координат зонда и фломастера.

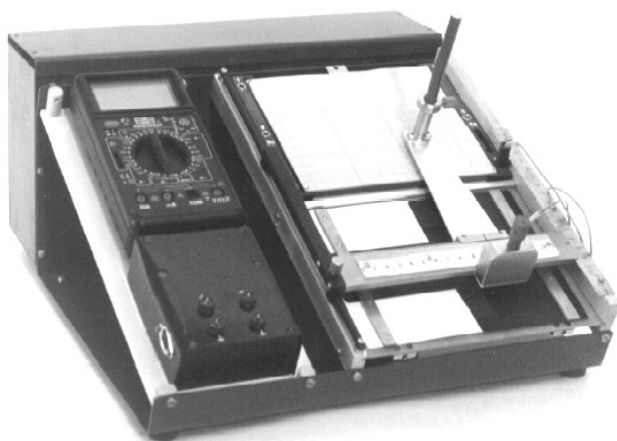


Рис. 1.4. Общий вид установки ЛКЭ-7

Установка комплектуется четырьмя платами, отличающимися формами электродов и графитовых плёнок. Плата №1 содержит два параллельно расположенных электрода в виде прямоугольных параллелепипедов и прямоугольную графитовую плёнку, покрывающую практически всю площадь платы. Плата №2 содержит два коаксиально расположенных электрода. Первый представляет собой цилиндр, второй – фрагмент

пустотелого цилиндра. Графитовая пленка между электродами имеет форму кругового сектора. Плата №3 содержит два электрода цилиндрической формы и прямоугольную графитовую пленку, покрывающую всю площадь платы. Плата №4 содержит два параллельно расположенных электрода в виде прямоугольных параллелепипедов и Т-образную графитовую плёнку.

4. ИССЛЕДОВАНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОТЕНЦИАЛА

1. Вставьте в пазы корпуса ЛКЭ-7 предложенную преподавателем плоскую плату из текстолита, содержащую графитовую плёнку и два электрода.

2. Соедините с помощью комплекта проводов в соответствии с вышеприведённой эквивалентной схемой (см. рис. 1.3) клеммы платы и клемму зонда с клеммами панели источника постоянного тока и мультиметра. При этом клемма мультиметра «СОМ» соединяется с клеммой « \perp » («земля») панели источника тока, как показано на рис. 1.5.

3. Наколите на четыре острые шпильки столика под пантографом лист миллиметровой бумаги.

4. Вставьте фломастер в отверстие держателя и закрепите его так, чтобы при нажатии кнопки зонда фломастер оставлял метку на листе. Нанесите фломастером на лист характерные метки, которые определяют

форму и пространственное расположение на плате металлических электродов Э1 и Э2.

5. Установите ручку выбора режима работы мультиметра М890F в положение V, совпадающее с цифрой 20. В этом положении мультиметр выполняет функцию вольтметра постоянного тока с предельным значением измеряемого напряжения 20 В.

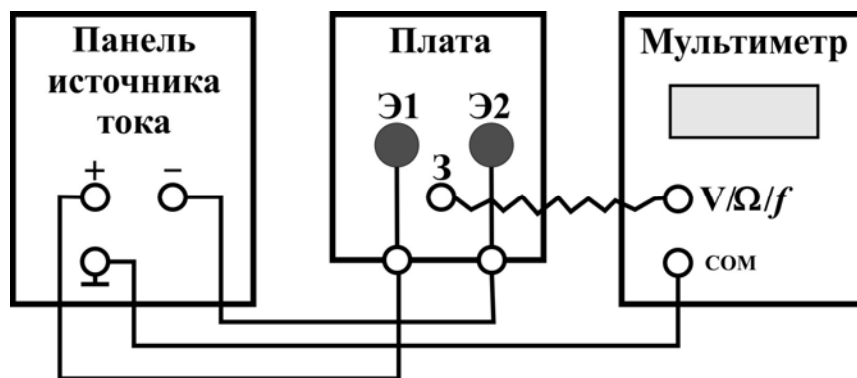


Рис. 1.5. Электрическая схема соединения узлов установки

ВНИМАНИЕ! При неправильном выполнении п.5 может выйти из строя дорогостоящий прибор интегральной электроники.

6. Соедините панель источника постоянного тока с преобразователем сетевого напряжения с помощью кабеля преобразователя.

7. Включите преобразователь сетевого напряжения в сетевую розетку.

8. Отпустите винт, фиксирующий рейку пантографа. Передвигая каретку и касаясь зондом электродов, убедитесь, что их поверхности эквипотенциальны и имеют потенциалы противоположных знаков.

9. Перемещая зонд мелкими шагами и наблюдая за табло мультиметра, отыщите на графитовой пленке 8–10 точек, принадлежащих одной эквипотенциальной линии. Координаты точек и соответствующее им значение потенциала внесите в табл. 1.1. Повторите п. 9 для ряда линий, характеризующихся потенциалами в диапазоне, ограниченном потенциалами электродов, с шагом, заданным преподавателем.

ВНИМАНИЕ! При выполнении пп. 9-10 нужно учесть, что в силу небольшой механической прочности графитовой плёнки усилия, прилагаемые к зонду, должны быть минимально необходимыми для обеспечения электрического контакта зонда с плёнкой. Кроме этого, запрещается передвигать рейку пантографа при нажатой кнопке зонда.

10. Отключите установку от электрической сети. Снимите со столика пантографа миллиметровую бумагу и соедините точки, соответствующие одному потенциалу, плавной линией, получив, таким образом, набор эквипотенциальных линий поля.

Таблица 1.1

| Номер линии | Параметр | Значение параметра | | | | | | | | | |
|-------------|---------------|--------------------|--|--|--|--|--|--|--|--|--|
| 1 | φ , В | | | | | | | | | | |
| | x , мм | | | | | | | | | | |
| | y , мм | | | | | | | | | | |
| 2 | φ , В | | | | | | | | | | |
| | x , мм | | | | | | | | | | |
| | y , мм | | | | | | | | | | |
| ... | | | | | | | | | | | |

5. ИССЛЕДОВАНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ НАПРЯЖЁННОСТЕЙ

1. Учитывая, что линии напряжённости перпендикулярны к эквипотенциальным линиям, нанесите на карту распределения потенциала линии напряжённости электрического поля.

2. В точках, указанных преподавателем, вычислите приближенное значение напряжённости, воспользовавшись формулой (1.19). Вычисленные значения напряжённости укажите в соответствующих точках на карте поля.

Контрольные вопросы

1. Сформулируйте важнейшие законы электростатики, положенные в основу электромагнитной картины мира.

2. Что называется электрическим полем?

3. Дайте определение напряжённости электростатического поля. Какова единица измерения напряжённости?

4. Сформулируйте принцип суперпозиции электростатических полей.

5. Дайте определение линий напряжённости и опишите их свойства.

6. Почему электростатическое поле потенциально?

7. Что называется потенциалом электростатического поля? В каких единицах измеряется потенциал?

8. Как определяется потенциал поля системы зарядов?

9. Что называют разностью потенциалов между двумя точками электростатического поля?

10. Какие поверхности (линии) называются эквипотенциальными?

11. Как по картине эквипотенциальных линий построить картину силовых линий электростатического поля?

12. Какова связь между напряжённостью и потенциалом электростатического поля?

13. Объясните, чем обусловлено электричество в живых организмах.

Лабораторная работа №2
ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК
ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЦЕПИ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Цель работы – исследование зависимости коэффициента полезного действия источника тока полной мощности и мощности, выделяемой во внешней цепи, от сопротивления внешнего участка цепи.

Приборы и принадлежности – лабораторный комплекс ЛКЭ-2П, включающий источник тока, мультиметр, магазин сопротивлений и комплект соединительных проводов.

1. ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

Электрическим током называется упорядоченное (направленное) движение заряженных частиц или заряженных макроскопических тел.

Различают конвекционные токи и токи проводимости.

Конвекционным называют ток, обусловленный перемещением в пространстве заряженных макроскопических тел (например, падение заряженных дождевых капель; движение заряженных пылинок в воздухе).

Током проводимости называют упорядоченное движение в веществе или вакууме свободных заряженных частиц: электронов проводимости (в металлах), положительных и отрицательных ионов (в электролитах), электронов, положительных и отрицательных ионов (в газах), электронов проводимости и дырок (в полупроводниках), пучков электронов (в вакууме).

Для существования электрического тока проводимости необходимо выполнение двух условий:

- 1) наличие свободных носителей тока (заряженных частиц);
- 2) наличие электрического поля, действующего на заряженные частицы с силой $\vec{F} = q\vec{E}$, вызывающего и поддерживающего их упорядоченное движение.

Вещества, в которых могут существовать токи проводимости, называются **проводниками**.

Различают следующие типы проводников:

1. *Проводники I рода* – металлы и их сплавы. В них носителями тока являются свободные электроны.

2. *Проводники II рода* – электролиты (водные растворы солей, кислот, щелочей). В них перенос зарядов под действием электрического поля осуществляется положительными и отрицательными ионами.

3. *Проводники III рода* – ионизированные газы. В них подвижными носителями заряда являются свободные электроны и ионы (как положительные, так и отрицательные).

Материалы, не проводящие электрический ток, называются **изоляторами** (диэлектриками).

За направление электрического тока условно принимают направление упорядоченного движения положительно заряженных частиц.

Количественной характеристикой электрического тока является сила тока.

Сила тока I – скалярная физическая величина, равная электрическому заряду, проходящему через поперечное сечение проводника за единицу времени

$$I = \frac{dq}{dt}. \quad (2.1)$$

Постоянным называется ток, сила и направление которого не изменяются с течением времени.

Для постоянного тока

$$I = \frac{q}{t}. \quad (2.2)$$

В СИ единица силы тока – ампер (1 А).

1 А – это сила такого постоянного тока, который при прохождении по двум параллельным прямолинейным проводникам бесконечной длины и ничтожно малого поперечного сечения, расположенным в вакууме на расстоянии 1 м один от другого, вызывает на каждом участке длиной 1 м силу взаимодействия $2 \cdot 10^{-7}$ Н.

Силу тока в цепи измеряют амперметром. Амперметр включают в цепь тока последовательно. Идеальный амперметр имеет нулевое внутреннее сопротивление.

Для характеристики распределения силы тока по сечению проводника вводится понятие плотности тока.

Плотностью тока \vec{j} называется векторная физическая величина, совпадающая с направлением тока и численно равная отношению силы тока dI , проходящего через элементарную поверхность, перпендикулярную направлению тока, к площади dS_{\perp} этой поверхности

$$j = \frac{dI}{dS_{\perp}}. \quad (2.3)$$

В СИ плотность тока измеряют в амперах на квадратный метр (1 А/м^2).

Плотность постоянного тока по всему поперечному сечению однородного проводника одинакова. Поэтому сила постоянного тока в однородном проводнике с площадью поперечного сечения S равна

$$I = jS.$$

Если в цепи на носители тока действуют только силы электрического поля, то происходит перемещение носителей (положительно заряженных частиц) от точек с большим потенциалом к точкам с меньшим потенциалом. Это приводит к выравниванию потенциала во всех точках цепи и к исчезновению электрического поля. Для того чтобы ток существовал длительное время, в цепь включают *источник тока*, который создаёт и поддерживает разность потенциалов за счет работы сторонних сил.

Сторонними называются силы неэлектростатической природы.

Природа сторонних сил может быть различной. В химических источниках (аккумуляторе или гальваническом элементе) они возникают благодаря химическим реакциям на границе соприкосновения пластин аккумулятора или электродов батарейки с жидким электролитом. В фотоэлементе они возникают в результате действия света на электроны в металле или полупроводнике. В генераторах электростанций сторонние силы возникают при движении проводников в магнитном поле.

Энергетической характеристикой источника тока является электродвижущая сила (ЭДС).

Электродвижущая сила ε – это скалярная физическая величина, равная работе сторонних сил $A_{\text{стор}}$ при перемещении единичного положительного заряда

$$\varepsilon = \frac{A_{\text{стор}}}{q}.$$

ЭДС, как и потенциал, в СИ измеряется в *вольтах* (1 В).

Участок цепи, содержащий источник тока, называется **неоднородным** (рис. 2.1).

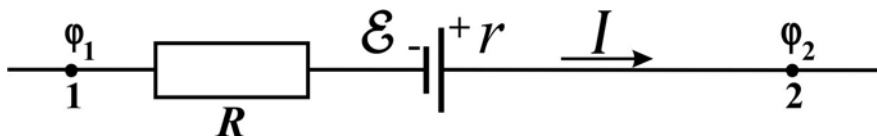


Рис. 2.1. Схема неоднородного участка цепи

В неоднородном участке цепи на носители тока кроме кулоновских (электростатических) сил

$$\vec{F}_{\text{кул}} = q\vec{E},$$

действуют сторонние силы

$$\vec{F}_{\text{стор}} = q\vec{E}_{\text{стор}},$$

где $\vec{E}_{\text{стор}}$ – напряженность поля сторонних сил.

Следовательно, результирующая сила, действующая в каждой точке участка на заряд, будет равна

$$\vec{F} = q(\vec{E} + \vec{E}_{\text{стор}}).$$

Работа, совершаемая этой силой над зарядом q на участке 1-2, определяется по формуле

$$A_{12} = \int_1^2 \vec{F} d\vec{l} = q \int_1^2 (\vec{E} + \vec{E}_{\text{стор}}) d\vec{l} = q(\varphi_1 - \varphi_2) + q\varepsilon_{12},$$

где $d\vec{l}$ – элемент длины проводящего участка цепи; $(\varphi_1 - \varphi_2)$ – разность потенциалов на участке 1-2.

Произведение заряда q на разность потенциалов $(\varphi_1 - \varphi_2)$ на участке 1-2 равно работе $A_{\text{эл}}$ электростатических (кулоновских) сил на этом участке

$$q(\varphi_1 - \varphi_2) = A_{\text{эл}}.$$

Произведение заряда q на ЭДС ε равно работе сторонних сил $A_{\text{стор}}$ на участке 1-2.

$$q\varepsilon = A_{\text{стор}}.$$

Напряжением U на участке 1-2 называется величина, численно равная работе, совершаемой суммарным полем кулоновских и сторонних сил над единичным положительным зарядом

$$U_{12} = \frac{A_{12}}{q} = (\varphi_1 - \varphi_2) + \varepsilon_{12}. \quad (2.4)$$

Сила тока, проходящего по участку цепи, содержащему источник тока с внутренним сопротивлением r , определяется по формуле

$$I = \frac{(\varphi_1 - \varphi_2) \pm \varepsilon}{R + r}. \quad (2.5)$$

Формула (2.5) выражает **закон Ома для неоднородного участка цепи**:

сила тока, текущего по неоднородному участку цепи, прямо пропорциональна напряжению на его концах и обратно пропорциональна полному сопротивлению участка.

Знак «+» перед ЭДС выбирается в том случае, когда направление переноса положительных зарядов сторонними силами совпадает с направлением тока.

*Участок цепи, не содержащий источника тока (т.е. на котором не действуют сторонние силы), называется **однородным**.*

Для него $U_{12} = \varphi_1 - \varphi_2$ и **закон Ома для однородного участка цепи**, установленный им в 1827 г., формулируется так:

сила тока в однородном проводнике прямо пропорциональна разности потенциалов на его концах и обратно пропорциональна сопротивлению проводника

$$I = \frac{\varphi_1 - \varphi_2}{R}, \quad (2.6)$$

где R – электрическое сопротивление проводника. Единица сопротивления – Ом (1 Ом).

1 Ом – это сопротивление такого проводника, в котором при напряжении в 1 В возникает ток в 1 А.

Электрическое сопротивление металлического проводника обусловлено тем, что свободные электроны при своем движении взаимодействуют (соударяются) с положительными ионами кристаллической решётки. Поэтому сопротивление проводника зависит, прежде всего, от материала проводника (т.е. строения его кристаллической решётки), а также от его размеров. Сопротивление однородного проводника длиной l и площадью поперечного сечения S определяется по формуле

$$R = \rho \frac{l}{S}, \quad (2.7)$$

где ρ – удельное сопротивление, зависящее от свойств материала проводника.

Удельное сопротивление – скалярная физическая величина, численно равная сопротивлению однородного проводника единичной длины и единичной площади поперечного сечения.

Самым низким удельным сопротивлением обладает серебро ($\rho_{Ag} = 1,6 \cdot 10^{-8} \text{ Ом} \cdot \text{м}$) – наилучший проводник. Однако оно дорого. Немного уступает серебру медь ($\rho_{Cu} = 1,7 \cdot 10^{-8} \text{ Ом} \cdot \text{м}$). Провода чаще изготавливают из меди. Удельное сопротивление алюминия ($\rho_{Al} = 2,6 \cdot 10^{-8} \text{ Ом} \cdot \text{м}$) выше, чем у меди, однако он имеет гораздо меньшую плотность, поэтому в некоторых случаях алюминиевым проводникам отдают предпочтение. Например, при устройстве линий электропередач, поскольку сопротивление алюминиевых проводов той же массы оказывается меньше, чем медных.

Во многих случаях бывают нужны приборы, имеющие большое сопротивление. Их изготавливают из специально созданных сплавов – веществ с

большим удельным сопротивлением. Один из таких сплавов – нихром – имеет удельное сопротивление, почти в 40 раз большее, чем алюминий.

Фарфор ($\rho_{\text{фарф}} = 10^{13} \text{ Ом} \cdot \text{м}$) и эбонит ($\rho_{\text{эбон}} = 10^{14} \text{ Ом} \cdot \text{м}$) имеют такое большое удельное сопротивление, что почти совсем не проводят электрический ток, их используют в качестве *изоляторов*.

Тело человека, как и любой живой организм, является хорошим проводником электрического тока. Однако по проводимости наш организм очень неоднороден, в нем сложным образом чередуются хорошо проводящие участки с малым удельным сопротивлением (нервные ткани, биологические жидкости, содержащие значительное количество ионов) и участки с низкой проводимостью (кожа, костная и связочная ткани, оболочки клеток).

Опасность для организма представляет не само напряжение, а протекающий электрический ток, особенно постоянный. Постоянный ток оказывает на ткани раздражающее действие, вызывает непроизвольное сокращение мышц, параличи, расстройство дыхания, кровообращения. При токе $I \approx 0,4 - 10 \text{ А}$ наступает обратимая остановка сердца. Опасно братья за оголенный провод, находящийся под напряжением (создается цепь: провод–человек–земля); человек не в состоянии выпустить провод из-за сильного сокращения мышц. Сильные токи приводят к тяжелым ожогам.

Удельное сопротивление материала проводника зависит от температуры

$$\rho = \rho_0 (1 + \alpha t),$$

где ρ_0 – удельное сопротивление при температуре 0°C ; t – температура (по шкале Цельсия); α – температурный коэффициент сопротивления, характеризующий относительное изменение сопротивления проводника при его нагревании на 1°C или 1 К .

Температурные коэффициенты сопротивления веществ различны при разных температурах. Однако для многих металлов изменение α с температурой невелико. Для большинства чистых металлов $\alpha \approx 1 / 273 \text{ К}^{-1}$.

Закон Ома можно представить в дифференциальной форме. Подставив выражение для сопротивления (2.7) в формулу закона Ома (2.6), получим

$$I = \frac{1}{\rho} \frac{\Delta\varphi S}{l},$$

или

$$\frac{I}{S} = \frac{1}{\rho} \frac{\Delta\varphi}{l}. \quad (2.8)$$

Величина $\gamma = \frac{1}{\rho}$ называется удельной проводимостью и измеряется в *Сименсах на метр* (1 См/м).

Учитывая, что $I/S = j$ – плотность тока, а $\Delta\varphi/l = E$ – напряженность электрического поля на участке l (когда l бесконечно мало, т.е. $l \rightarrow 0$, то E – напряженность в точке), выражение (2.8) можно записать в виде

$$j = \frac{E}{\rho}.$$

Так как в изотропном проводнике носители тока в каждой точке движутся в направлении вектора \vec{E} , то направления \vec{j} и \vec{E} совпадают.

$$\vec{j} = \frac{\vec{E}}{\rho}. \quad (2.9)$$

Выражение (2.9) представляет собой **закон Ома в дифференциальной форме**:

плотность тока в любой точке внутри проводника прямо пропорциональна напряженности электрического поля в этой точке.

Это соотношение справедливо и для переменных полей.

Проводники в электрической цепи могут быть соединены последовательно и параллельно.

В табл. 2.1 приведены законы последовательного и параллельного соединения проводников.

Т а б л и ц а 2.1

| Соединение | Последовательное | Параллельное |
|--------------------------|------------------------|--|
| Постоянный параметр цепи | $I = \text{const}$ | $U = \text{const}$ |
| Суммируемая величина | $U = \sum_{i=1}^n U_i$ | $I = \sum_{i=1}^n I_i$ |
| Общее сопротивление цепи | $R = \sum_{i=1}^n R_i$ | $\frac{1}{R} = \sum_{i=1}^n \frac{1}{R_i}$ |

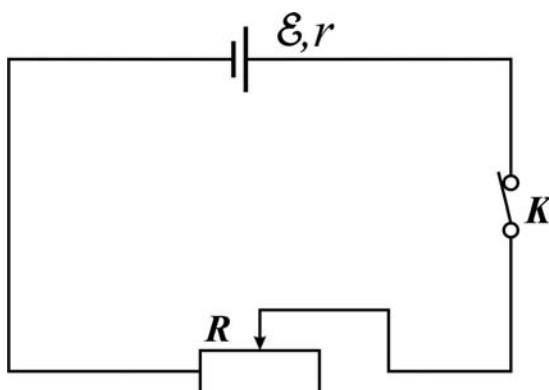


Рис. 2.2. Схема замкнутой цепи

Полная (или замкнутая) цепь – это электрическая цепь, в которую включены источник тока и потребители (рис.2.2).

R – сопротивление внешнего участка цепи (нагрузки).

Для замкнутой цепи $\varphi_1 - \varphi_2 = 0$, поэтому $U = \varepsilon$. Тогда из формул (2.4)–(2.5) получим **закон Ома для замкнутой цепи**:

сила тока в замкнутой цепи прямо пропорциональна ЭДС источника тока и обратно пропорциональна полному сопротивлению цепи.

$$I = \frac{\varepsilon}{R + r} \quad (2.10)$$

При $R \rightarrow 0$ (**короткое замыкание**) сила тока увеличивается до $I_{\text{к.з.}} = \frac{\varepsilon}{r}$, возрастая по сравнению с обычным значением (2.10) в $\frac{R}{r}$ раз.

Например, если лампочка фары автомобиля имеет сопротивление $R = 10 \text{ Ом}$, а внутреннее сопротивление аккумулятора $r = 0,01 \text{ Ом}$, то при коротком замыкании сила тока может возрасти в 1000 раз. Такое возрастание тока может привести к выделению большого количества теплоты и стать причиной пожара. Чтобы избежать этого, в цепь последовательно включают предохранители, которые плавятся при увеличении тока сверх нормы и размыкают электрическую цепь.

Во внешнем участке цепи происходит превращение энергии электрического тока в другие виды энергии в зависимости от потребителей: в механическую, если, например, в цепь включены электромоторы; в световую, если в цепь включены световые источники; во внутреннюю энергию тепловых приборов и т.д.

Мерой превращения энергии электрического тока в другие виды энергии является работа тока.

Работа электрического тока A – это работа, совершаемая электрическим полем при упорядоченном движении зарядов в проводнике

$$A = IUt,$$

где I – сила тока; U – напряжение на внешнем участке цепи; t – время, в течение которого совершается работа.

Важной характеристикой электрической цепи является мощность тока. **Мощность тока** P – это работа, совершаемая за единицу времени,

$$P = \frac{A}{t}.$$

Полная мощность P , развиваемая источником и идущая на выделение тепла во внешнем и внутреннем участках цепи, равна

$$P = I\varepsilon = \frac{\varepsilon^2}{R + r}. \quad (2.11)$$

Её можно выразить в виде суммы двух слагаемых

$$P = P_{\text{п}} + P_r,$$

где $P_{\text{п}}$ – мощность, выделяемая на внешнем участке цепи (**полезная мощность**),

$$P_{\text{п}} = I^2 R = \frac{\varepsilon^2 R}{(R + r)^2}; \quad (2.12)$$

P_r – мощность, выделяемая внутри источника тока (теряемая мощность)

$$P_r = I^2 r = \frac{\varepsilon^2 r}{(R + r)^2}.$$

Как видно из формул (2.11) и (2.12), мощность, выделенная во внешней цепи, и полная мощность источника тока зависят от ЭДС источника, его внутреннего сопротивления и сопротивления внешнего участка цепи. Так как ЭДС источника и его внутреннее сопротивление, являющиеся характеристиками источника тока, не изменяются, то полная мощность и мощность, выделенная во внешней цепи, являются функциями сопротивления нагрузки R , т.е.: $P = f_1(R)$, $P_{\text{п}} = f_2(R)$.

При $R = 0$, $U = 0$ (короткое замыкание) полезная мощность $P_{\text{п}} = 0$. Если же $R = \infty$ (цепь разомкнута), то $U = \varepsilon$ и снова $P_{\text{п}} = 0$. Если же сопротивление R нагрузки изменяется в пределах от $R = 0$ до $R = \infty$, то напряжение будет изменяться от 0 до ε . Полезная мощность при этом должна иметь максимальное значение при определенном значении R . Найдем величину сопротивления R , при котором полезная мощность $P_{\text{п}}$ достигает максимума. Дифференцируя (2.12) по R и приравнивая результат дифференцирования к нулю, получим

$$\varepsilon^2 (r^2 - R^2) = 0.$$

Так как ЭДС источника $\varepsilon \neq 0$, то

$$R = r. \quad (2.13)$$

Выделяемая во внешней цепи мощность максимальна, если сопротивление внешнего участка цепи равно внутреннему сопротивлению источника тока.

Коэффициент полезного действия (КПД) электрической цепи показывает экономичность работы цепи

$$\eta = \frac{P_{\text{п}}}{P} = \frac{R}{R + r}. \quad (2.14)$$

Из формулы (2.14) видно, что КПД источника тока есть функция сопротивления внешнего участка цепи $\eta = f(R)$.

При разомкнутой цепи КПД равен 100 % (ток не течёт, и нет потерь). При короткозамкнутой цепи КПД равен 0 (ток течёт, но нет внешнего сопротивления, полезной мощности нигде выделиться). При $R = r$ КПД цепи составляет 50 %.

Если на данном участке цепи электрический ток не совершает механической работы, то вся его энергия выделяется в виде теплоты.

Закон, описывающий тепловое действие тока, был установлен в 1841 г. английским физиком Джеймсом Джоулем и подтвержден в 1842 г. точными опытами русского учёного Эмилия Ленца.

Закона Джоуля – Ленца:

количество теплоты, выделяемое током в проводнике, прямо пропорционально квадрату силы тока, сопротивлению проводника и времени прохождения по нему тока.

$$Q = I^2 R t. \quad (2.15)$$

На тепловом действии тока основано устройство таких общеизвестных приборов, как электрический чайник, утюг, тостер, калорифер, лампа накаливания, паяльник, предохранитель и др.

2. ОПИСАНИЕ ЛАБОРАТОРНОЙ УСТАНОВКИ

Лабораторный комплекс ЛКЭ-2П является универсальным стендом, представляющим собой плитовой каркас с размещенными на нём электроэлементами, узлами и измерительными приборами. Комплект соединительных проводов позволяет собирать из деталей и узлов комплекса лабораторные установки, ориентированные на проведение конкретных исследований цепей постоянного тока.

При выполнении данной лабораторной работы используется лишь часть электроэлементов стенда: щелочной аккумулятор, являющийся источником тока; портативный мультиметр в качестве амперметра и магазин сопротивлений. С помощью комплекта соединительных проводов из этих элементов собирается исследуемая электрическая цепь.

Аккумулятор подключается через клеммы «-», «+12 В».

Магазин сопротивлений состоит из четырёх рядов резисторов. В каждом ряду также четыре резистора, которые внутренним монтажом соединены последовательно, а сами ряды между собой не соединены.

Мультиметр подключается через гнезда «com» и «10 А» или «com» и «200 mA», а поворотным переключателем мультиметра включается соответствующий диапазон измерений. Измерительная схема мультиметра, включающая гнездо «200 mA», защищена плавким предохранителем, сгорающим, если измеряемый ток превышает 200 mA даже на 10 %. Поэтому если величина измеряемого тока неизвестна или предположительно может превышать 200 mA, то при сборке схемы используют гнездо «10 А». И только убедившись, что реальный ток в цепи меньше 200 mA, можно произвести соответствующие переключения. Это обеспечит высокую точность измерений во всем диапазоне значений тока в исследуемой цепи.

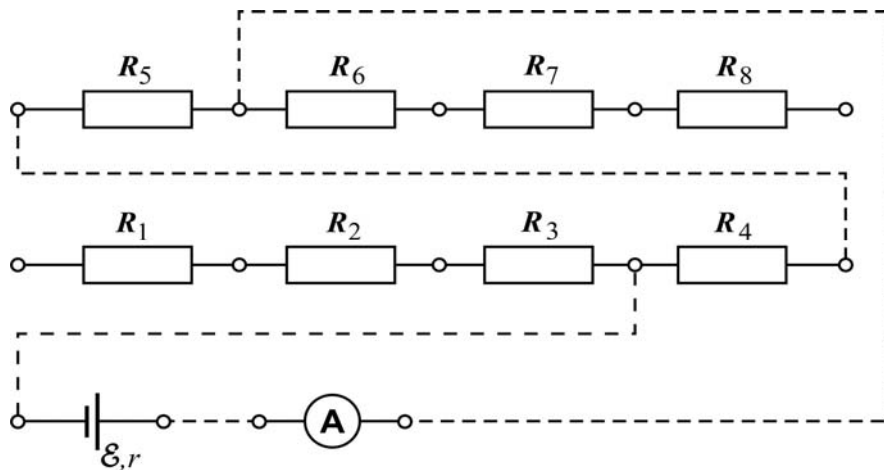


Рис. 2.3. Схема соединения элементов в замкнутую цепь с сопротивлением нагрузки, составленным из нескольких последовательно соединенных резисторов

На рис. 2.3 приведён пример соединения элементов в замкнутую цепь с сопротивлением нагрузки, составленным из нескольких последовательно соединенных резисторов. Сплошными линиями показаны стационарные внутренние соединения, а штриховыми линиями – соединения, выполняемые с помощью соединительных проводов.

3. МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

В ходе эксперимента получают значения тока в замкнутой электрической цепи для ряда конкретных значений сопротивления нагрузки. При этом необходимо помнить, что экспериментально полученные значения силы тока включают систематические и случайные погрешности.

Точные значения ЭДС и внутреннего сопротивления источника экспериментатору неизвестны. Знать же эти величины необходимо для вычисления мощности и коэффициента полезного действия. Их можно получить, если найти аналитический вид функции $I = f(R)$, которая бы наилучшим образом аппроксимировала экспериментальную зависимость силы тока от сопротивления нагрузки. Такую аппроксимацию целесообразно выполнить методом наименьших квадратов, минимизируя сумму квадратов отклонений экспериментально полученных значений силы тока I_n для ряда значений сопротивления нагрузки R_n от значений аппроксимирующей функции, вычисленных при тех же значениях R_n . Очевидно, что аппроксимирующую функцию в данном случае целесообразно выбрать исходя из закона Ома для замкнутой цепи. В результате задача сводится к минимизации следующей суммы:

$$S = \sum_{n=1}^N \left(I_n - \frac{\varepsilon}{R_n + r} \right)^2. \quad (2.16)$$

где N – общее число опытов.

Частные производные от S по ε и r , приравненные к нулю, образуют систему двух уравнений, решение которой дает значения ЭДС и сопротивления нагрузки, обеспечивающие минимизацию суммы (2.16). Эти значения ε и r максимально приближены к истинным значениям и могут быть использованы для построения графиков аппроксимирующей функции тока, мощностей и КПД.

4. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ НА РЕАЛЬНОЙ УСТАНОВКЕ

1. Внешним осмотром убедитесь в исправности установки, отсутствии механических повреждений и нарушении изоляции проводов.
2. Включите мультиметр в режим измерения тока до 10 А.
3. Используя соединительные провода, соберите цепь из последовательно соединенных источника тока, мультиметра и крайнего слева резистора из нижнего ряда магазина сопротивлений ($R_1 = 1$ Ом). Измерьте значение силы тока I_1 , в цепи и запишите его в первой строке третьего столбца табл. 2.2.
4. Выбирая из магазина сопротивлений нужный резистор или используя последовательное соединение нескольких резисторов, наберите сопротивление нагрузки R_n , указанное в следующей строке табл. 2.2.
5. Используя набранное сопротивление, источник тока и мультиметр, соберите замкнутую цепь, измерьте значение силы тока I_n и внесите его в соответствующую графу табл. 2.2.
6. Повторяя пп. 4-5, полностью заполните третий столбец табл. 2.2.
7. Для обработки результатов измерений перейдите к компьютеру.
8. Запустите компьютерную программу, наведя мышью курсор на название работы и нажав левую клавишу мыши.
9. Нажмите на любую клавишу клавиатуры. На экране монитора появится изображение лабораторной установки.
10. Наведите мышью курсор на клавишу «на реальной установке» и активизируйте её.
11. В таблицу на экране монитора для каждого сопротивления нагрузки введите значение силы тока, полученное на реальной установке и зафиксированное в табл. 2.2.
12. Наведите мышью курсор на клавишу «Далее» и нажмите левую кнопку мыши. Встроенная программа компьютера по экспериментально полученным значениям тока методом наименьших квадратов выполнит расчёт значений ЭДС и внутреннего сопротивления источника тока. Занесите эти значения в табл. 2.2.
13. Следуя комментариям на экране монитора, для каждого значения сопротивления нагрузки рассчитайте значение аппроксимирующей функ-

ции тока I , полной мощности P , полезной мощности P_n и КПД (η), используя соответственно формулы (2.10), (2.11)-(2.12) и (2.14). Результаты занесите в табл. 2.2.

14. Сравнивая значения тока в цепи, полученные экспериментально, с соответствующими значениями аппроксимирующей функции тока, убедитесь в корректности аппроксимации. Аппроксимацию можно считать корректной, если максимальное отклонение экспериментально измеренного тока от соответствующего значения аппроксимирующей функции не превышает 10–15 %. Величину отклонения для каждого опыта рассчитайте по формуле

$$\delta I = \frac{|I_n - I|}{I} 100\% . \quad (2.17)$$

Максимальное отклонение внесите в табл. 2.2.

15. Постройте график аппроксимирующей функции тока, а также графики зависимостей полной мощности, полезной мощности и КПД от сопротивления нагрузки.

16. На график аппроксимирующей функции тока нанесите экспериментальные значения силы тока I_n .

5. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ НА КОМПЬЮТЕРНОМ ИМИТАТОРЕ

1. Выполните пп. 8 и 9 раздела «Порядок выполнения лабораторной работы на реальной установке».

2. Наведите мышью курсор на клавишу «На компьютерном имитаторе» и активизируйте её.

3. Наведите мышью курсор на кнопку у надписи «10м» и щелкните левой клавишей мыши. При этом на изображении лабораторной установки цифрами будут обозначены клеммы, которые необходимо соединить.

4. Наведите мышью курсор последовательно на каждую из обозначенных клемм, активизируя их левой клавишей мыши. По окончании операции клеммы автоматически соединятся.

5. Повторите п. 4 до образования замкнутой цепи, о чем будет свидетельствовать изменение текста в окне «Ход работы». Следуя указаниям этого текста, измерьте ток в цепи, установив предел измерения мультиметра «10 А». Результат измерения появится в соответствующей графе таблицы экрана монитора. Занесите этот результат в третий столбец табл. 2.2.

6. Следуя тексту в окне «Ход работы», разберите схему, наведите мышью курсор на кнопку следующего сопротивления, активизируйте её и повторите пп. 4-6 (выбирая соответствующий измеряемому току предел измерения мультиметра) до полного заполнения таблицы на экране монитора.

7. С помощью мыши активизируйте клавишу «Просмотр графиков» и занесите в табл. 2.2 появившиеся на экране монитора значения ЭДС и внутреннего сопротивления.

8. Выполните пп. 13-16 раздела «Порядок выполнения лабораторной работы на реальной установке».

Т а б л и ц а 2.2

| n | $R, \text{ Ом}$ | $I_n, \text{ А}$ | $I, \text{ А}$ | $P, \text{ Вт}$ | $P_{\text{п}}, \text{ Вт}$ | $\eta, \%$ | $\delta I, \%$ |
|--------------------------|-----------------|------------------|----------------|-----------------------------|----------------------------|------------|----------------|
| 1 | 1 | | | | | | |
| 2 | 4 | | | | | | |
| 3 | 10 | | | | | | |
| 4 | 14 | | | | | | |
| 5 | 40 | | | | | | |
| 6 | 54 | | | | | | |
| 7 | 84 | | | | | | |
| 8 | 140 | | | | | | |
| 9 | 184 | | | | | | |
| 10 | 300 | | | | | | |
| 11 | 440 | | | | | | |
| $\varepsilon, \text{ В}$ | | $r, \text{ Ом}$ | | $\delta I_{\text{max}}, \%$ | | | |
| | | | | | | | |

n – номер измерения;

R – сопротивление нагрузки, Ом;

I_n – измеренное значение тока, А;

I – значение аппроксимирующей функции тока, А;

P – полная мощность, Вт;

$P_{\text{п}}$ – полезная мощность, Вт;

η – КПД, %;

δI – относительная погрешность измерения силы тока, %;

ε – ЭДС источника тока, В;

r – внутреннее сопротивление источника тока, Ом;

δI_{max} – максимальное отклонение силы тока, %.

Контрольные вопросы

1. Что называют электрическим током? Дайте понятия конвекционного тока и тока проводимости.

2. При каких условиях в данной среде ток может возникнуть и существовать?

3. Что называют силой тока? Назовите единицу измерения силы тока в системе СИ.

4. Какой ток называют постоянным?

5. Что называют плотностью тока? Какова единица измерения плотности тока в системе СИ?

6. Что такое источник тока? Какова его роль в электрической цепи? Дайте определение ЭДС. В каких единицах измеряется ЭДС?

7. Что называют напряжением на участке цепи? При каком условии оно равно разности потенциалов на концах участка?

8. Какой участок цепи называется неоднородным? Сформулируйте закон Ома для неоднородного участка цепи.

9. Какой участок цепи называется однородным? Запишите закон Ома для однородного участка цепи.

10. Приведите вывод закона Ома в дифференциальной форме.

11. Какова физическая природа электрического сопротивления проводника? От каких величин зависит сопротивление однородного проводника?

12. Что называют удельным сопротивлением вещества?

13. Как зависит от температуры удельное сопротивление металлов?

14. Какое соединение проводников называется последовательным; параллельным? Какие физические величины сохраняются при последовательном (параллельном) соединении проводников?

15. Как определяется эквивалентное сопротивление при последовательном и параллельном соединении проводников?

16. Дайте определение замкнутой (полной) цепи. Сформулируйте и запишите закон Ома для замкнутой цепи.

17. Что называется работой тока? Как определяется работа тока на внешнем участке цепи?

18. Что называют мощностью тока? Запишите формулы для расчета полной и полезной мощностей.

19. При каком условии полезная мощность, выделяемая на внешнем участке цепи, максимальна?

20. Как определяют коэффициент полезного действия электрической цепи? Какова зависимость КПД от сопротивления нагрузки?

21. Сформулируйте закон Джоуля – Ленца. Запишите его математическое выражение.

Лабораторная работа №3
ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГОРИЗОНТАЛЬНОЙ СОСТАВЛЯЮЩЕЙ ВЕКТОРА
ИНДУКЦИИ МАГНИТНОГО ПОЛЯ ЗЕМЛИ

Цель работы: изучить магнитное поле Земли и определить горизонтальную составляющую вектора индукции магнитного поля Земли.

Приборы и принадлежности: магнитная стрелка, установка ЛКЭ-1П.

1. ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

Вокруг неподвижных электрических зарядов существует только электрическое поле. Движущиеся электрические заряды (токи) и изменяющиеся электрические поля создают в окружающем пространстве магнитное поле.

Магнитное поле – это особый вид материи, посредством которого осуществляется взаимодействие движущихся электрических зарядов, постоянных магнитов, токов с магнитами.

Магнитное взаимодействие движущихся зарядов согласно представлениям теории поля объясняется следующим образом. *Всякий движущийся электрический заряд создает в окружающем пространстве магнитное поле, способное действовать на другие движущиеся электрические заряды.*

Магнитное поле обнаруживает себя по силовому действию на движущиеся заряженные частицы (токи), а также намагниченные тела (магнитную стрелку). *Магнитная стрелка* представляет собой маленький продолговатый магнит с двумя полюсами на концах: южным (S) и северным (N).

Силовой характеристикой магнитного поля является вектор магнитной индукции.

Магнитная индукция \vec{B} – это векторная физическая величина, численно равная силе, действующей на единичный отрезок проводника, расположенного перпендикулярно линиям магнитной индукции, при силе тока в нём 1 А

$$\vec{B} = \frac{\vec{F}}{I},$$

где l – длина проводника; I – сила тока в проводнике; \vec{F} – сила, с которой магнитное поле действует на проводник с током.

В СИ единица магнитной индукции – *тесла* (1 Тл).

1Тл – это магнитная индукция однородного поля, в котором на каждый метр длины прямолинейного проводника с током 1 А действует максимальная сила 1 Н

Для магнитных полей справедлив **принцип суперпозиции**:

магнитная индукция \vec{B} результирующего поля, создаваемого несколькими токами, равна векторной сумме индукций \vec{B}_i полей каждого из токов в отдельности

$$\vec{B} = \sum_{i=1}^n \vec{B}_i.$$

Магнитное поле изображают при помощи линий магнитной индукции (силовых линий магнитного поля).

Линии магнитной индукции – это непрерывные линии, касательные к которым в каждой точке совпадают с направлением вектора магнитной индукции в этой точке.

На рис. 3.1–3.2 изображены линии магнитной индукции для прямого проводника с током и постоянного полосового магнита.

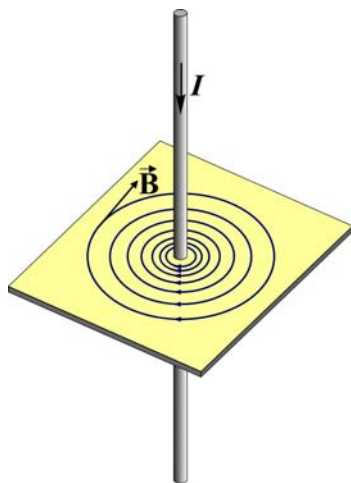


Рис. 3.1. Магнитное поле прямолинейного тока

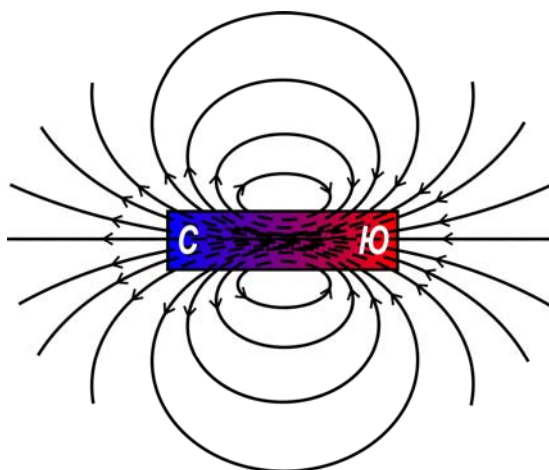


Рис. 3.2. Магнитное поле постоянного магнита

Направление линий магнитной индукции вокруг проводника с током определяют *по правилу буравчика*. У магнита линии индукции выходят из северного полюса и входят в южный.

Свойства линий магнитной индукции:

линии магнитной индукции всегда замкнуты: они не имеют начала и конца. Это означает, что

1) *магнитное поле* (в отличие от электрического) *не имеет источников: магнитных зарядов* (подобных электрическим) *не существует*;

2) *магнитное поле является вихревым, т. е. полем с замкнутыми линиями магнитной индукции*;

☑ плотность линий пропорциональна модулю магнитной индукции поля.

Линии магнитной индукции можно «проявить» с помощью игольчатых железных опилок, намагничивающихся в исследуемом поле и ведущих себя подобно маленьким магнитным стрелкам в магнитном поле. Они выстраиваются вдоль силовых линий магнитной индукции.

Индукция магнитного поля \vec{B} (при прочих одинаковых условиях) зависит от свойств среды. Индукция \vec{B} в среде (веществе) и индукция \vec{B}_0 в вакууме связаны соотношением

$$\vec{B} = \mu \vec{B}_0,$$

где μ – безразмерная величина, характеризующая магнитные свойства среды. Она называется **магнитной проницаемостью среды** и определяется по формуле

$$\mu = \frac{B}{B_0}.$$

Для характеристики магнитного поля независимо от среды (т.е. в любой среде) вводится величина, называемая **напряженностью \vec{H} магнитного поля**

$$\vec{H} = \frac{\vec{B}}{\mu_0 \mu},$$

где μ_0 – магнитная постоянная $\left(\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{\text{Н}}{\text{А}^2} \right)$.

Величина \vec{H} не зависит от свойств среды и определяется только значениями и расположением токов, создающих магнитное поле. Единица напряженности – *ампер на метр* (1 А/м).

В 1600 г. **Уильям Гильберт**, натурфилософ и врач английской королевы Елизаветы I, предположил, что Земля является гигантским естественным магнитом, а концы стрелки компаса указывают направление к его полюсам. Гильберт подтвердил свое предположение **на опыте**: он выточил из естественного магнита большой шар и, приближая к поверхности шара магнитную стрелку, показал, что она всегда устанавливается так же, как стрелка компаса на Земле.

Магнитное поле Земли (*геомагнитное поле*) обнаруживается в окружающем Землю пространстве и на её поверхности. Линии индукции магнитного поля Земли изображены на рис. 3.3. Они имеют тороидальную форму (т.е. форму бублика), выходят из Северного магнитного полюса и входят в Южный магнитный полюс. На расстоянии от поверхности Земли, большем 6500 км, геомагнитное поле подобно полю магнитного диполя,

полюсы которого не совпадают с географическими полюсами Земли. В настоящее время ось этого диполя образует с осью вращения Земли угол $\alpha = 11,5^\circ$.

Северный магнитный полюс N находится около южного географического полюса S_r в точке с угловыми координатами 68° южной широты и 140° восточной долготы вблизи берегов Антарктиды, а Южный магнитный полюс S – вблизи северного географического полюса N_r в Арктическом архипелаге Канады с координатами 75° северной широты и 259° восточной долготы.

Причина земного магнетизма до конца не выяснена.

Существующие в настоящее время гипотезы происхождения магнитного поля Земли можно разбить на две группы:

1. Гипотезы, объясняющие наличие магнитного поля электрическими токами, циркулирующими на больших глубинах в жидком ядре Земли.
2. Гипотезы, основанные на предположении, что земная кора содержит в разных своих участках различное количество магнитных пород.

Вектор индукции магнитного поля Земли \vec{B}_3 можно представить в виде суммы двух векторов: горизонтальной составляющей \vec{B}_r и вертикальной составляющей \vec{B}_v

$$\vec{B}_3 = \vec{B}_r + \vec{B}_v.$$

Угол между векторами \vec{B}_r и \vec{B}_3 называется **магнитным наклоением**.

Магнитное поле Земли весьма слабое. Величина его магнитной индукции B_3 невелика и зависит от широты места: наибольшее значение индукции (68 мкТл) достигается вблизи северного магнитного полюса (в Антарктиде), наименьшее (34 мкТл) – в Бразилии. (В справочниках часто приводится величина напряжённости магнитного поля, изменение которой составляет соответственно от $54,1$ до 27 А/м .) Среднее значение индукции магнитного поля у поверхности Земли составляет $\sim 51 \text{ мкТл}$.

На земном шаре существуют *области магнитных аномалий*, где индукция магнитного поля может превышать среднее значение в 2–3 раза. Обычно сильные магнитные аномалии связываются с залежами магнетито-

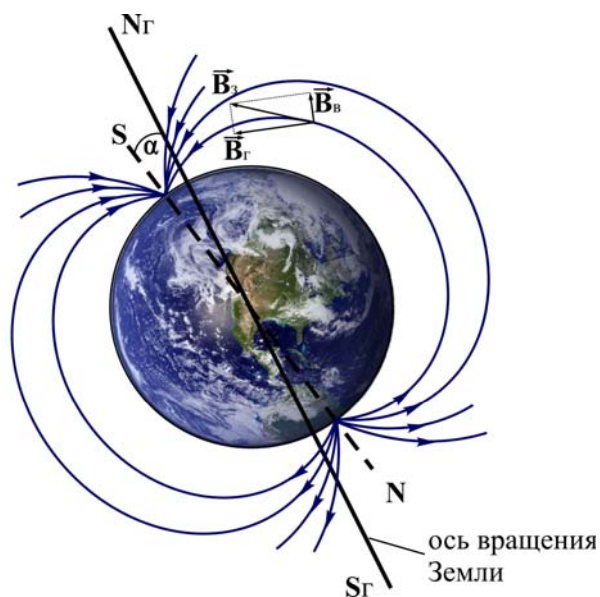


Рис. 3.3. Линии индукции магнитного поля Земли

вых (FeO , Fe_2O_3) и титаномагнетитовых (примеси TiO_2) руд, а также других пород, обогащенных магнетитом, и пирроксидовыми (FeS) месторождениями. К таким аномалиям относятся Кольские аномалии, аномалии в Кривом Роге, на Урале и др. Наиболее сильной является Курская магнитная аномалия (КМА). В районе КМА индукция магнитного поля Земли достигает 200 мкТл. Из-за малых размеров местные аномалии практически не сказываются на глобальном распределении поля.

Свободно подвешенная магнитная стрелка устанавливается по касательной к силовой линии магнитного поля Земли, то есть вдоль вектора магнитной индукции в данной точке. При этом стрелка отклоняется от горизонтальной плоскости, причем в северном полушарии в сторону Земли отклоняется её северный полюс, в южном полушарии – южный полюс. Угол наклона стрелки к плоскости горизонта увеличивается при переходе от экватора к полюсам. *На экваторе стрелка устанавливается горизонтально, а у магнитных полюсов – вертикально вниз противоположным полюсом.*

Плоскость, проходящая через силовую линию магнитного поля и магнитные полюса, называется **плоскостью магнитного меридиана**. Линия пересечения этой плоскостью поверхности Земли называется **магнитным меридианом**. Магнитный меридиан не совпадает с географическим меридианом; угол между ними называется **магнитным склонением**. Существуют карты линий равных величин магнитных склонений (изогоны). За счет разной угловой скорости вращения ядра и мантии Земли изогоны медленно, со скоростью 19–24 км в год, смещаются в западном направлении (западный дрейф). Все изогоны сходятся в магнитных полюсах.

Магнитные полюса Земли не остаются на месте, а перемещаются – прецессируют по сложной траектории вокруг географических полюсов. При этом индукция магнитного поля Земли испытывает периодические колебания: а) суточные; б) годовые; в) вековые.

Изучение остаточной намагниченности древних пород показало, что имеются и более длительные периоды колебаний индукции геомагнитного поля. Так, существует цикл в 8000 лет, за время которого индукция поля меняется 2–3 раза. Но наиболее интересными и важными по последствиям являются *периоды инверсии* ~ 10 млн лет (*инверсия* от лат. inversion – переворачивание, перестановка). За этот промежуток времени происходит смена магнитных полюсов – северный полюс становится южным, и наоборот. Последнее такое изменение произошло около 700 тысяч лет назад.

На расстояниях, больших 6500 км от поверхности Земли, на геомагнитное поле заметно влияет Солнце, особенно в период своей активности. Под влиянием магнитного поля Солнца и солнечного ветра (т.е. потоков солнечной радиации) геомагнитное поле Земли на стороне, обращенной к Солнцу, сжато, а на противоположной – ночной стороне – вытянуто в виде

узкого «горлышка» (рис. 3.4). Область, в которой сосредоточено магнитное поле Земли, называется **магнитосферой**. К Солнцу она простирается на 70–80 тысяч километров, от него – на многие миллионы километров. Среднее значение индукции магнитного поля на границе магнитосферы $\sim 0,013$ мкТл.

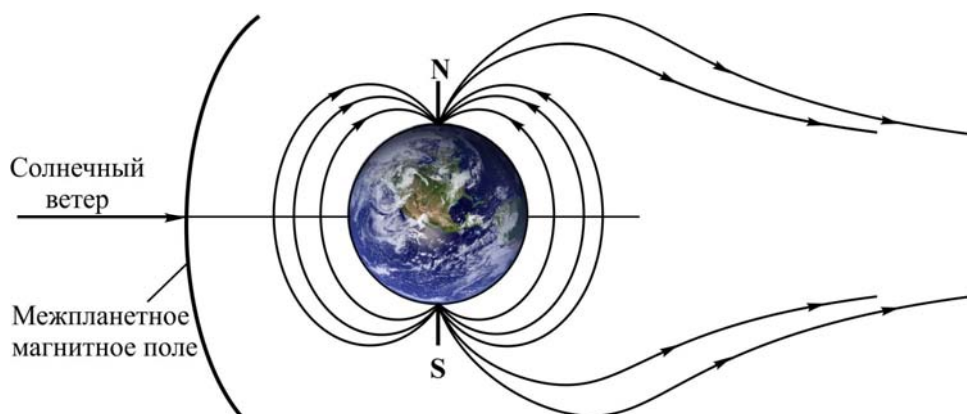


Рис. 3.4. Магнитосфера Земли

В магнитосферу Земли вторгается множество заряженных частиц, выбрасываемых Солнцем и образующих так называемый «солнечный ветер». Это в основном протоны и электроны, мчащиеся со скоростью около 500 км/с. На расстояниях примерно от 500 до 60000 км они движутся, навиваясь на линии индукции магнитного поля Земли, совершая колебания от одного полюса к другому за 0,1–1 с. Эта область космоса называется **радиационным поясом Земли**. Магнитное поле Земли удерживает в радиационном поясе захваченные частицы солнечного ветра, не позволяя им проходить в атмосферу Земли и тем более приближаться к её поверхности. Оно является своеобразным щитом, оберегающим нас и весь органический мир. Не будь у Земли магнитного поля, защищающего её от солнечной радиации, наша планета превратилась бы в выжженную пустыню, а живые существа погибли бы.

Примерно один раз каждые 11,5 лет солнечная активность возрастает настолько, что потоки солнечной плазмы из активных областей Солнца, накладывающиеся на солнечный ветер, вызывают быстрое и сильное изменение магнитного поля Земли, называемое **магнитной бурей**. Магнитные бури – явление кратковременное. Они продолжаются от нескольких часов до нескольких суток и наблюдаются одновременно на всей Земле. Особенно сильным и зрелищным эффектом, сопровождающим магнитную бурю, является *полярное сияние*. Полярные сияния разной формы и окраски возникают на высоте 80–1000 км. Их образование связано с тем, что в полярных областях частицы, двигаясь вдоль линий индукции магнитного поля, которые там почти перпендикулярны поверхности Земли,

попадают в нижние слои атмосферы. При этом цветовые оттенки полярного сияния обусловлены свечением различных газов, входящих в состав атмосферы.

Во время магнитных бурь происходит нарушение радиосвязи, систем навигации космических кораблей, возникновение поверхностных зарядов на трансформаторах и трубопроводах и даже разрушение энергетических систем.

Магнитные бури влияют и на здоровье человека. У истоков изучения этого явления стоял наш выдающийся соотечественник – биолог **Александр Леонидович Чижевский** (1897–1964 гг.). В своем труде «Физические факторы исторического процесса» он утверждал, что происходящие на Земле природные «буйства» (землетрясения, извержения вулканов и др.) и многие социальные события (эпидемии, войны, голодные моры) в значительной степени зависят от 11-летнего цикла солнечной активности и солнечных бурь, вызывающих на Земле бури магнитные. В беседах с Константином Эдуардовичем Циолковским он доказывал, что магнитные бури влияют на состояние нервной системы, которая является их своеобразным «приёмником». Исследования показали, что реакция организма человека на магнитные бури зависит от его возраста, пола, реактивности нервной системы и состояния здоровья. У людей пожилого возраста во время магнитных бурь учащается пульс и повышается артериальное давление. Магнитные бури могут вызвать не только временные сбои в ритме сердцебиений, но и полную остановку сердца. Было отмечено также, что мужчины более подвержены воздействию магнитных бурь, чем женщины. В магнитоактивные дни инфаркты миокарда случаются на 4,5 % чаще, чем в магнитоспокойные дни.

Причина геомагнитного воздействия на живые организмы состоит в следующем. Известно, что магнитное поле действует на движущиеся электрические заряды, электрические токи, магниты. В биологических системах, в том числе в организме человека, существуют упорядоченные движения электрических зарядов (электронов и ионов), определяющие все основные процессы жизнедеятельности клеток. Кроме токов и зарядов, в живом организме имеются маленькие «магнитики». Это молекулы различных веществ, прежде всего воды. Магниты взаимодействуют. Именно поэтому меняющееся магнитное поле вызывает переориентацию маленьких «магнитиков» в организме, располагая их иначе, чем прежде. Отклоняясь от обычного направления, они перестают нормально выполнять свои функции, отчего начинает страдать весь организм. В организме человека возникают дополнительно к существующим в нём биотокам иные электрические токи, что ещё больше нарушает его нормальную жизнедеятельность. Чижевский считал, что физика может помочь оградить человека от такого рода вредных влияний природной среды. По его мнению, в роли спасателя выступает металл. Ученый

предлагал помещать больных на период магнитных бурь в экранированные металлом палаты. В реальных же условиях люди в периоды магнитных бурь остаются незащищёнными. Поэтому большое значение имеют заблаговременные прогнозы магнитоактивных дней: люди могут заранее принять лекарства.

Исследования показали, что магнитные поля есть и у других планет Солнечной системы. Самыми сильными магнитными полями обладают планеты-гиганты и Земля.

В 1972 г. магнитометрами советских автоматических межпланетных станций (АМС) «Марс-2» и «Марс-3» было обнаружено магнитное поле **Марса**. Характеристики этого поля в разных местах планеты были получены с помощью советских автоматических межпланетных станций (АМС) «Марс-5» (1974 г.) и «Фобос-2» (1989 г.). Оказалось, что магнитное поле Марса направлено подобно земному магнитному полю – Северный магнитный полюс находится в южном полушарии планеты. Магнитное поле Марса очень слабое – его едва хватает на то, чтобы остановить поток солнечного ветра. Величина индукции магнитного поля Марса в 800 раз меньше, чем у геомагнитного поля.

Единственной планетой, существование магнитосферы которой было предсказано на основе наземных радиоастрономических наблюдений, оказался **Юпитер**. Анализ мощности и поляризации радиоизлучения, распределения яркости источника позволил не только предсказать сам факт наличия магнитного поля, но и оценить его величину, а также получить информацию о радиационном поясе Юпитера. Полёты американских аппаратов «Пионер-10» (1973 г.) и «Пионер-11» (1974 г.) расширили представления о магнитосфере этой планеты. Оказалось, что Юпитер обладает мощным магнитным полем – его магнитный момент в 50 000 раз превосходит магнитный момент Земли, а граница магнитосферы находится на расстоянии около 7 млн км от поверхности планеты.

В 1974 г. при помощи американской АМС «Маринер-10» была открыта магнитосфера **Меркурия**. Магнитное поле Меркурия оказалось весьма слабым – его индукция на поверхности планеты почти в 100 раз меньше, чем на поверхности Земли, а расстояние, на которое простирается магнитосфера Меркурия, составляет лишь около 2,5 тысячи километров. Этого поля едва достаточно, чтобы влиять на поток солнечного излучения.

Следующая за Меркурием **Венера** не располагает сколько-нибудь заметным магнитным полем. Это стало ясно после многочисленных исследований планеты аппаратами серий «Венера» и «Маринер». Однако у Венеры имеется довольно плотная ионосфера, чьё взаимодействие с электрическим полем межпланетного пространства и солнечным ветром создает эффект наведённой магнитосферы.

Не вызывает сомнений и наличие магнитного поля у **Сатурна** – доказательством тому стали данные, полученные в 1979 году в ходе

исследований, проведённых с помощью аппарата «Пионер-11» (1979 г.). Магнитное поле, замеренное над облачным поясом Сатурна, почти не отличается от магнитного поля на поверхности Земли. Ось вращения Сатурна практически совпадает с его магнитной осью, а форма магнитосферы этой планеты-гиганта обнаруживает гораздо большее сходство с земной, нежели юпитерианской.

Магнитное поле **Урана** удалось обнаружить с помощью аппарата «Вояджер-2» (США, запущен в 1977 г.), приборы которого зафиксировали крайнюю его переменчивость. Магнитная ось Урана наклонена к оси его вращения более чем на 55° (это больше, чем у любой другой планеты Солнечной системы). Индукция его магнитного поля достаточно близка к земной, а вот полярность – обратная. Магнитосфера Урана по мере удаления от планеты закручивается в длинную спираль.

Восьмая по удаленности от Солнца планета **Нептун** также обладает магнитным полем, обнаруженным приборами «Вояджера-2». Оно по некоторым параметрам схоже с урановым, в частности, наклон его магнитной оси к оси вращения составляет 47° . Магнитосфера Нептуна сильно вытянута. Данных по наличию магнитного поля у самой удаленной от Солнца планеты – **Плутона** – пока не существует.

Спутник Земли – **Луна** – не имеет ни магнитного поля, ни магнитосферы, способной противостоять солнечному ветру. Лунные поверхностные слои обладают весьма низкой электропроводностью, а потому в них не удалось обнаружить и магнитных явлений, связанных с протеканием электрических токов через тело нашего спутника. Тем не менее, магнитометры, оставленные экипажами «Аполлонов», так же, как и приборы, размещенные на борту «Луноходов», обнаружили небольшие участки Луны, обладающие высокой магнитной активностью. Такие локальные магнитные явления связаны с вкраплениями в тело Луны намагниченных или хорошо проводящих масс.

2. ОПИСАНИЕ МЕТОДИКИ ИЗМЕРЕНИЙ

В данной лабораторной работе изучается суперпозиция горизонтальной составляющей магнитного поля Земли и магнитного поля катушки с током.

Индукцию и напряжённость магнитного поля в центре O кругового витка радиусом R , по которому протекает ток I (рис. 3.5), можно рассчитать по **закону Био – Савара – Лапласа**. Магнитная индукция $d\vec{B}$ поля, создаваемого в точке O элементом $d\vec{l}$ витка с током, равна

$$d\vec{B} = \frac{\mu_0 \mu}{4\pi} \frac{I [d\vec{l}, \vec{r}]}{r^3}, \quad (3.1)$$

или в скалярном виде

$$dB = \frac{\mu_0 \mu}{4\pi} \frac{Idl}{r^2} \sin \alpha, \quad (3.2)$$

где μ_0 – магнитная постоянная, \vec{r} – радиус-вектор, проведенный от элемента длины проводника до исследуемой точки, r – величина радиус-вектора, α – угол между направлением тока и радиус-вектором \vec{r} .

В рассматриваемом примере радиус-вектор \vec{r} перпендикулярен к элементу тока dl , а по модулю равен радиусу витка, так что $\sin \alpha = 1$ и $r = R$.

Поэтому

$$dB = \frac{\mu_0 \mu}{4\pi} \frac{Idl}{R^2}. \quad (3.3)$$

Все векторы $d\vec{B}$ магнитных полей, создаваемых в точке O различными участками $d\vec{l}$ кругового витка с током, направлены перпендикулярно к плоскости чертежа «от нас». Поэтому индукция результирующего поля в точке O равна

$$B = \int dB = \int_0^{2\pi R} \frac{\mu_0 \mu}{4\pi} \frac{I}{R^2} dl = \frac{\mu_0 \mu}{2R} I. \quad (3.4)$$

Напряженность магнитного поля в центре кругового витка с током равна

$$H = \frac{B}{\mu_0 \mu} = \frac{I}{2R}. \quad (3.5)$$

Для катушки

$$B_k = \frac{\mu_0}{2} \frac{IN}{R}, \quad (3.6)$$

$$H_k = \frac{IN}{2R}, \quad (3.7)$$

где N – число витков; R – радиус катушки; I – сила тока в катушке.

Для регистрации направления магнитного поля будем использовать магнитную стрелку, помещённую в центр катушки. Если установить катушку так, чтобы магнитная стрелка находилась в её плоскости, то при пропускании тока через катушку на стрелку будут действовать магнитное поле Земли и перпендикулярное ему магнитное поле катушки. Стрелка установится вдоль силовой линии результирующего поля (рис.3.6).

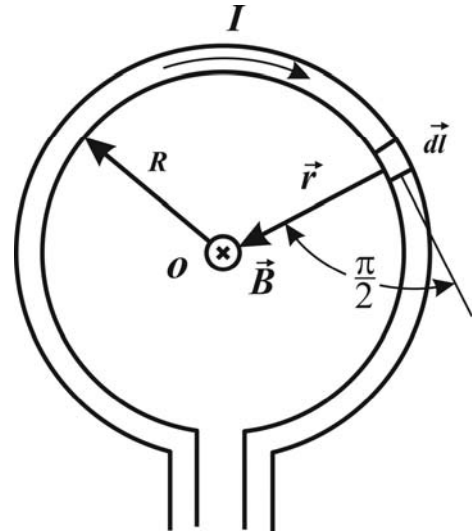


Рис. 3.5. Круговой виток с током

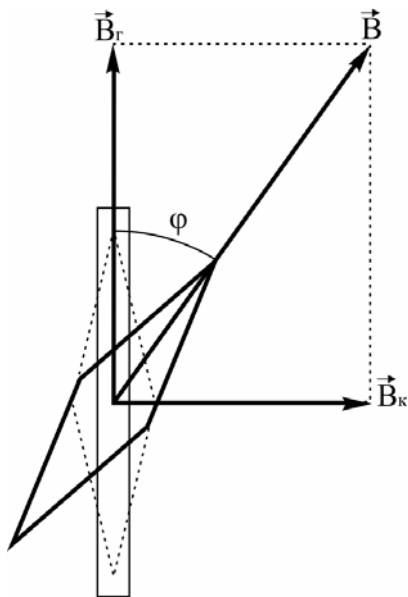


Рис. 3.6. Отклонение магнитной стрелки под действием магнитных полей Земли и катушки с током

Если сориентировать катушку так, чтобы магнитная стрелка находилась в плоскости катушки при отсутствии тока в ней, то горизонтальная составляющая магнитного поля Земли будет направлена вдоль диаметра катушки. При подключении катушки к источнику постоянного тока и увеличении тока в ней от 0 и выше, магнитная стрелка будет отклоняться от первоначального положения. При повороте стрелки на угол 45° индукция магнитного поля кругового тока и горизонтальная составляющая индукции магнитного поля Земли будут равны по модулю. Зная значение силы тока в катушке при этом положении стрелки (45°), можно определить значение горизонтальной составляющей индукции магнитного поля Земли по формуле (3.6).

3. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

Для определения горизонтальной составляющей магнитного поля Земли используется установка ЛКЭ-1П, функциональная схема которой приведена на рис.3.7.

Установка состоит из вертикально установленной катушки А, внутри которой помещена магнитная стрелка. При включении цепи через катушку проходит ток, величина которого регулируется потенциометром и регистрируется миллиамперметром М.

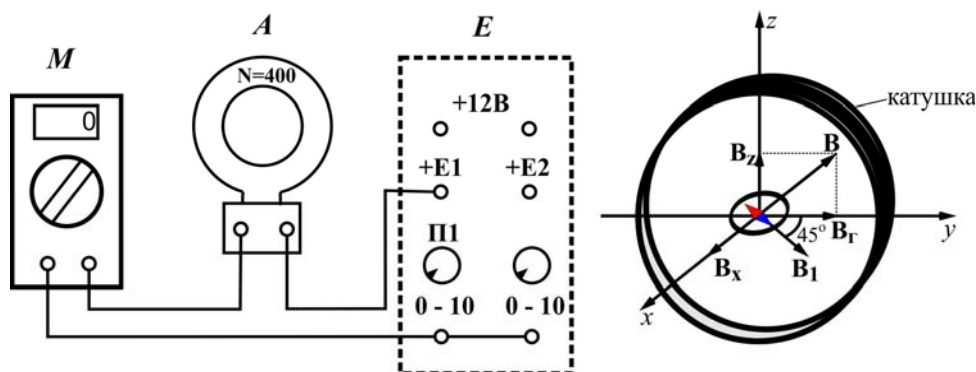


Рис. 3.7. Функциональная схема установки ЛКЭ-1П

1. Убедитесь, что катушка А с числом витков $N=400$ находится на столе установки, и собрана электрическая цепь (рис. 3.7). Мультиметр М включен в режиме измерения постоянного тока с диапазоном 0-20 мА.

2. Установите внутри катушки съемный столик-пластинку. На центр столика положите компас.

3. Сориентируйте катушку так, чтобы стрелка компаса оказалась в плоскости катушки.

4. Регулируя потенциометром Π_1 (см. блок Е) силу тока в катушке, добейтесь отклонения стрелки компаса на 45° . Запишите значение силы тока в таблицу при этом положении стрелки.

5. Повторите пункты 2–4 три раза.

6. Вычислите среднее значение силы тока.

7. Подставив в формулу (3.6) среднее значение силы тока, вычислите величину горизонтальной составляющей индукции магнитного поля Земли. Результаты измерений и вычислений занесите в табл. 3.1.

Таблица 3.1

| № измерения | I, А | $\langle I \rangle$, А | N | R, м | μ_0 , Гн/м | B, Тл |
|-------------|------|-------------------------|-----|-------|-----------------------|-------|
| 1 | | | | | | |
| 2 | | | 400 | 0,035 | $12,56 \cdot 10^{-7}$ | |
| 3 | | | | | | |

Контрольные вопросы

1. Чем обусловлено существование магнитного поля?
2. Что называют индукцией магнитного поля? В каких единицах измеряется магнитная индукция?
3. Сформулируйте принцип суперпозиции для магнитных полей.
4. Дайте определение линий магнитной индукции. В чем состоит характерная особенность линий магнитной индукции?
5. Как определяется магнитная проницаемость среды?
6. Дайте понятие напряженности магнитного поля. В каких единицах измеряется напряженность магнитного поля?
7. Изобразите магнитное поле Земли. Что такое магнитный полюс Земли? Где находятся магнитные полюсы Земли? Как ведёт себя магнитная стрелка компаса на магнитном полюсе Земли? Отличается ли магнитный полюс Земли от географического полюса?
8. Каковы причины земного магнетизма? Как изменяется геомагнитное поле с течением времени?
9. Что такое магнитное наклонение и магнитное склонение?
10. Как зависит величина индукции магнитного поля Земли от широты места? Что такое области магнитной аномалии?
11. Чем объясняется появление магнитных бурь? Как влияют магнитные бури на здоровье человека?
12. Сформулируйте закон Био – Савара – Лапласа.
13. Выведите формулу для расчёта горизонтальной составляющей индукции магнитного поля Земли.
14. Объясните методику измерения и принцип действия лабораторной установки.

3. КВАНТОВО-ПОЛЕВАЯ КАРТИНА МИРА

Квантово-полевая картина мира (XX в.) формируется на основе:

- квантовой гипотезы немецкого физика Макса Планка (1858–1947 гг.);
- волновой механики австрийского физика-теоретика Эрвина Шрёдингера (1887–1961 гг.);
- квантовой механики немецкого физика-теоретика Вернера Гейзенберга (1901–1976 гг.);
- квантовой теории атома датского физика Нильса Бора (1885–1962 гг.).

В рамках КПКМ сложились квантово-полевые представления о материи:

- **материя** обладает корпускулярными и волновыми свойствами, т.е. каждый элемент материи имеет свойства частицы и волны;
- **движение** становится лишь частным случаем физического взаимодействия;
- **пространство и время** – относительны, зависимы от материи и друг от друга, образуя единый четырёхмерный пространственно-временной континуум.

3.1. Основные идеи и гипотезы квантово-полевой картины мира

Основополагающим идеям КПКМ являются:

- 1) идея квантования физических величин;
- 2) идея корпускулярно-волнового дуализма.

3.1.1. Формирование идеи квантования физических величин

Сущность идеи квантования состоит в том, что *некоторые физические величины, относящиеся к микрообъекту, могут в соответствующих условиях принимать только вполне определенные, дискретные значения*. Такие величины называются **квантованными**. Например, квантуется энергия электромагнитного излучения определенной частоты, а также энергия любого микрообъекта, находящегося в связанном состоянии, например энергия электрона в атоме. Энергия же свободно движущегося микрообъекта не квантуется.

Другими примерами квантованных величин являются заряд, момент импульса, спин.

Сама идея квантования сформировалась на основе ряда открытий в конце XIX – начале XX вв. К ним относятся:

- 1) открытие электрона;
- 2) исследование теплового излучения.

3.1.1.1. Открытие электрона

Представление о том, что электрический заряд любого тела представляет собой сумму одних и тех же элементарных зарядов, возникло ещё в начале XIX века и поддерживалось такими известными физиками, как **Майкл Фарадей** (1791–1867 гг.) и **Герман Гельмгольц** (1821–1923 гг.).

В 1891 г. английский учёный **Джордж Стоуни** (1826–1911 гг.) ввёл термин «электрон», обозначающий некую частицу – носитель элементарного электрического заряда. В 1881 г. он теоретически вычислил числовое значение заряда электрона. Однако термин «электрон» был в то время чисто формальным, поскольку ни сама частица, ни связанный с ней элементарный электрический заряд не были обнаружены экспериментально. В 1895 году немецкий физик **Вильгельм Рентген** (1845–1923 гг.) во время экспериментов с разрядной трубкой обнаружил, что её анод под действием летящих из нагретого катода лучей способен излучать свои так называемые X-лучи. В том же году французский физик **Жан Перрен** (1870–1942 гг.) экспериментально доказал, что катодные лучи представляют собой поток заряженных частиц. Но несмотря на колоссальный экспериментальный материал, до 1897 г. электрон оставался гипотетической частицей, поскольку не было поставлено ни одного опыта, в котором участвовали бы отдельные электроны.

В 1897 году английский физик **Джозеф Томсон** (1856–1940 гг.) провёл серию экспериментов по исследованию отклонения катодных лучей в электрических и магнитных полях. В своих опытах он использовал усовершенствованную катодно-лучевую трубку, конструкция которой была дополнена электрическими катушками, создававшими магнитное поле, и набором параллельных электрических конденсаторных пластин, создававших электрическое поле (рис. 3.1).

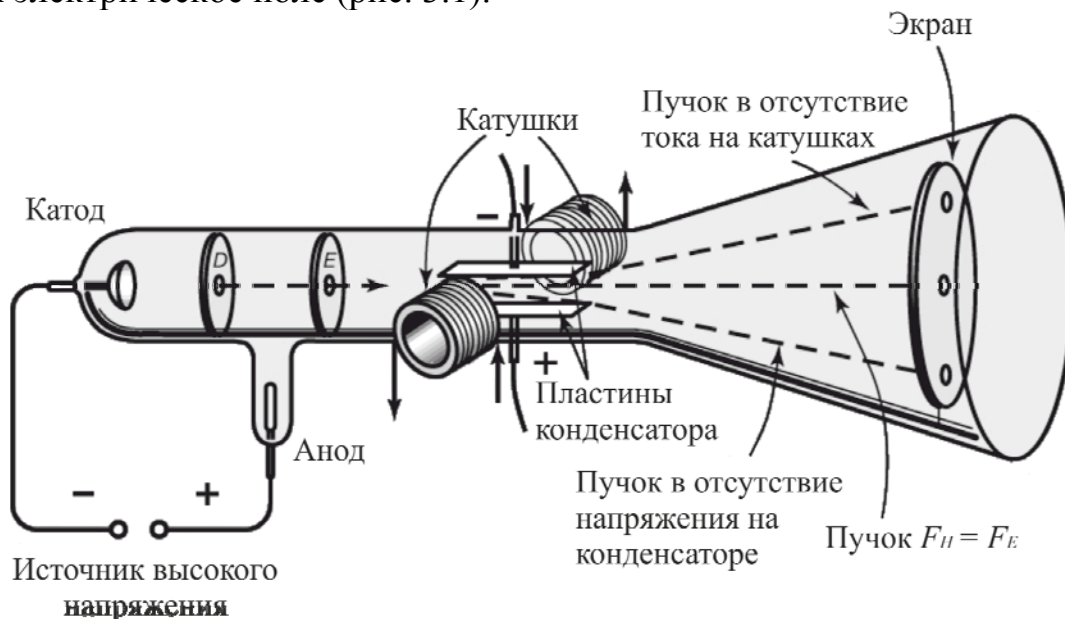


Рис. 3.1. Установка Томсона

Томсон обнаружил, что:

1) катодные лучи отклоняются в магнитном поле в отсутствие электрического поля;

2) также катодные лучи отклоняются в электрическом поле в отсутствие магнитного поля;

3) при одновременном действии электрического и магнитного полей сбалансированной интенсивности, ориентированных в направлениях, вызывающих по отдельности отклонения в противоположные стороны, катодные лучи распространяются прямолинейно, то есть действие двух полей взаимно уравнивается.

Он выяснил, что соотношение между электрическим и магнитным полями, при котором их действие уравнивается, зависит от скорости, с которой движутся частицы в катодных лучах. Проведя ряд измерений, Томсон определил скорость распространения катодных лучей. Оказалось, что она значительно меньше скорости света. Из этого следовало, что катодные лучи могут быть только частицами, поскольку любое электромагнитное излучение, включая свет, в вакууме распространяется со скоростью света. Томсон доказал, что все частицы, образующие катодные лучи, тождественны друг другу и входят в состав вещества. Эти частицы он сначала назвал «корпускулами», но вскоре они стали называться «электронами». За открытие электрона Томсон в 1906 году получил Нобелевскую премию по физике.

После открытия электрона встал вопрос об изучении и измерении его свойств. Отклонение пучка электронов в электрическом и магнитном полях свидетельствовало о том, что одним из основных свойств электрона является электрический заряд.

Первое прямое измерение величины заряда электрона было выполнено в опытах американского физика-экспериментатора **Роберта Милликена** (1868–1953 гг.), проведённых в 1908–1916 гг. На рис. 3.2 приведена схема одной из установок Милликена.

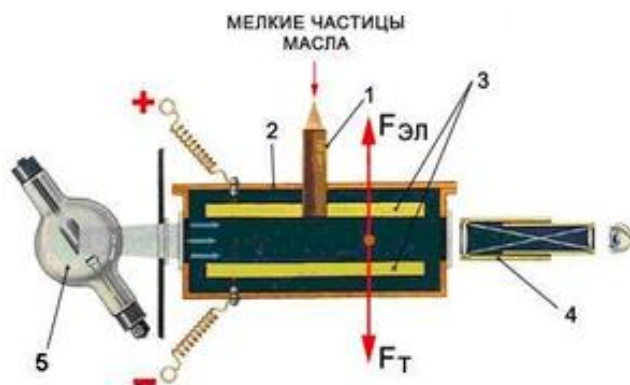


Рис. 3.2. Экспериментальная установка опытов Р. Милликена:
1 — распылитель; 2 — камера; 3 — заряженные металлические пластины конденсатора; 4 — микроскоп; 5 — устройство для получения рентгеновского излучения

Милликен измерял электрический заряд, сосредоточенный на отдельных мельчайших каплях масла, которые формировались распылителем и приобретали заряд электризацией – трением о стенки распылителя. Через малое отверстие в верхней пластине плоского конденсатора они попадали в пространство между пластинами. За движением капли он наблюдал в микроскоп.

Если пластины конденсатора не были заряжены (напряжённость электрического поля в конденсаторе $\vec{E} = 0$), то капли медленно падали, двигаясь от верхней пластины к нижней. Как только пластины конденсатора заряжались, в движении капель происходили изменения: в случае отрицательного заряда на каплях и положительного на верхней пластине конденсатора вследствие постепенного испарения падение капель замедлялось, и они на довольно долгое время становились неподвижными. Затем поле начинало преобладать и капли меняли направление движения на противоположное, т.е. начинали медленно подниматься к верхней пластине. По мере приближения к верхней пластине скорость капель быстро увеличивалась.

Заряд электрона Милликен вычислил исходя из следующих соображений: *скорость движения капли пропорциональна действующей на неё силе и не зависит от заряда капли.*

Если капля падает между пластинами конденсатора только под действием силы тяжести ($F_m = mg$), то её скорость

$$v_1 = kmg. \quad (1)$$

При включении поля, в случае, когда величина электрической силы ($F_{эл} = qE$) превышает величину силы тяжести, скорость капли равна

$$v_2 = k(qE - mg). \quad (2)$$

Разделив равенство (1) на (2), получим

$$\frac{v_1}{v_2} = \frac{mg}{qE - mg}. \quad (3)$$

Откуда заряд капли равен

$$q = \frac{mg(v_1 + v_2)}{Ev_1}. \quad (4)$$

Освещением рентгеновскими лучами можно было слегка ионизировать воздух между пластинами конденсатора и изменять заряды капель.

При изменении заряда капли до величины q' скорость её движения тоже изменялась до величины v_2' :

$$q' = \frac{mg(v_1 + v_2')}{Ev_1}. \quad (5)$$

Изменение заряда капли Δq составляло

$$\Delta q = q' - q = \frac{mg(v'_2 - v_2)}{Ev_1}. \quad (6)$$

Из формулы (6) видно, что изменение заряда капли пропорционально разности скоростей $(v'_2 - v_2)$, т.е. изменению скорости капли вследствие ионизации воздуха.

Таким образом, измерение элементарного заряда было сведено к измерению пути, пройденного каплей, и времени, за которое этот путь был пройден, и расчёту величин скоростей v_1 , v_2 , и v'_2 .

Выполнив расчёты, Милликен установил, что заряд капли может изменяться только скачками на величину, равную e , $2e$, $3e$, $4e$ и т.д.

Ему удалось измерить минимальную «порцию» электрического заряда – элементарный электрический заряд, равный $e = 1,592 \cdot 10^{-19}$ Кл. В настоящее время заряд электрона измерен с очень высокой точностью и составляет $1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл. Опыты Милликена доказали, что заряд *дискретен*, а равенство $q = ne$ (где n – целое число; e – заряд электрона) представляет собой *форму квантования электрического заряда*.

3.1.1.2. Исследование теплового излучения

Известно, что все тела, независимо от их химического состава при любой температуре являются источниками электромагнитного (теплового) излучения. Распределение энергии в спектре излучения тела характери-

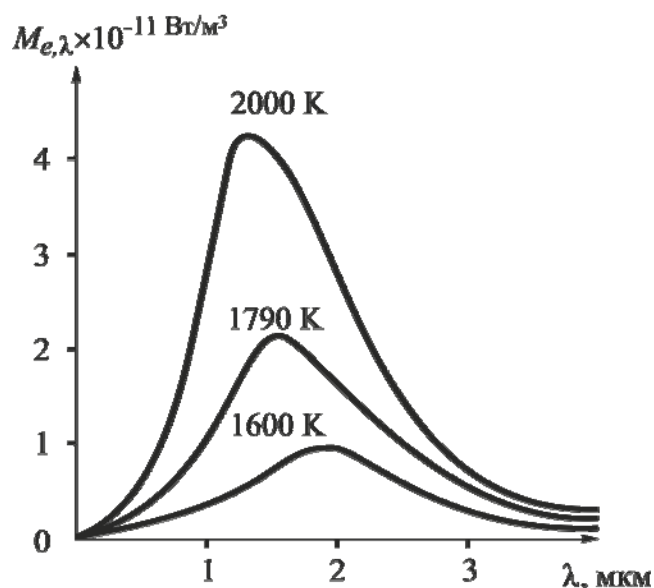


Рис. 3.3. Кривые спектральной плотности энергетической светимости при различной температуре излучающего тела

зуют спектральной плотностью энергетической светимости $M_{e,\lambda}$.

Эта величина зависит от длины волны излучения λ и термодинамической температуры тела T . Для **абсолютно чёрного тела** (полностью поглощающего всю энергию падающего на него излучения) зависимость $M_{e,\lambda}^0$ от λ и T отображается спектральными кривыми, показанными на рис. 3.3.

Анализ зависимости спектральной плотности энергетической светимости $M_{e,\lambda}^0$ от температуры для абсолютно чёрного тела показывает, что с увеличением температуры тела растет общая

мощность его излучения, пропорциональная площади, ограниченной кривой $M_e^0(\lambda, T)$ (**закон Стефана – Больцмана**).

Кроме того, энергия излучения тела распределена по его спектру неравномерно. Абсолютно чёрное тело почти не излучает в областях очень малых и очень больших длин волн. Все кривые имеют максимумы, причём с увеличением температуры максимум мощности излучения сдвигается в сторону малых длин волн. Такая зависимость была установлена экспериментально немецким физиком **Максом Вином** (1866–1938 гг.).

Законы излучения абсолютно чёрного тела (лаб. раб. №2) не позволили математически, т.е. при помощи уравнений, описать кривые распределения энергии в спектре излучения абсолютно чёрного тела (см. рис. 3.3). Более того, попытки описать экспериментальные кривые теоретически на основе классических представлений привели к абсурдному выводу о том, что полная мощность теплового излучения любого нагретого тела, а значит и его энергия должны быть бесконечно велики. Особенно ярко этот парадокс проявлялся в области коротких длин волн, поэтому получил название «ультрафиолетовой катастрофы».

Решение этой проблемы нашёл немецкий физик-теоретик **Макс Планк** (1858–1947 гг.).

В классической физике испускание света источником рассматривается как непрерывный процесс. Считается, что излучающее тело непрерывно посылает в пространство электромагнитные волны и энергия источника света непрерывно изменяется. Аналогично рассматривается и процесс поглощения света. Планк пришёл к выводу, что именно эти представления ведут к противоречиям в теории теплового излучения и должны быть пересмотрены.

В 1900 г. Планк выдвинул гипотезу, согласно которой *абсолютно чёрное тело испускает свет не непрерывно, а дискретно, т. е. определёнными конечными порциями энергии – квантами (квантовая гипотеза Планка)*

Квант в переводе с латинского *quantum* – означает «количество». Значение минимальной порции энергии – одного *кванта* – по теории Планка прямо пропорционально частоте излучения

$$\epsilon_\gamma = h\nu,$$

где ν – частота излучения; $h = 6,626 \cdot 10^{-34}$ Дж·с – постоянная Планка, входящая в основные уравнения квантовой теории (она является фундаментальной физической константой).

Согласно Планку излучающее тело всегда испускает энергию E , равную (для любой частоты) $n h \nu$, где n – любое целое положительное число.

Предположение о прерывистом (дискретном) характере испускания света позволило Планку получить выражение для функции $M_{e,\lambda}^0(\lambda, T)$, совпадающее с экспериментальными зависимостями.

$$M_{e,\lambda}^0 = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5 \left(e^{\frac{hc}{kT\lambda}} - 1 \right)}, \quad (7)$$

где c – скорость света в вакууме; h – постоянная Планка; k – постоянная Больцмана; T – абсолютная температура тела; λ – длина волны излучения.

Формула (7) хорошо согласуется с экспериментальными данными.

Тепловое излучение стало одним из первых явлений, которое удалось объяснить на основе квантовых представлений.

То, что свет имеет двойственную сущность, постепенно вошло в сознание физиков. Кванты стали так же реальны, как световые волны. Этому способствовал ряд экспериментальных результатов, которые получили естественное объяснение на основе подхода к свету как к потоку квантов. К числу явлений, открытых в ходе таких экспериментов, в первую очередь относятся фотоэффект и эффект Комптона.

3.1.1.3. Фотоэффект

Фотоэффект – это явление вырывания электронов из вещества под действием света.

Фотоэффект был открыт немецким физиком **Генрихом Герцем** (1857–1894 гг.). В 1887 г. Герц обнаружил, что если направить на отрицательный электрод искрового разрядника ультрафиолетовое излучение, то электрический разряд происходит при меньшем напряжении между электродами, чем в отсутствие освещения. Герцу не удалось дать правильного объяснения этому явлению. Опыты немецкого физика **Вильгельма Гальвакса** (1839–1896 гг.), итальянского учёного **Артура Риви** (1801–1873 гг.) и, в особенности, тщательные исследования русского учёного **Александра Григорьевича Столетова** (1839–1896 гг.) позволили понять сущность явления, обнаруженного Герцем. Явление фотоэффекта обусловлено выбиванием под действием света отрицательно заряженных частиц из металлического катода разрядника.

Опытным путём Столетов установил три закона фотоэффекта:

1. Число фотоэлектронов, вырываемых из вещества за 1 с (фототок насыщения), прямо пропорционально интенсивности падающего света.
2. Максимальная кинетическая энергия фотоэлектронов линейно зависит от частоты света и не зависит от его интенсивности.

3. Для каждого вещества существует минимальная частота света ν_{\min} , называемая красной границей фотоэффекта, ниже которой фотоэффект невозможен.

Кроме того, была установлена *практическая безынерционность фотоэффекта*: он сразу же возникает при освещении поверхности тела при условии, что частота падающего света больше красной границы фотоэффекта ($\nu > \nu_{\min}$).

Законы фотоэффекта не удалось объяснить на основе электромагнитной волновой теории света. С точки зрения этой теории электромагнитная волна, достигнув поверхности металла, вызывает вынужденные колебания электронов, отрывая их от металла. Но тогда требуется время для «раскачки» электронов, и при малой освещённости металла должно возникнуть заметное запаздывание между началом освещения и моментом вылета электронов. Далее, кинетическая энергия электронов, покидающих металл, должна зависеть от амплитуды вынуждающей силы и тем самым от напряжённости электрического поля в электромагнитной волне. Однако все эти выводы противоречат законам фотоэффекта.

Решение было найдено **Альбертом Эйнштейном** (1879–1955 гг.). Анализируя свойства электромагнитного излучения, Эйнштейн пришёл к выводу, что *сама электромагнитная волна состоит из отдельных порций – квантов*.

Идеи Эйнштейна представляют собой отход от классической волновой оптики. Распространение света он рассматривает не как непрерывный волновой процесс, а как поток особых частиц (квантов), движущихся со скоростью света в вакууме. Поглощение света состоит в том, что фотоны передают всю свою энергию атомам и молекулам вещества. Из этого следует, что поглощение света, как и его излучение, происходит *прерывно*, отдельными порциями.

В 1905 г. Эйнштейн разработал квантовую теорию фотоэффекта, которая объяснила все закономерности этого явления.

В 1916 г. Эйнштейн ввёл понятие «световых квантов» – фотонов.

Фотоны – это кванты электромагнитного излучения, каждый из которых обладает энергией $h\nu$ и распространяется со скоростью света c .

По теории Эйнштейна энергия $h\nu$ фотона, падающего на вещество, расходуется на работу A выхода электрона из вещества и на сообщение

электрону кинетической энергии $\frac{mv^2}{2}$.

$$h\nu = A + \frac{mv^2}{2}. \quad (8)$$

(8) – уравнение Эйнштейна для фотоэффекта.

3.1.1.4. Эффект Комптона

Экспериментальное подтверждение существования фотонов было получено в 1922 г. американским физиком **Артуром Комптоном** (1892–1962 гг.).

Эффект Комптона состоит в увеличении длины волны высокочастотного электромагнитного излучения при его рассеивании на свободном (или слабо связанном с атомом) электроне.

Это явление невозможно объяснить законами классической физики. Согласно классической электромагнитной теории рассеянное излучение должно иметь ту же частоту (и ту же длину волны), что и падающее на вещество излучение. Действительно, излучение, падая на вещество, вызывает вынужденные колебания электронов, которые за счёт этого излучают электромагнитные волны. Но при этом частота волны меняться не должна, ибо частота вынужденных колебаний равна частоте вынуждающей силы, в данном случае – частоте падающей на вещество электромагнитной волны.

Комптон экспериментально доказал, что рассеяние света свободными электронами происходит по законам упругого столкновения двух частиц – фотона и электрона, в котором фотон не полностью поглощается электроном (как при фотоэффекте), а отдаёт ему лишь часть энергии (рис. 3.4).

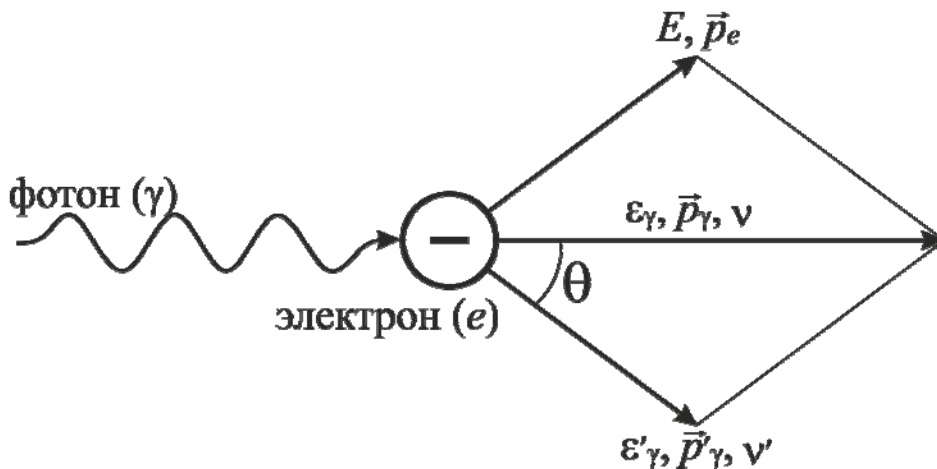


Рис. 3.4. Эффект Комптона:

ϵ_γ , ϵ'_γ , E_0 , E – соответственно, энергии налетающего фотона и электрона до и после соударения; \vec{p}_γ , \vec{p}'_γ , \vec{p}_e – импульсы этих частиц; ν и ν' – частоты, соответствующие налетающему и рассеянному фотонам

Кинематика такого столкновения определяется законами сохранения энергии

$$E_0 + \epsilon_\gamma = E + \epsilon'_\gamma \quad (9)$$

и импульса

$$\vec{p}_\gamma = \vec{p}'_\gamma + \vec{p}_e. \quad (10)$$

Учитывая, что $E_0 = m_0c^2$, $E = mc^2$, $\epsilon_\gamma = h\nu$, $\epsilon'_\gamma = h\nu'$, уравнения (9) и (10) записывают в виде

$$\begin{aligned} m_0c^2 + h\nu &= mc^2 + h\nu', \\ (m\nu)^2 &= \left(\frac{h\nu}{c}\right)^2 + \left(\frac{h\nu'}{c}\right)^2 - 2\frac{h^2}{c^2}\nu\nu'\cos\theta. \end{aligned} \quad (11)$$

Здесь $m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{\nu^2}{c^2}}}$ – масса электрона отдачи.

Решая систему уравнений (11), получают выражение для комптоновского увеличения длины волны, соответствующей рассеянному фотону:

$$\Delta\lambda = \frac{2h}{m_0c} \sin^2 \frac{\theta}{2}, \quad (12)$$

где θ – угол рассеяния фотона.

Согласование измерений Комптона с формулой (12) подтвердило, что фотон – настоящая частица. Как каждая частица, фотон обладает импульсом ($p_\gamma = \frac{h\nu}{c}$) и энергией ($\epsilon_\gamma = h\nu$).

В 1927 году за открытие эффекта, носящего его имя, Комптон получил Нобелевскую премию.

Эксперименты Планка, явления фотоэффекта и эффект Комптона доказали, что наряду с известными свойствами непрерывных электромагнитных волн (проявляющимися, например, в интерференции и дифракции света) свет одновременно обладает и корпускулярными свойствами (свойствами дискретных фотонов). Такое неразрывное единство физически принципиально различных свойств светового излучения стали именовать *корпускулярно-волновым дуализмом света*.

Из квантовых представлений о свете вытекает наличие у фотона не только фиксированной энергии $h\nu$, но и импульса $p = \frac{h}{\lambda}$. Это означает, что при взаимодействии вещества и излучения существуют минимальные порции обмена энергией и импульсом. Таким образом, с возникновением представления о фотонах произошло закрепление идеи *дискретности, квантования физических характеристик микрообъектов*.

3.1.2. Боровская модель атома и концепция квантования

Первый шаг на пути создания квантовой теории атомов был сделан датским физиком **Нильсом Бором** (1885–1962 гг.). 1913 г. Бор предложил модель атома водорода, в которой были использованы новые представле-

ния о квантовом характере излучения и поглощения света, о дискретности изменения физических характеристик микрообъектов. Он разработал эту модель на основе «планетарной» модели строения атома, предложенной в 1911 г. английским физиком **Эрнестом Резерфордом** (1871–1937 гг.). Согласно «планетарной» (ядерной) модели атом состоит из положительно заряженного ядра и электронов, вращающихся вокруг ядра в его электрическом поле. Название «планетарная» отражает очевидную аналогию атома с Солнечной системой, в которой планеты движутся по некоторым определенным орбитам вокруг массивного притягивающего центра – Солнца.

Планетарная модель атома оказалась противоречивой с точки зрения классической физики.

Во-первых, на основе этой модели нельзя было объяснить факт существования атома, его устойчивость. Ведь движение электронов по орбитам происходит с ускорением. Согласно законам классической электродинамики, ускоренно движущийся заряд должен излучать электромагнитные волны определённой частоты. Следовательно, при движении электрона вокруг ядра атом должен непрерывно излучать энергию. Но уменьшение энергии приводит к уменьшению радиуса орбиты электрона. Следовательно, электрон должен двигаться по спирали, приближаясь к ядру. За ничтожно малое время электрон должен упасть на ядро, а атом – прекратить своё существование.

Во-вторых, с помощью планетарной модели невозможно было объяснить спектральные закономерности атомов. Действительно, при движении электрона по спирали с неизменной скоростью должна увеличиться круговая частота его вращения, а значит – непрерывно расти частота излучения, т.е. спектр излучения атома должен быть сплошным.

Таким образом, в модели Резерфорда атом является неустойчивой системой.

В действительности атомы весьма устойчивы и в невозбуждённом состоянии могут существовать неограниченно долго, совершенно не излучая электромагнитные волны. При этом, как показали эксперименты, они имеют не сплошные, а линейчатые спектры излучения.

Чтобы разрешить возникшие противоречия, Бор впервые заявил, что законы электромагнетизма неприменимы для исследования микромира, и предложил внести изменения в планетарную модель атома. Эти изменения он сформулировал в виде двух постулатов и правила квантования орбит.

Первый постулат Бора: *в атоме существует определённый набор устойчивых стационарных орбит, двигаясь по которым, электрон не излучает электромагнитную энергию.*

Правило квантования орбит: на стационарной орбите момент импульса электрона квантуется (кратен постоянной Планка)

$$m_e v_n r_n = \frac{nh}{2\pi} = n\hbar, \quad (13)$$

где n – номер орбиты электрона (целое число, отличное от нуля); r_n – радиус n -й орбиты; v_n – скорость электрона на этой орбите; m_e – масса электрона; $m_e v_n r_n$ – момент импульса электрона на этой орбите; h – постоянная Планка; $\hbar = \frac{h}{2\pi} = 1,05 \cdot 10^{-34}$ Дж·с – приведённая постоянная

Планка.

Второй постулат Бора: атом излучает или поглощает квант электромагнитной энергии при переходе электрона с одной стационарной орбиты на другую.

Находясь на некоторой из таких орбит с номером n , электрон имеет определённую энергию E_n . Он может перейти на орбиту, имеющую номер m , с большей энергией E_m , если атомом будет поглощён фотон с энергией, равной $E_n - E_m$. И наоборот, атом излучает световой квант (фотон) с такой же энергией, если электрон переходит с более удалённой орбиты на орбиту, расположенную ближе к ядру.

Энергия излучённого фотона равна разности энергий стационарных состояний:

$$h\nu = E_m - E_n. \quad (14)$$

Эти постулаты легли в основу боровской модели атома.

Модель Бора не была квантовой в чистом виде. Наряду с неклассическими, квантовыми представлениями в ней использовались и типично классические (понятие траектории частицы, второй закон Ньютона). Это и ограничило возможность применения модели Бора только простейшей системой – атомом водорода. Тем не менее, успех модели Бора стал ещё одним свидетельством правильности предположения о дискретном, квантовом характере процессов, в которых участвуют микрочастицы. В 1922 году Бор получил Нобелевскую премию по физике «За заслуги в изучении строения атома», а предложенная им модель атома получила название модели Резерфорда – Бора.

В новых взглядах на процессы в микромире принципиально важной стала идея о возможности изменений физических величин, характеризующих микрообъект, лишь в рамках определённого набора «разрешённых» значений этих величин. Постоянную Планка стали рассматривать как величину, определяющую масштаб изменения квантующихся характеристик микрообъектов, как своеобразную порцию воздействия в микромире. Через неё выражаются все характеристики, которыми обмениваются

взаимодействующие объекты, если хотя бы один из них относится к микромиру. Поэтому часто постоянную Планка называют ещё **квантом действия**.

Таким образом, непрерывное изменение физических величин, воспринимавшееся в классической физике как само собой разумеющееся, оказалось неприемлемым при описании микрообъектов.

В классической физике нет принципиального различия между малыми объектами и большими – отсутствует критерий такого различия. С развитием концепции квантования этот критерий появился. Он связан с квантом действия: малые воздействия – это те, которые по порядку величины сравнимы с квантом действия h . Соответственно, к малым объектам относят те, которые реагируют на малые воздействия.

3.1.3. Корпускулярно-волновой дуализм микрообъектов

В 1924 г. французский физик **Луи де Бройль** (1892–1987 гг.) выдвинул гипотезу о том, что *корпускулярно-волновой дуализм является универсальным свойством любых материальных объектов, а не только света*.

Фотон – не единственная элементарная частица в микромире. Любая микрочастица может проявлять себя одновременно и как *частица* (с импульсом p и энергией E), и как *волна* (с частотой ν и длиной волны λ). Причём формула, связывающая корпускулярные и волновые характеристики частицы, та же, что и для фотона

$$p = \frac{h}{\lambda}. \quad (15)$$

Поэтому длина волны де Бройля, которая соответствует движущейся микрочастице, обладающей импульсом p , может быть определена по формуле

$$\lambda_{\text{Б}} = \frac{h}{p}. \quad (16)$$

Первое подтверждение гипотезы де Бройля было получено в 1927 г. в опытах по дифракции пучка электронов на монокристалле никеля, выполненных американскими физиками **Клинтоном Дэвиссоном** (1881–1958 гг.) и **Лестером Джермером** (1896–1971 гг.), а также, независимо от них, английским физиком **Джозефом Томсоном** (1892–1975 гг.), который направлял электроны на золотую фольгу. Картина дифракции электронов на кристаллической решётке оказалась сходной с известной дифракционной картиной рентгеновского излучения с длиной волны, равной значению, определяемому соотношением де Бройля (16).

Волновые свойства частиц не являются их коллективной характеристикой, а присущи каждой частице в отдельности. Это подтвердили

классические опыты по дифракции поочередно летящих электронов, выполненные в 1949г. российскими физиками **Валентином Александровичем Фабрикантом** (1907–1992 гг.), **Леонидом Михайловичем Биберманом** (1907–1992 гг.) и **Н. Б. Сушкиным**.

Дифракция одиночных электронов оказалась абсолютно идентичной дифракции одиночных фотонов с длиной волны $\lambda = \lambda_B$. Так же, как и для фотона, можно говорить лишь о вероятности попадания электрона в окрестность определённой точки. Дифракционная картина возникает потому, что вероятность попадания электрона в разные точки экрана неодинакова.

Первоначально волны де Бройля воспринимали как реальный волновой процесс, как своеобразные «волны материи», аналогичные электромагнитным волнам. В ходе дальнейшего развития квантовой теории выявилась некорректность таких представлений, а волны де Бройля получили вероятностную трактовку. На смену «волнам материи» пришли «волны вероятности».

Вероятностный подход к описанию процессов с участием микрообъектов был предопределён исходной *квантовой гипотезой*, в которой испускание излучения рассматривается как *дискретный процесс*.

3.2. Квантовая механика

Идея квантования физических величин, гипотеза корпускулярно-волнового дуализма и экспериментальные факты, получившие объяснение с помощью зародившихся квантовых представлений, были положены в основу построения одной из наиболее совершенных теорий современного естествознания – квантовой механики.

Квантовая механика – это теория, устанавливающая способ описания и законы движения микрочастиц (элементарных частиц, атомов, молекул, атомных ядер) и их систем (например, кристаллов), а также связь величин, характеризующих частицы и системы, с физическими величинами, непосредственно измеряемыми в макроскопических опытах.

Квантовая механика лежит в основе КПКМ и является базой для развития современного естествознания.

3.2.1. Соотношение неопределённостей

Двойственная природа микрочастиц поставила науку перед вопросом о границах применимости *понятий* классической физики в микромире.

В классической механике всякая частица движется по определенной траектории и в любой момент времени имеет вполне определенные (точные) значения координаты, импульса, энергии. По-другому обстоит дело с микрочастицей.

Волна этим свойством не обладает. Она не имеет координат. Нет смысла говорить о длине волны в данной точке пространства.

Тогда из корпускулярно-волнового дуализма микрочастиц вытекает совершенно неожиданное правило: *если мы точно знаем координаты микрочастицы, то мы совсем не знаем её скорости и, наоборот, если частица имеет точно определённую скорость, мы ничего не можем сказать о её координатах* – принцип неопределённости, установленный немецким учёным **Вернером Гейзенбергом** (1901–1976 гг.).

Приведём простейшее рассуждение, приводящее к формулировке этого принципа (такие рассуждения называют мысленным экспериментом, провести его с помощью приборов не возможно).

Пусть мы хотим определить координату и скорость электрона. Для этого мы должны его осветить (свет в качестве измерительного устройства!) и зафиксировать координату x . Очевидно, что мы можем измерить координату электрона с точностью до длины волны света λ (точно так же с помощью линейки можно измерить длину стола с точностью до минимального деления её шкалы – 1 мм). То есть точность определения координаты электрона $\Delta x \sim \lambda$. Для уточнения положения электрона надо использовать свет с возможно меньшей длиной волны.

Чтобы электрон был виден, с ним должен столкнуться хотя бы один световой квант, имеющий энергию $\varepsilon_\gamma = h\nu = \frac{hc}{\lambda}$. При взаимодействии с электроном он передаёт ему часть своей энергии, которая растёт при уменьшении длины волны света. Это приводит к изменению скорости и импульса электрона. Таким образом, при точном измерении координаты электрона ($\Delta x \rightarrow 0$) его импульс оказывается совершенно неопределённым ($\Delta p_x \rightarrow \infty$).

Для точного определения импульса электрона ($\Delta p_x \rightarrow 0$) необходимо использовать свет с большой длиной волны. Однако при этом координата электрона оказывается совершенно неопределённой ($\Delta x \rightarrow \infty$).

Пусть $\Delta x, \Delta y, \Delta z$ – неопределённости (абсолютные погрешности) координат движущейся частицы;

$\Delta p_x, \Delta p_y, \Delta p_z$ – неопределённости проекций импульса частицы на соответствующие оси координат.

Неопределённость координаты частицы и неопределённость проекции импульса частицы на соответствующую ось координат связаны следующими соотношениями, установленными Гейзенбергом в 1927 году:

$$\Delta x \cdot \Delta p_x \geq \hbar; \Delta y \cdot \Delta p_y \geq \hbar; \Delta z \cdot \Delta p_z \geq \hbar, \quad (17)$$

где \hbar – приведённая постоянная Планка.

Неравенства (17) называются **соотношениями неопределённостей Гейзенберга**.

Из (17) следует, если микрочастица находится в состоянии с определённым значением координаты, то в этом состоянии соответствующая проекция её импульса оказывается менее определённой. Эта неопределённость принципиальная, её невозможно устранить никаким усовершенствованием измерительного устройства. Она является результатом неконтролируемого воздействия макроскопического измерительного объекта на изучаемый микрообъект. Таким образом, соотношение неопределённостей ограничивает экспериментально достижимую точность измерения характеристик квантовых объектов.

Соотношение неопределённостей справедливо и для других величин, произведение которых имеет размерность постоянной Планка. В частности, неопределённость полной энергии ΔE микрочастицы в некотором квантовом состоянии и время Δt её пребывания в этом состоянии связаны условием

$$\Delta E \cdot \Delta t \geq \hbar. \quad (18)$$

Соотношение неопределённостей является предпосылкой недетерминистского, статистического описания микрообъектов. Оно приводит к пониманию того, что поведение микрочастиц носит вероятностный характер и взамен классического понятия траектории для микрочастицы следует использовать понятие распределения вероятности обнаружения частицы в различных точках пространства. Это относится и к движению электрона в атоме, которое не может быть описано совокупностью четко определённых орбит. Более верным является представление об «электронном облаке», частота посещения электроном каждой точки которого задаётся некоторой вероятностью, исчисляемой методами квантовой механики.

3.2.2. Понятие состояния в квантовой механике. Волновая функция

В классической механике состояние макроскопического тела однозначно определяется его координатами и скоростью. Принципиальное отличие квантово-механического способа описания состояния системы от метода классической механики заключается в том, что с помощью квантовой механики можно найти лишь вероятность обнаружения микрообъекта в данной области пространства. Определить одновременно координаты и скорость (или импульс) микрочастицы в любой момент времени в принципе невозможно. Таким образом, квантовая механика даёт статистическое описание состояния микросистем, без использования понятия траектории движения и без определения координат как функций времени.

Один из основных постулатов квантовой механики гласит, что *состояние микрообъекта полностью описывается его волновой функцией, являющейся функцией пространственных координат и времени* (иногда её

называют пси-функцией, поскольку волновую функцию принято обозначать греческой буквой ψ .

Аппарат, разработанный в квантовой механике, позволяет, проводя некоторые операции над волновой функцией, рассчитать все характеристики микрочастицы, доступные измерению, и получить полную информацию о движении микрочастицы.

В 1926 г. немецкий физик **Макс Борн** (1882–1970 гг.) так сформулировал вероятностный смысл волновой функции в квантовой механике:

Квадрат модуля волновой функции $|\psi|^2$ определяет плотность вероятности того, что в момент времени t частица может быть обнаружена в окрестности точки с координатами x, y, z .

Самой же волновой функции придают смысл амплитуды вероятности.

3.2.3. Основное уравнение квантовой механики

Идея корпускулярно-волнового дуализма, высказанная де Бройлем, привела к поиску волнового уравнения, которое описывало бы поведение микрочастиц. Такое уравнение было найдено в 1926 г. австрийским физиком-теоретиком **Эрвином Шрёдингером** (1887–1961 гг.). Уравнение Шрёдингера является основным динамическим уравнением нерелятивистской квантовой механики и играет такую же фундаментальную роль, как уравнения движения Ньютона в классической механике и уравнения Максвелла в классической теории электромагнетизма. Уравнение Шрёдингера не выводится из известных ранее законов. Единственным доказательством его правильности является полное соответствие получаемых из него решений опытным данным.

Общее уравнение Шрёдингера, зависящее от времени, имеет вид:

$$\frac{\hbar^2}{2m}\Delta\psi + U(x, y, z, t)\psi = i\hbar\frac{\partial\psi}{\partial t}, \quad (19)$$

где $U(x, y, z, t)$ – потенциальная энергия микрочастицы, описывающая её взаимодействие с окружающими частицами или полями; m – её масса; $\Delta\psi$ – оператор Лапласа, равный сумме вторых частных производных функции ψ по всем координатам ($\Delta\psi = \frac{\partial^2\psi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2\psi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2\psi}{\partial z^2}$); $i = \sqrt{-1}$ – мнимая единица; \hbar – приведённая постоянная Планка; ψ – искомая волновая функция.

Определив с помощью уравнения Шрёдингера волновую функцию, можно вычислить вероятность обнаружения частицы в окрестности любой точки рассматриваемой области пространства. Решение уравнения Шрё-

дингера позволяет определить и другие важные характеристики частицы, например её полную энергию.

Таким образом, в отличие от классического подхода к описанию природы, в соответствии с которым моделируется сам объект, отображаемый совокупностью его точно установленных характеристик, в квантовой механике проявляется новый, неклассический подход. *С помощью уравнения Шрёдингера моделируется не сам объект, а его состояние.* Оно задаётся вероятностями тех или иных значений характеристик микрообъекта. Сами же вероятности однозначно задаются волновой функцией. Иными словами, в неклассической физике на смену концепции моделирования объекта приходит **концепция моделирования состояний объекта.**

В отличие от основного закона динамики в классической механике, уравнение Шрёдингера определяет **вероятностное, статистическое** поведение объектов микромира; предсказания квантовой теории носят вероятностный характер. Таким образом, *квантовая механика является принципиально статистической теорией.*

Решая уравнение Шрёдингера, получают данные о поведении микросистемы в каких-то конкретных условиях. При этом по исходному значению волновой функции может быть определено её значение в любой последующий момент времени. Следовательно, волновое уравнение Шрёдингера позволяет описывать эволюцию микросистемы.

Приняв уравнение Шрёдингера как математическое выражение фундаментальных свойств микросистем, можно получить ряд замечательных следствий, отражающих объективно существующие закономерности. В частности, можно вывести правила квантования полной энергии замкнутой системы. Оказывается, что уравнение Шрёдингера имеет решение не при любых значениях полной энергии системы, а лишь при некоторых, называемых *собственными значениями*. Совокупность собственных значений энергии называется *спектром*. У свободной частицы спектр собственных значений энергии – сплошной. У частицы, заключённой в результате взаимодействия с другими частицами в ограниченный объём пространства, спектр собственных значений энергии дискретный.

Таким образом, идея квантованности энергетических состояний атома, которая у Бора была гениальной догадкой и формулировалась в качестве постулата, оказывается следствием уравнения Шрёдингера.

3.2.4. Квантовая теория поля

Обобщением квантовой механики является квантовая теория поля (КТП).

КТП – *это теория релятивистских квантовых явлений, описывающая элементарные частицы, их взаимодействия и взаимопревращения на основе фундаментального и универсального понятия квантованного физического поля.*

В основе КТП лежит представление о том, что все элементарные частицы являются квантами соответствующих полей.

Понятие квантового поля возникло в результате развития представлений о классическом поле и частицах и синтеза этих представлений в рамках квантовой теории. С одной стороны, квантовые принципы привели к пересмотру классических взглядов на поле как на *непрерывно распределённый в пространстве объект*. Возникло представление о квантах поля. С другой стороны, частице в квантовой механике ставится в соответствие волновая функция $\psi(x, y, z, t)$, имеющая смысл амплитуды волны, причем квадрат модуля этой амплитуды, т.е. величина $|\psi|^2$, определяет вероятность обнаружения частицы в той точке пространства-времени с координатами x, y, z, t . В результате с каждой материальной частицей оказалось связано новое поле – поле амплитуд вероятности.

Таким образом, на смену полям и частицам – принципиально разным объектам в классической физике – пришли единые физические объекты – квантовые поля в 4-мерном пространстве-времени, по одному для каждого сорта частиц (или классических полей). Элементарное взаимодействие при этом рассматривается как взаимодействие полей в одной точке или мгновенное превращение в этой точке одних частиц в другие. Классическое же взаимодействие в виде сил, действующих между частицами, оказывается вторичным эффектом, возникающим в результате обмена квантами поля, переносящего взаимодействие.

Квантовое поле оказалось наиболее фундаментальной и универсальной формой материи, лежащей в основе всех её конкретных проявлений.

КТП – наиболее фундаментальная физическая теория. Квантовая механика является частным случаем КТП при скоростях, много меньших скорости света. Классическая теория поля следует из КТП, если постоянную Планка $\hbar \rightarrow 0$.

Важную роль в квантовой теории поля играет представление о **физическом вакууме**.

Физический вакуум, который ранее рассматривался как абсолютная пустота, лишённое материи пространство, в КТП является *одним из видов материи, представляющим собой основное состояние квантовых полей, обладающих наименьшей энергией, в котором флуктуации нулевых колебаний вакуума проявляются как непрерывный процесс рождения и исчезновения неограниченного числа непосредственно не наблюдаемых частиц, имеющих чрезвычайно короткое время жизни*. Такие частицы получили название виртуальных. Число реальных частиц, например электронов, в вакууме равно нулю. Под действием достаточно сильных полей виртуальные частицы могут превращаться в реальные. Следовательно, вакуум может быть источником частиц вещества. Нулевые колебания имеют вполне наблюдаемые проявления, которые обнаруживаются в

специальных физических экспериментах. Свойства физического вакуума во многом определяют динамику развития Вселенной.

3.2.5. Основные принципы квантовой механики

Важнейшим принципом квантовой механики является **принцип неопределённости** Гейзенберга: *любая физическая система не может находиться в состояниях, в которых координаты её центра масс и скорость (или импульс – произведение скорости на массу) принимают одновременно вполне определённые точные значения.*

Одно из следствий принципа неопределённости состоит в изменении наших взглядов на **принцип причинности**.

Под причинностью мы понимаем наличие причинно-следственных связей между явлениями природы. Законы классической физики полностью определяют судьбу физической системы при условии, что вся необходимая информация о ней нам известна в некоторый определённый момент времени. Пример тому – астрономические расчёты движения небесных тел. Принцип причинности главенствовал в естествознании до начала XX века.

В квантовой механике мы никогда не знаем состояние системы с точностью, большей, чем это допускается принципом неопределённости. Мы вынуждены перейти на вероятностное описание явлений микромира. По яркому выражению Эйнштейна: «...Природа играет в кости...». Заметим, что в природе часто реализуются ситуации, формальная математическая вероятность которых ничтожно мала.

Соотношения неопределённостей Гейзенберга являются конкретным выражением более общего положения – так называемого **принципа дополнительности**.

Он был сформулирован в 1927 году Нильсом Бором. Суть принципа дополнительности, по Бору, сводится к следующему: *при экспериментальном исследовании микрообъекта могут быть получены точные данные либо о его энергиях и импульсах, либо о поведении в пространстве и времени. Эти две взаимоисключающие картины – энергетически-импульсная и пространственно-временная, – получаемые при взаимодействии микрообъекта с соответствующими макроскопическими измерительными приборами, дополняют друг друга.*

Частица и волна – две дополнительные стороны единого явления микромира. Квантовая концепция объединяет эти понятия, создавая целостный образ микрообъекта. С точки зрения принципа дополнительности соотношения неопределённостей можно рассматривать как способ сохранить возможность описания неклассических объектов с помощью классических понятий – координаты и импульса. Этот способ заключается во взаимном ограничении области совместной применимости этих понятий.

Принцип дополнительности стал одной из основ современной картины мира, в которой признаётся *невозможность отделить мир от обозревающего его наблюдателя*.

Познающий субъект всегда оказывается активным, исследование реальности всегда сопровождается её изменением, а результат исследования зависит от того, как оно выполнялось. Полное представление о свойствах объекта требует взгляда на него с несовместимых точек зрения.

В последние годы жизни Бор пытался распространить идею дополнительности на многие аспекты человеческой жизни и мышления. Она оказалась весьма плодотворной и широко используется в естественных и общественных науках. Примером действия принципа дополнительности в широком его понимании является сам человек. С одной стороны, человек – одно из высших животных и многие его поступки направлены на удовлетворение чисто биологических потребностей. Однако с другой стороны, в отличие от других животных, человек – разумное социальное существо. Эти два подхода не могут быть совмещены, поскольку первый подчёркивает принадлежность *Homo sapiens* к животному миру Земли, а второй выделяет из него, но они дополняют друг друга, демонстрируя парадоксальную целостность биологического и социального начал.

Ещё один из принципов КПКМ – **принцип соответствия**: *теории, справедливость которых была экспериментально установлена для определенной группы явлений, с появлением новой теории не отбрасываются, а сохраняют свое значение для прежней области явлений как предельная форма и частный случай новых теорий*.

В физике XX в. принцип соответствия был сформулирован Бором, искавшим связи между новыми квантовыми представлениями и классическими теориями. Из соотношений неопределённостей видно, что с увеличением массы частицы ограничения, накладываемые ими, уменьшаются. Например, для пылинки массой 10^{-13} кг, координата которой определена с точностью до её размеров, т.е. $\Delta x = 10^{-6}$ м, получаем неопределённость скорости пылинки Δv_x , равную 10^{-15} м/с. Неопределённость такой величины практически не будет сказываться ни при каких скоростях частицы. Для макроскопических тел соотношение неопределённостей не будет вносить никаких ограничений в возможность применить для них понятия координаты и скорости одновременно. Дело в том, что постоянная Планка в этих случаях может рассматриваться пренебрежимо малой величиной. Это приводит к тому, что квантовые свойства изучаемых объектов оказываются несущественными, а представления классической физики – полностью справедливыми.

Таким образом, классическая механика является предельным случаем квантовой механики.

Новым принципом КПКМ является **принцип тождественности**, согласно которому *невозможно экспериментально различить одинаковые частицы*.

Этот принцип является одним из основных различий между классической и квантовой механикой. Действительно, в классической механике всегда можно различить два одинаковых шара, проследив их траектории до и после столкновения. В квантовой механике такая возможность отсутствует, так как мы можем определить только вероятность обнаружения частицы в той или иной точке пространства. Так как все электроны Вселенной тождественны, мы не имеем способа *пометить* один из них и *следить* только за ним.

Принцип тождественности логически не вытекает из остальных основных положений КПКМ, но можно доказать, что он не противоречит им. Его следует принять, поскольку он подтверждается всей совокупностью опытных фактов.

3.2.6. Основные положения КПКМ

В свете представленной квантово-полевой картины мира основные понятия физической картины мира получили новые обоснования.

Материя обладает корпускулярными и волновыми свойствами, т.е. каждый объект материи имеет свойства частицы и волны. Согласно концепции корпускулярно-волнового дуализма *все поля квантуются, т. е. могут рассматриваться как совокупность частиц; с другой стороны, каждая элементарная частица может рассматриваться как квант некоторого поля*.

В КПКМ признаётся невозможность исчерпывающего описания **движения**. Для микрочастиц не имеет смысла понятие траектории движения, поскольку её задание предполагает точное знание координаты и скорости частицы в каждый момент времени, а это запрещено соотношением неопределённости. Движение рассматривается как частный случай физических взаимодействий. Взаимодействие рассматривается не только как результат порождения полей, но и как результат обмена виртуальными частицами – квантами соответствующего поля. Фундаментальных физических взаимодействий уже насчитывается четыре: гравитационное, электромагнитное, сильное и слабое. Их свойства определяются свойствами частиц – переносчиков взаимодействия. Каждое из взаимодействий характеризуется так называемой константой взаимодействия, которая определяет его сравнительную интенсивность, время протекания и радиус действия (см. п. 1.1.8).

Выясняется фундаментальная роль принципиально непредсказуемых форм движения (тепловые и квантовые флуктуации, динамический хаос, мутации).

В квантово-полевой картине мира окончательно утверждаются представления об относительности **пространства и времени**; они перестают быть независимыми друг от друга и, согласно теории относительности, сливаются в едином четырехмерном пространстве-времени, которое не существует вне материальных тел.

Картина физической реальности в КПКМ, с одной стороны, включает **характеристики исследуемого объекта**; с другой стороны – **условия наблюдения** (метод познания), от которых зависит определённость этих характеристик. При описании объектов используются два класса понятий: пространственно-временные и энергетически-импульсные. Первые дают кинематическую картину движения, вторые – динамическую (причинную). Спецификой квантово-полевых представлений о закономерности и причинности является то, что они выступают в вероятностной форме, в виде статистических законов.

КПКМ впервые **включила в себя наблюдателя**, от присутствия которого зависят получаемые результаты исследований. Более того, был сформулирован так называемый **антропный принцип**, который утверждает, что *наш мир таков, каков он есть, только благодаря существованию человека*. Появление человека стало считаться закономерным результатом эволюции Вселенной.

3.2.7. Приложения квантовой механики

Наиболее важные приложения квантовой механики связаны со стационарными системами: ядрами, атомами, молекулами, кристаллами.

Атомы, из которых состоят все окружающие нас тела, являются квантово-механическими системами. Следовательно, глубинные свойства макротел могут быть поняты только на основе квантовой механики и, в первую очередь, на основе квантовой теории атомов.

Оптические, магнитные и химические свойства атомов определяются поведением в них электронов. Для решения задачи о поведении электрона в атоме следует подставить в уравнение Шрёдингера зависимость потенциальной энергии электрона от координат в электрическом поле ядра и других электронов. В итоге находят разрешённые значения полной энергии электрона и соответствующие этим энергиям волновые функции.

Волновые функции описывают состояние электронных систем атома. Они позволяют, в частности, рассчитать вероятность обнаружения электрона в любой точке в окрестности ядра. Установлено, что эта вероятность является непрерывной функцией расстояния r от ядра и, например, для невозбуждённого атома водорода принимает максимальное значение при $r=0,53 \cdot 10^{-8}$ м. Это совпадает с радиусом первой орбиты электрона, определённой в модели Бора.

Совокупность точек, для которых вероятность встретить в них электрон достаточно высока, определяет размеры и пространственную конфигурацию всей системы электронов – «электронного облака».

Описанная квантово-механическая модель атома не наглядна и не представима с помощью моделей классической физики, но гораздо точнее отражает природу и свойства атомов.

Из уравнения Шрёдингера следует, что волновая функция, описывающая состояние электрона в атоме, зависит от квантовых чисел. **Главное квантовое число** (n) определяет энергию электрона в атоме и размеры электронного облака. **Орбитальное** (l) и **магнитное** (m) **квантовые числа** определяют пространственную конфигурацию и ориентацию электронного облака; они связаны с орбитальным моментом импульса электрона.

В 1921 году было немецкими физиками **Отто Штерном** (1888–1969 гг.) и **Вальтером Герлахом** (1888–1969 гг.) было экспериментально установлено, что микрочастица имеет еще одно свойство – **спин** (от английского spin – вращаться).

Спином называется собственный момент импульса частицы, не связанный с её перемещением в пространстве.

В 1928г. английский физик-теоретик **Поль Дирак** (1902–1984 гг.) получил квантовое релятивистское уравнение движения электрона, из которого естественно вытекало наличие спина у электрона.

Спин характеризуется **спиновым квантовым числом** (s), которое может принимать целые, например 0 или ± 1 , или полуцелые ($\pm 1/2$) значения. Частицы с целым спином называются **бозонами**, с полуцелым – **фермионами**. К фермионам относятся электрон, протон, нейтрон, примером бозона является фотон.

Фермионы являются элементарными «кирпичиками» окружающего нас вещества, а бозоны – переносчиками взаимодействия между «кирпичиками» – фермионами.

В 1925 году, ещё до точной формулировки квантовой механики, швейцарский физик **Вольфганг Паули** (1900-1958 гг.) сформулировал **принцип запрета**, согласно которому в атоме не может быть более одного электрона с одним и тем же набором четырёх квантовых чисел n , l , m , s . В соответствии с принципом Паули вероятность нахождения двух микрообъектов-фермионов в одинаковом микросостоянии равна нулю (для бозонов такой запрет отсутствует).

Электроны, которым соответствуют волновые функции с одинаковым значением главного квантового числа n , очень близки по энергиям и образуют в атоме **электронную оболочку**. Различия в числе l определяют **подоболочку**. Остальные квантовые числа определяют её заполнение. Даже у атомов со сходным строением электронных оболочек значения энергий электронов индивидуальны. Поэтому и излучение электромагнитной

энергии, которым сопровождаются возможные переходы электронов в атоме из одного энергетического состояния в другое, также индивидуально. Атом данного элемента способен излучать или поглощать только свой, определённый набор длин волн, т.е. имеет свой индивидуальный спектр электромагнитного излучения. Эта особенность спектров атомов лежит в основе метода определения химического состава вещества – *спектрального анализа*.

Принцип Паули позволил объяснить, почему все электроны не переходят в единственное состояние с наименьшей энергией. Вместо этого они в строгом порядке заполняют один за другим энергетические уровни атома. Если бы электроны не подчинялись принципу Паули, то во всех атомах они находились бы на нижнем уровне, и не было бы того многообразия химических свойств различных элементов, которое наблюдается в действительности. Химические свойства элементов определяются строением внешней электронной оболочки атомов и характером их заполнения электронами, которые называют *валентными*. При переходе от атома элемента с меньшим числом электронов к атомам со всё большим числом электронов закономерно изменяется заполнение электронами внешней оболочки. Эта закономерность обусловлена принципом Паули и стремлением электронов занять состояния с наименьшей энергией. Поэтому с увеличением заряда ядра атомов наблюдается *периодическое изменение химических свойств элементов*, что отражено в **периодической системе элементов Менделеева**.

Таким образом, квантовая механика вскрыла природу химических свойств элементов, объяснила природу химической связи и, по существу, стала одной из фундаментальных основ химии.

3.2.8. Цивилизационная значимость квантовой механики

С появлением квантовой механики стало возможным исследование субатомной структуры материи, элементы которой получили название *элементарных частиц*.

Вначале элементарными частицами считали электроны и ядра. Однако после экспериментального открытия нейтрона в 1932 г. английским физиком **Джеймсом Чедвиком** (1891–1974 гг.), российский физик **Дмитрий Дмитриевич Иваненко** (1904–1994 гг.) и **Вернер Гейзенберг** выдвинули гипотезу о том, что ядра состоят из более простых частиц – **нуклонов** (*протонов и нейтронов*). Поэтому *элементарными частицами стали считать мельчайшие частицы материи, исключая атомы и их ядра*.

Были открыты две группы частиц, подобных электронам и нуклонам соответственно. Частицы первой группы были названы **лептонами**, а второй – **адронами**. Обнаружено также, что каждой частице соответствует своя **античастица**. Например, античастицей по отношению к электрону

является позитрон. Существование позитрона было предсказано Дираком на основании релятивистского уравнения движения электрона во внешнем силовом поле и экспериментально открыто в 1932 г. американским физиком **Карлом Андерсоном** (1905–1991 гг.) в космических лучах. Античастицы других структурных единиц вещества (протона и нейтрона) – антипротон и антинейтрон – были экспериментально открыты соответственно в 1955 г. и 1956 г.

Античастица отличается от частицы тем, что какая-либо из её важнейших характеристик противоположна характеристике, присущей частице.

К таким характеристикам относятся заряд, магнитный момент и др. Имеются частицы, у которых характеристики, отличающие античастицу от частицы, равны нулю, например фотон и некоторые другие. Такие частицы называются истинно нейтральными. При столкновении частиц и античастиц они взаимно «уничтожаются» (**аннигилируют**), превращаясь в гамма-излучение и другие частицы. Наблюдаются также процессы, противоположные аннигиляции – рождение пар частица–античастица. Например, рождение из гамма-излучения пары электрон–позитрон.

Элементарные частицы систематизируются по группам, представленным на рис.3.5.



Рис. 3.5. Основные группы элементарных частиц

Систематизация элементарных частиц связывается с так называемыми **фундаментальными взаимодействиями**, которыми обусловлены все конкретные силы, проявляющиеся в природе. Существует четыре типа фундаментальных взаимодействий: **сильное (ядерное), электромагнитное, слабое и гравитационное**. Фундаментальные взаимодействия различаются относительной интенсивностью (константой взаимодействия) и радиусом взаимодействия (табл. 1).

Т а б л и ц а 1

Основные характеристики фундаментальных взаимодействий

| Вид взаимодействия | Примеры проявления взаимодействия | Константа взаимодействия | Радиус взаимодействия |
|-------------------------|--|--------------------------|-----------------------|
| Сильное | Взаимодействие нуклонов в ядрах атомов | 10 | 10^{-15} м |
| Электромагнитное | Взаимодействие электрических зарядов, токов, электрических и магнитных полей | 10^{-2} | ∞ |
| Слабое | Взаимодействие элементарных частиц при радиоактивном распаде | 10^{-14} | 10^{-18} м |
| Гравитационное | Взаимодействие всех тел | 10^{-39} | ∞ |

Все фундаментальные взаимодействия носят обменный характер. Это означает, что взаимодействующие объекты обмениваются определёнными частицами – **квантами взаимодействия**.

Квантами сильного взаимодействия являются нейтральные безмассовые *глюоны*, электромагнитного – *фотоны*, слабого – W^{\pm} - и Z -*бозоны*, гравитационного – *гравитоны*.

Предполагается, что в момент зарождения Вселенной было лишь одно фундаментальное взаимодействие, называемое Суперсилой. Через 10^{-43} с после зарождения Вселенной из единого взаимодействия выделилась гравитация, через 10^{-35} с – сильное, а через 10^{-10} с – слабое взаимодействие. Последнее уже строго доказано теоретически.

Все элементарные частицы участвуют в гравитационном взаимодействии, а заряженные – и в электромагнитном. **Лептоны** участвуют ещё и в слабом взаимодействии (но не участвуют в сильном). **Адроны** участвуют во всех четырёх фундаментальных взаимодействиях. Лептоны обладают полуцелым спином, а часть адронов, называемых **мезонами**, обладает целым спином.

После возникновения элементарные частицы существуют некоторое ограниченное время, называемое **временем жизни τ** .

Время жизни и масса элементарных частиц не квантованы, остальные же их характеристики квантованы.

В зависимости от среднего времени жизни частицы делятся на стабильные, квазистабильные и нестабильные (**резонансы**).

Частицы, для которых $\tau \rightarrow \infty$, называются **стабильными**. Такими частицами являются электроны, протоны, нейтрино; внутри ядер стабильны также и нейтроны. Из стабильных частиц построены атомы и, в конечном счёте, весь вещественный мир. К **квазистабильным** относят частицы, распадающиеся за счёт электромагнитного и слабого взаимодействий; для этих частиц $\tau > 10^{-20}$ с. **Резонансами** называются частицы, распадающиеся за счёт сильного взаимодействия; для них $\tau < 10^{-20}$ с.

В 1964 г. была выдвинута гипотеза о том, что адроны являются не элементарными, а составными частицами. «Истинно» элементарные частицы, входящие в их состав, названы **кварками**. Кварки имеют дробные заряды: $\pm 1/3$, $\pm 2/3$ от элементарного заряда. В настоящее время известно 6 кварков. При объединении кварков (антикварков) по три образуются **барионы** (например, протон); по два – **мезоны**.

Итак, в настоящее время истинно элементарными принято считать кварки и лептоны; их 12 или, вместе с античастицами, – 24. Кроме того, присутствуют частицы, обеспечивающие четыре фундаментальных взаимодействия (кванты взаимодействия). Этим частицам 13: гравитон, фотон, W^\pm - и Z -бозоны и 8 глюонов.

Существующие теории элементарных частиц не позволяют установить, что является началом ряда: атомы, ядра, адроны, кварки... В этом ряду каждая более сложная материальная структура включает более простую в качестве составной части. По-видимому, так бесконечно продолжаться не может. Предполагают, что описанная цепочка материальных структур базируется на объектах принципиально иной природы. Показано, что такими объектами могут быть не точечные, а протяжённые, хотя и чрезвычайно малые ($\sim 10^{-33}$ см) образования, названные **суперструнами**.

Мы привыкли думать об элементарных частицах как о точечных 0-мерных объектах. Однако легко представить, что отрезок струны, рассматриваемый с достаточно большого расстояния, выглядит как точка (частица). Являясь тем не менее струной, он имеет бесконечный набор частот собственных колебаний и испускает в пространство волны. Согласно квантовым представлениям, этим волнам соответствуют некоторые частицы. Так, струна порождает первичные частицы, из которых могут образовываться более сложные: кварки, адроны и т.д. Описанная идея в нашем четырёхмерном пространстве нереализуема. Данная область физики вообще чрезвычайно абстрактна, и очень трудно подобрать наглядные модели, помогающие упрощённому восприятию идей, заложенных в теориях элементарных частиц. Тем не менее, эти теории позволяют физикам выразить взаимопревращение и взаимообусловленность «наиболее элементарных» микрообъектов, их связь со свойствами четырёхмерного пространства времени. Одной из наиболее перспективных считается так называемая **М-теория** (М – от англ. «mystery» – загадка, тайна). Она оперирует двенадцатимерным пространством. В конечном итоге при переходе

к непосредственно воспринимаемому нами четырёхмерному миру все «лишние» измерения «сворачиваются». М-теория имеет перспективы свести четыре фундаментальных взаимодействия к одному – так называемой **Суперсиле**.

М-теория допускает существование множественности миров и устанавливает условия, обеспечивающие возникновение нашего мира. Однако М-теория ещё недостаточно разработана. Её состоятельность станет ясна лишь в будущем.

3.3. Ядра атомов. Ядерная энергия

Атомное ядро состоит из протонов и нейтронов (нуклонов). Протоны и нейтроны почти одинаковы по массе. Их общее число A называется **массовым числом** ядра. Количество протонов в ядре Z называется **зарядовым числом** ядра. Оно равно числу электронов в атоме и, следовательно, определяет химические свойства элемента.

Общее название атомных ядер, отличающихся числами A и Z , – **нуклиды**. *Нуклиды с различными массовыми и одинаковыми зарядовыми числами называются **изотопами***. Изотопы являются ядрами одного и того же химического элемента.

Устойчивость атомных ядер обусловлена связью между нуклонами за счёт *ядерных сил*. Они действуют лишь на расстояниях порядка 10^{-15} м. Ядерные силы – проявление так называемого *сильного взаимодействия*. Наиболее устойчивыми являются ядра атомов средней части таблицы Менделеева, а тяжёлые и лёгкие ядра менее устойчивы. Это означает, что энергетически выгодны процессы деления наиболее тяжёлых ядер и слияния наиболее лёгких ядер (синтез ядер).

С устойчивостью ядра связано понятие **радиоактивности**.

Под радиоактивностью понимают способность некоторых ядер самопроизвольно распадаться, превращаясь в ядра других элементов.

Радиоактивный распад сопровождается радиоактивным излучением. Оно имеет сложный состав: **α -излучение** – поток ядер гелия; **β -излучение** – поток электронов; **γ -излучение** – поток электромагнитных волн с малой длиной волны.

В процессе распада число ядер радиоактивного вещества уменьшается. **Активность нуклида характеризуется числом ядер, распадающихся в единицу времени.** С течением времени t число нераспавшихся ядер N уменьшается по экспоненциальному закону

$$N = N_0 e^{-\lambda t},$$

где λ – постоянная радиоактивного распада данного элемента; N_0 – первоначальное количество ядер.

Периодом полураспада радиоактивного изотопа называется величина, равная среднему времени распада половины из первоначально имевшихся ядер.

Явление радиоактивности в природе далеко не так редко и исключительно, как это обычно принято считать. Больше половины элементов таблицы Менделеева имеют естественные радиоактивные изотопы. Они встречаются всюду – в воде, в воздухе, в почве, в тканях растений и животных, в продуктах питания и в составе человеческого организма. Энергия радиоактивного распада урана и тория является одним из основных источников внутренней энергии Земли. Многие природные процессы: горообразование, движение материков, извержения вулканов и землетрясения – обусловлены в конечном счёте радиоактивностью земных пород.

Атомные ядра при взаимодействии с элементарными частицами или друг с другом претерпевают превращения, которые называются **ядерными реакциями**. Наибольшее практическое значение имеют ядерные реакции с участием нейтронов. Нейтроны не испытывают электрического отталкивания и могут легко проникать в ядра, вызывая ядерные реакции. Например, тяжёлые ядра под действием нейтронов делятся на более лёгкие и испускают **вторичные нейтроны**. Такое превращение сопровождается выделением энергии. Вторичные нейтроны могут вызывать деление других тяжёлых ядер. Это обуславливает возможность **цепной ядерной** реакции. В зависимости от энергии нейтроны подразделяют на быстрые и медленные. Медленные нейтроны эффективны для возбуждения ядерных реакций, так как они относительно долго находятся вблизи ядра. И вероятность их захвата ядром с последующей реакцией распада велика.

Цепная реакция может быть **неуправляемой**, если поток нейтронов не регулируется (например, взрыв атомной бомбы), и **управляемой**, если поток нейтронов регулируется специальными поглотителями (в атомном реакторе). Управляемая цепная реакция используется как высокоэффективный источник ядерной энергии в промышленных масштабах. Радиоактивные материалы, обеспечивающие протекание управляемой реакции, называются ядерным топливом (например, уран, плутоний).

Другой тип ядерной реакции, которая может служить источником энергии, – это **реакция синтеза** атомных ядер. В результате синтеза из лёгких ядер образуются более тяжёлые. *Реакция синтеза лёгких ядер энергетически более выгодна, чем реакция деления тяжёлых.* В связи с этим активно исследуются различные возможности осуществления **управляемых реакций ядерного синтеза**. Слияние ядер происходит под действием сил ядерного притяжения. Поэтому ядра должны сблизиться до расстояний, меньших 10^{-15} м. Этому сближению препятствует кулоновское отталкивание положительно заряженных ядер. Для его преодоления ядра должны обладать кинетической энергией, превышающей потенциальную энергию их кулоновского отталкивания. Необходимую энергию обеспечи-

вадет очень высокая температура реакционной среды – выше 10^8 К. Поэтому реакции ядерного синтеза называют **термоядерными реакциями**.

Рабочим веществом для термоядерных реакций является **высокотемпературная плазма** – *сильно разогретый и сильно ионизированный газ*.

Природные термоядерные реакции протекают в звёздах. Солнце является гигантским термоядерным реактором.

3.4. Кристаллы, полупроводники, микро- и наноэлектроника

Квантовая механика объяснила поведение электронов не только в отдельных атомах, но и в твёрдых телах – кристаллах.

Кристаллы (от греч. первоначально – лёд, в дальнейшем – *горный хрусталь*) – *твёрдые тела, в которых атомы или ионы вещества образуют упорядоченную периодическую пространственную структуру (кристаллическую решётку)*.

Кристаллическая структура, будучи индивидуальной для каждого вещества, определяет его основные физико-химические свойства.

С использованием квантовой механики разработана квантовая теория твёрдого тела, ставшая основой более узких направлений в физике, в частности – физики полупроводников.

Важнейшим свойством полупроводниковых кристаллов является высокая чувствительность их электропроводности к изменениям температуры, освещённости, магнитного поля, давления. Это позволяет использовать их в качестве основы для создания эффективных датчиков, реагирующих на различные воздействия. Такие датчики обеспечивают работу всевозможных устройств автоматики, сигнализации, дистанционного управления.

На свойства полупроводника радикально влияют малейшие концентрации примеси различных элементов.

В зависимости от вида примесей, которые вводят в полупроводниковые кристаллы, их относят к электронному (n) и дырочному (p) типам. Кристаллы n -типа проводят электрический ток за счёт перемещения электронов. В кристаллах p -типа положительный заряд переносят электронные вакансии – так называемые дырки. Современные технологии позволяют создавать в пределах единого полупроводникового кристалла области с проводимостью электронного и дырочного типов. Граница раздела между двумя такими областями называется электронно-дырочным переходом (p - n -переходом). Свойства p - n -перехода позволяют использовать его как основу для создания различных полупроводниковых приборов и полупроводниковых интегральных микросхем. Простейший из них – полупроводниковый диод. Он содержит единственный p - n -переход. Транзистор содержит два p - n -перехода. В солнечной батарее p - n -переходы пре-

вращают световую энергию в электрическую. В светодиодах и полупроводниковых лазерах p - n -переход используется для обратного превращения.

Развитие квантовой теории полупроводников, технологии полупроводниковых кристаллов и полупроводниковых приборов явилось одной из важнейших предпосылок и основ современной цивилизации. Новым направлением полупроводниковой технологии стала **микроэлектроника** – технология создания электронных устройств на основе интегральных микросхем.

Интегральной микросхемой называют совокупность большого числа электронных элементов малых размеров, созданных в едином технологическом цикле в пределах одного кристалла и объединённых в единый технологический узел.

Интегральные схемы являются элементной базой современной компьютерной техники, а следовательно, и технической базой информационных технологий. В настоящее время технологические методы управления свойствами полупроводниковых кристаллов быстро развиваются; разработаны новые типы микроминиатюрных приборов, в основу которых положены квантовые эффекты; закладываются основы следующего этапа в развитии электроники – этапа **наноэлектроники**. На этом этапе реализуются возможности управления структурой кристалла на уровне отдельных атомных слоёв и индивидуальных атомов. Это, в свою очередь, открывает принципиально новые пути развития компьютерной техники.

3.5. Квантовые генераторы (лазеры)

Одним из практических результатов развития квантовой физики явилось создание квантовых генераторов и их важнейшей разновидности – лазеров.

Лазер представляет собой устройство, преобразующее различные виды энергии (световую, электрическую, тепловую, химическую и др.) в энергию монохроматического, когерентного, поляризованного и узконаправленного оптического излучения.

Физической основой работы лазера служит явление вынужденного (**индуцированного**) излучения возбуждёнными квантовыми системами – атомами газов, жидкостей или кристаллов.

Электрон в возбуждённом атоме может перейти на один из своих разрешённых энергетических уровней с меньшей энергией, отдав при этом избыток энергии в виде излучения. Процесс испускания фотона возбуждённым атомом без каких-либо внешних воздействий называется **спонтанным излучением**. Спонтанное излучение – это случайный процесс. Излучение разных атомов происходит в разные моменты, в произвольных направлениях и со случайными фазами колебаний. Это делает излучение большинства источников света немонахроматическим и ненаправленным.

Возможен и иной тип излучения. Если на возбуждённый атом действует такое излучение, которое способен испустить сам этот атом, то в нём стимулируется переход в нижнее состояние. В результате возникает излучение, которое называется **индуцированным (вынужденным)**. Первичный фотон при этом не поглощается. Это означает, что к первичному фотону, падающему на атом от внешнего источника, добавляется фотон индуцированного излучения. Индуцированный фотон является «точной копией» первичного фотона. Они имеют одинаковую частоту и фазу колебаний (то есть когерентны) и распространяются в одном направлении.

Явление индуцированного излучения позволяет усиливать свет. Представим, что имеется среда, состоящая из атомов, большинство из которых оказалось к определённому моменту в одинаковом возбуждённом состоянии. Такая среда называется **средой с инверсной заселённостью уровней**. В ней любой фотон спонтанного излучения, взаимодействуя с попадающими на его пути возбуждёнными атомами, образует нарастающую лавину вторичных фотонов вынужденного излучения. Иными словами, в этом направлении происходит многократное усиление света за счёт энергии, накопленной средой с инверсной заселённостью. Для создания среды с инверсной заселённостью (этот процесс называют **накачкой**) необходимо достаточно большое время жизни возбуждённых состояний, в течение которого можно успеть завершить процесс возбуждения большой доли атомов среды. Были найдены вещества, содержащие атомы с так называемыми **метастабильными** возбуждёнными состояниями, в которых они могут находиться аномально долго (порядка 10^{-3} с) по сравнению с обычным возбуждённым состоянием (10^{-7} – 10^{-8} с). Такие вещества являются основой для создания лазеров, из них изготавливается основная часть лазера – **рабочее тело**. Подобрано множество вариантов веществ для рабочих тел. Это может быть газ, жидкость или кристалл. Рабочее тело должно быть прозрачным для образующегося излучения.

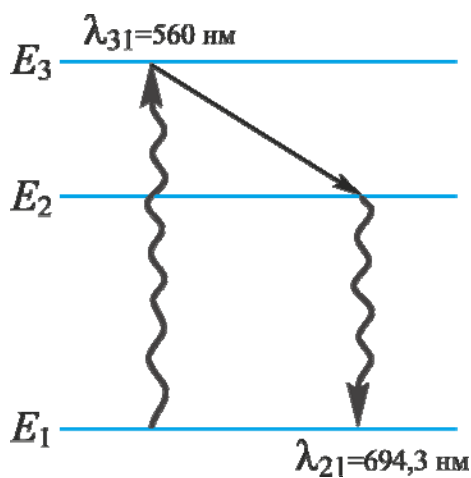


Рис. 3.6. Оптические процессы в рубиновом лазере

Первый лазер, работающий на кристалле рубина в видимом диапазоне, был создан в 1960 г. американским физиком **Теодором Мейманом** (1927–2007 гг.).

Рассмотрим принцип действия рубинового лазера. Рубин представляет собой кристалл оксида алюминия Al_2O_3 , в котором часть атомов алюминия замещена ионами хрома Cr^{3+} . С помощью мощного импульса лампы-вспышки («оптической накачки») ионы хрома переводятся из основного состояния E_1 в возбуждённое E_3 (рис.3.6).

Через 10^{-8} с ионы, передавая часть энергии кристаллической решётке, переходят на метастабильный энергетический уровень $E_2 < E_3$, на котором они начинают накапливаться. Малая вероятность спонтанного перехода с этого уровня в основное состояние приводит к инверсной заселённости. Случайный фотон с энергией $h\nu = E_2 - E_1$ может вызвать лавину индуцированных когерентных фотонов (рис. 3.7а). Все они, за исключением направленных вдоль оси рабочего тела, уходят за его пределы, как только достигают его границ. Лавины фотонов, распространяющиеся вдоль оси рабочего тела, наиболее мощные, поскольку они формируются за счёт вынужденного излучения наибольшего числа возбуждённых атомов рабочего тела. Перпендикулярно оси рабочего тела располагают зеркала, которые образуют **оптический резонатор**. Резонатор выделяет лишь то излучение, которое направлено вдоль оси, и многократно усиливает его за счёт энергии, накопленной в среде с инверсной заселённостью (рис. 3.7б). Одно из зеркал делают полупрозрачным. Через него выходит мощный импульс когерентного монохроматического излучения красного цвета с длиной волны 694,3 нм (рис. 3.7в).

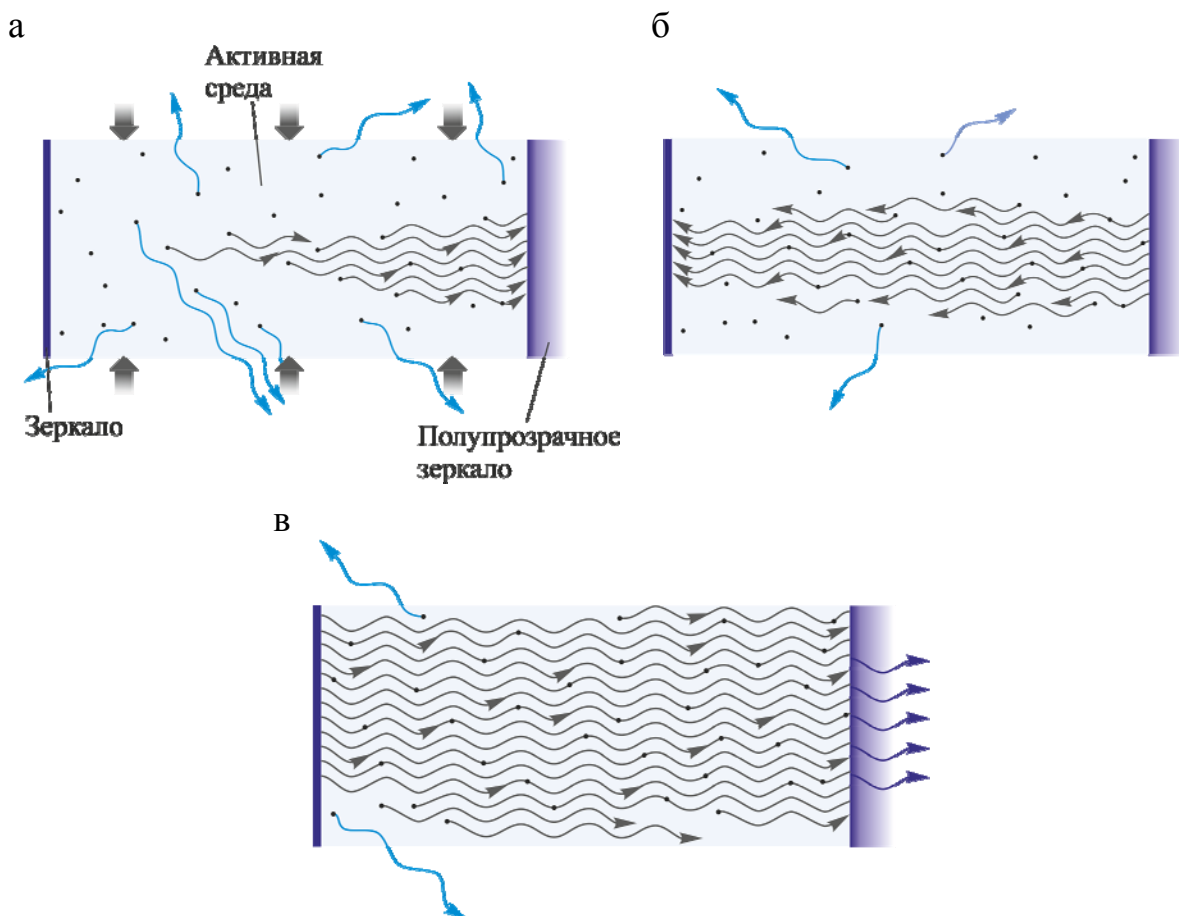


Рис. 3.7. Оптическое усиление:
а – оптическая накачка; б – оптическое усиление;
в – генерация лазерного излучения

К специфическим свойствам лазерного излучения, резко отличающим его от излучений традиционных источников света, относятся следующие:

1. Лазерный луч обладает исключительной монохроматичностью, когерентностью и высокой направленностью (пучок света лазера имеет очень малый угол расхождения (около 10^{-5} рад)).

2. Лазер – наиболее мощный искусственный источник света.

Уникальные свойства излучения лазеров позволили использовать их в различных отраслях науки и техники, а также в быту.

В промышленности лазеры используют для резки, сварки и пайки деталей из различных материалов. Высокая температура лазерного излучения позволяет сваривать материалы (например, керамику), которые невозможно сварить обычными способами. Лазеры используются также для получения поверхностных покрытий материалов (лазерное легирование, лазерная наплавка, вакуумно-лазерное напыление) с целью повышения их износостойкости. Широкое применение получила также лазерная маркировка промышленных образцов и гравировка изделий из различных материалов. При лазерной обработке материалов на них не оказывается механическое воздействие, поэтому возникают лишь незначительные деформации. Кроме того, весь технологический процесс может быть полностью автоматизирован. Поэтому лазерная обработка характеризуется высокой точностью и производительностью. Лазеры применяются также для быстрого и точного обнаружения дефектов в изделиях.

Луч лазера может быть сфокусирован в точку диаметром порядка одного микрона, это позволяет использовать его в микроэлектронике.

Лазеры широко применяются в измерительной технике. Лазерные интерферометры (в них источником света служит лазер) используются для сверхточных дистанционных измерений линейных перемещений, коэффициентов преломления среды, давления, температуры. Сверхстабильные лазеры являются основой оптических стандартов частоты, лазерных сейсмографов, гравиметров и других точных физических приборов.

Лазеры применяются также для топографической съёмки, потому что луч лазера задаёт идеальную прямую линию. Направление тоннеля под проливом Ла-Манш задавалось лазерным лучом. С помощью лазерного излучения получают голографические трёхмерные объёмные изображения.

Очень перспективно применение лазерного излучения для космической связи, а также в светолокаторах, измеряющих большие расстояния с точностью до миллиметров. Лазерная локация космических объектов уточнила значения ряда фундаментальных астрономических постоянных, способствовала уточнению параметров космической навигации, расширила представления об атмосферах и строении поверхности планет, позволила измерить скорость вращения Венеры и Меркурия. Лазерные локаторы позволяют контролировать распределение загрязнений в атмосфере на различных высотах, определять скорость воздушных течений, температуру и состав атмосферы.

Сверхкороткие импульсы лазерного излучения используются в лазерной химии для запуска и анализа химических реакций. Здесь лазерное излучение позволяет обеспечить точную локализацию, дозированность, абсолютную стерильность и высокую скорость ввода энергии в систему.

Лазеры используются и в военных целях, например, в качестве средств наведения и прицеливания. Рассматриваются варианты создания на основе мощных лазеров боевых систем защиты воздушного, морского и наземного базирования.

В медицине лазеры применяются как бескровные скальпели и используют их при лечении офтальмологических заболеваний (катаракта, отслоение сетчатки, лазерная коррекция зрения и др.). Широкое применение они получили также в косметологии (лазерная эпиляция, лечение сосудистых и пигментных дефектов кожи, лазерный пилинг, удаление татуировок и пигментных пятен).

Одним из важных применений лазеров является получение и исследование высокотемпературной плазмы. Эта область их применения связана с развитием нового направления – лазерного управляемого термоядерного синтеза.

Создание лазеров – результат использования фундаментальных физических законов в прикладных исследованиях. Оно послужило стимулом гигантского прогресса в различных областях техники и технологии.

Контрольные вопросы

1. Назовите основные идеи КПКМ.
2. Какие величины называются квантованными? Приведите примеры квантованных величин.
3. Расскажите об открытии электрона.
4. Опишите опыт Милликена, доказавшего дискретность электрического заряда.
5. Почему изучение теплового излучения явилось первым шагом к открытию квантовой механики?
6. Что такое ультрафиолетовая катастрофа? В чём заключается гипотеза, выдвинутая Планком для вывода закона распределения энергии в спектре абсолютно чёрного тела?
7. Какое физическое явление называется фотоэффектом? Сформулируйте три закона фотоэффекта.
8. Запишите и объясните уравнение Эйнштейна для фотоэффекта.
9. Чем отличались взгляды Планка и Эйнштейна на проблему квантования?
10. В чём суть эффекта Комптона? В чём заключалось противоречие между результатами опыта Комптона и классической теорией рассеяния волн? Что подтвердил эффект Комптона?
11. Что такое фотон? Чему равны энергия и импульс фотона?

12. В чём суть концепции корпускулярно-волнового дуализма света?
13. В чём заключалось противоречие планетарной модели строения атома с законами классической физики?
14. Сформулируйте квантовые постулаты Бора.
15. В чём заключается принципиальная новизна представлений о свойствах атомов в теории Бора?
16. В чём состоит гипотеза де Бройля?
17. Какие экспериментальные факты свидетельствуют о существовании волновых свойств у микрочастиц вещества?
18. Сформулируйте соотношение неопределённостей для координаты и импульса; для времени и энергии.
19. В чём заключается принципиальное отличие квантово-механического описания состояния системы от классического описания? Какова физическая интерпретация волновой функции?
20. Запишите основное уравнение нерелятивистской квантовой механики. Какие сведения о квантово-механической системе можно получить на основании решения уравнения Шрёдингера?
21. Что такое квантовое поле?
22. Что представляет собой физический вакуум?
23. Сформулируйте основные принципы КПКМ: принцип неопределённости, принцип дополнительности, принцип тождественности, принцип соответствия.
24. Как следует понимать принцип причинности в рамках КПКМ?
25. Сформулируйте основные положения КПКМ.
26. Какие физические характеристики квантово-механической системы (атома) определяются главным квантовым числом, орбитальным квантовым числом и магнитным квантовым числом?
27. Что такое спин микрочастицы?
28. Охарактеризуйте основные группы элементарных частиц.
29. Из каких частиц состоит атомное ядро? Что такое массовое число? Зарядовое число?
30. Чем отличаются ядра атомов разных изотопов данного химического элемента?
31. Что называется естественной радиоактивностью? Каков состав радиоактивного излучения?
32. Запишите и объясните закон радиоактивного распада.
33. Что называется ядерной реакцией? Опишите цепную реакцию деления тяжёлых ядер и реакцию синтеза лёгких ядер.
34. Что такое микроэлектроника? В чём состоит роль микроэлектроники в научно-техническом прогрессе?
35. Что такое наноэлектроника?
36. Что такое лазер? Опишите принцип действия рубинового лазера. Охарактеризуйте основные особенности лазерного излучения.
37. Какова роль КПКМ в развитии современной цивилизации?

ЛАБОРАТОРНЫЕ РАБОТЫ

Лабораторная работа №1 ИССЛЕДОВАНИЕ КАЧЕСТВА ПОЛИРОВАННОЙ ПОВЕРХНОСТИ С ПОМОЩЬЮ МИКРОИНТЕРФЕРОМЕТРА ЛИННИКА

Цель работы – получение практических навыков работы с высокоточным измерительным оптическим прибором и определение качества полированной поверхности исследуемого образца.

Приборы и принадлежности – микроинтерферометр Линника; исследуемый образец.

1. ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

Интерференция света.

Методы получения когерентных пучков

Интерференцией (от лат. *inter* – взаимно и *ferio* – ударяю) света называется явление пространственного перераспределения энергии светового излучения при наложении двух или нескольких световых волн.

Впервые явление интерференции обнаружили в XVII в. независимо друг от друга английские физики **Роберт Бойль** (1627–1691 гг.) и **Роберт Гук** (1635–1703 гг.). Они наблюдали разноцветную окраску тонких плёнок (масляных или бензиновых пятен на поверхности воды).

Открытое ими явление исследовал И. Ньютон, однако он не смог его объяснить с точки зрения своей *корпускулярной теории света*. Правильное объяснение интерференции света как типично волнового явления было дано только в начале XIX века английским учёным **Томасом Юнгом** (1773–1829 гг.) и французским физиком **Огюстеном Френелем** (1788–1826 гг.).

В 1801 году Юнг ввёл *принцип суперпозиции* и объяснил «цветастость» тонких пленок интерференцией лучей, отражённых от внешней и внутренней поверхности плёнки. Толщина плёнки обычно меняется от места к месту, поэтому она окрашивается во все цвета радуги.

Устойчивая во времени интерференционная картина – *ряд чередующихся тёмных и светлых полос* – может наблюдаться только при наложении когерентных волн.

Когерентными называются волны с одинаковой частотой, поляризацией и постоянной разностью фаз.

Юнг был первым, кто понял, что волны от двух разделённых в пространстве и не зависящих друг от друга источников света не когерентны. Поэтому он пропустил в тёмную комнату солнечный свет через узкую щель S (шириной около 1 мкм), затем с помощью двух щелей S_1 и S_2 такой же ширины, находящихся друг от друга на расстоянии d порядка нескольких микрон, разделил этот пучок света на два (рис. 1.1). Проходя через каждую из щелей, световой пучок расширился вследствие дифрак-

ции, поэтому на белом экране Э световые пучки, прошедшие через щели S_1 и S_2 , перекрывались. В области перекрытия световых пучков наблюдалась устойчивая интерференционная картина в виде чередующихся светлых и темных полос. В центре экрана видна полоса белого солнечного света. Остальные интерференционные максимумы окрашены.

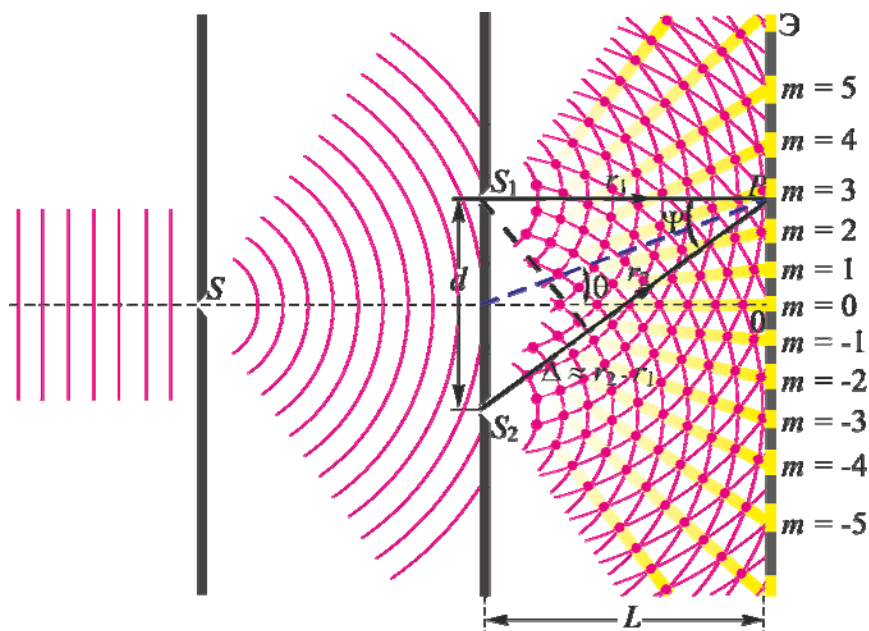


Рис. 1.1. Опыт Юнга

В своём опыте Юнг достаточно точно определил длину световой волны: для крайней фиолетовой части спектра он получил значение длины волны 0,42 мкм, для красного света – 0,7 мкм.

Таким образом, в классическом опыте Юнга когерентные световые пучки были получены путём разделения и последующего сведения лучей, исходящих от общего источника света.

Разделение света на когерентные пучки можно осуществить и другими методами: с помощью зеркал и преломляющих поверхностей (метод зеркал Френеля, метод зеркала Ллойда, метод бипризмы Френеля, метод тонких пленок и др.).

Рассмотрим некоторые из них.

1) Зеркало Ллойда

В опыте, предложенном ирландским физиком **Хэмфри Ллойдом** (1800–1881 гг.), источником света S служит узкая щель, параллельная плоскости зеркала (рис. 1.2). Расходящийся световой пучок от источника падает на плоское зеркало MM' (зеркало Ллойда), расположенное перпендикулярно к экрану NN' . Отразившись от зеркала, он попадает на экран. Этот пучок света можно представить исходящим от мнимого изображения источника света S' , образованного зеркалом. Кроме того, на экран попадают лучи, идущие непосредственно от источника света S . В той области экрана, где перекрываются оба пучка света, т.е. накладываются две когерентные волны, наблюдается интерференционная картина.

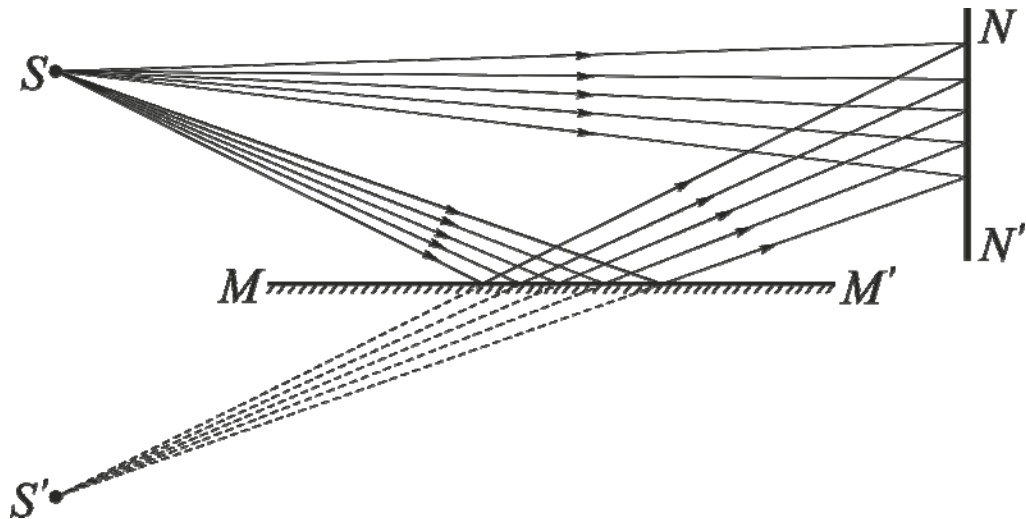


Рис. 1.2. Опыт Ллойда

Особенность интерференционной картины, наблюдаемой с помощью зеркала Ллойда, заключается в том, что центральная полоса получается не светлой, а темной. Это указывает на то, что лучи, проходящие одинаковые геометрические пути, все же сходятся в опыте Ллойда с разностью хода $\frac{\lambda}{2}$. Такая «потеря» полуволны (или, другими словами, изменение фазы на π) происходит при отражении света от поверхности стекла, коэффициент преломления которого больше, чем воздуха.

2) Зеркала Френеля

Френель предложил в качестве двух когерентных источников воспользоваться двумя изображениями одного и того же действительного источника света S в двух плоских зеркалах OA_1 и OA_2 , образующих двугранный угол φ , отличающийся от 180° всего на несколько угловых минут.

Схема опыта Френеля представлена на рис. 1.3.

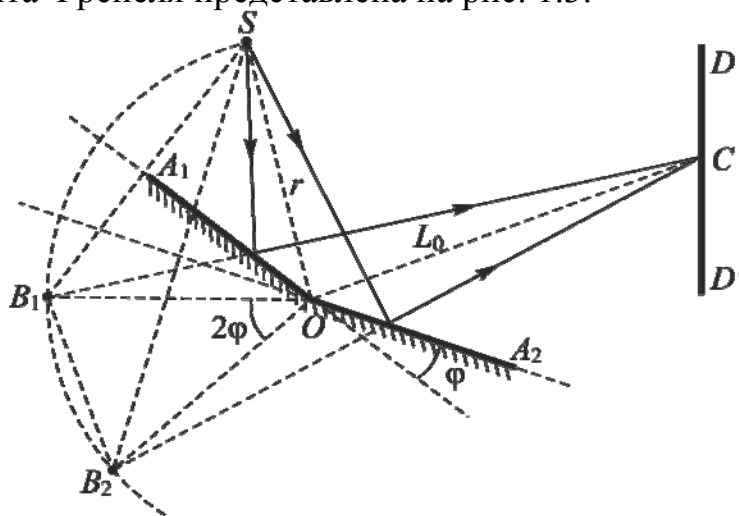


Рис. 1.3. Зеркала Френеля:

r – расстояние от источника света до места соприкосновения зеркал

Для построения изображений источника S в обоих зеркалах воспользуемся тем, что мнимое изображение, даваемое плоским зеркалом, лежит за зеркалом на таком же расстоянии, на каком источник расположен перед зеркалом. Проведем из точки O окружность с радиусом $r = OS$ и опустим из точки S перпендикуляр на продолжение прямой OA_1 . Точка пересечения продолжения этого перпендикуляра с окружностью B_1 является мнимым изображением источника S в первом зеркале OA_1 . Аналогично строится мнимое изображение B_2 источника во втором зеркале OA_2 .

На экране, где пучки, отражённые от зеркал, перекрываются, наблюдается интерференционная картина в виде равноотстоящих тёмных и светлых полос.

3) Бипризма Френеля

Бипризма Френеля состоит из двух стеклянных призм, соединённых боковыми сторонами (рис. 1.4).

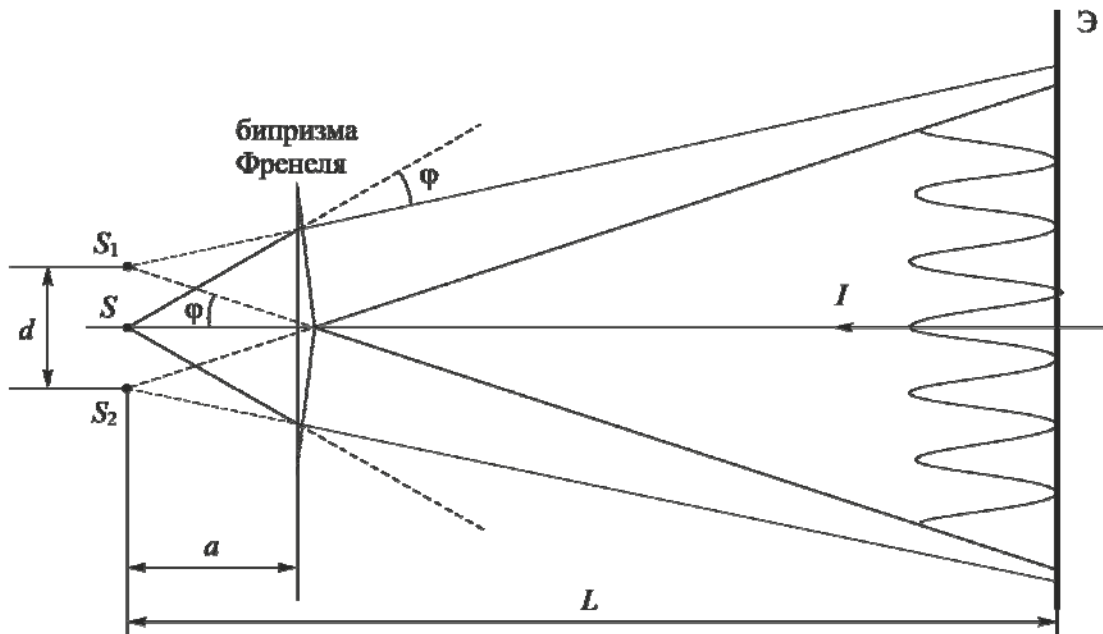


Рис. 1.4. Получение когерентных пучков с помощью бипризмы Френеля: φ – преломляющий угол призмы; n – абсолютный показатель преломления материала призмы

Свет от источника S преломляется в обеих призмах, в результате чего за призмой распространяются пучки, как бы исходящие от мнимых источников S_1 и S_2 , разнесённых на расстояние $d = a(n - 1)\varphi$ и являющихся когерентными. На экране, расположенном за бипризмой, эти пучки интерферируют.

Интерференционную картину, создаваемую когерентными волнами, можно наблюдать визуально, фотографировать, измерять расстояние между светлыми и темными полосами и т.д. Некогерентные лучи не дают

стабильной интерференционной картины. Непрерывное изменение фаз складываемых колебаний в каждой точке пространства создает быстро меняющуюся картину, которую невозможно использовать для измерительных целей.

Закономерности интерференции

Пусть волны от двух точечных источников света S_1 и S_2 одинаковой частоты ω и одинаковой поляризации (в этом случае можно отвлечься от векторного характера электрического поля световой волны) освещают экран X (рис. 1.5).

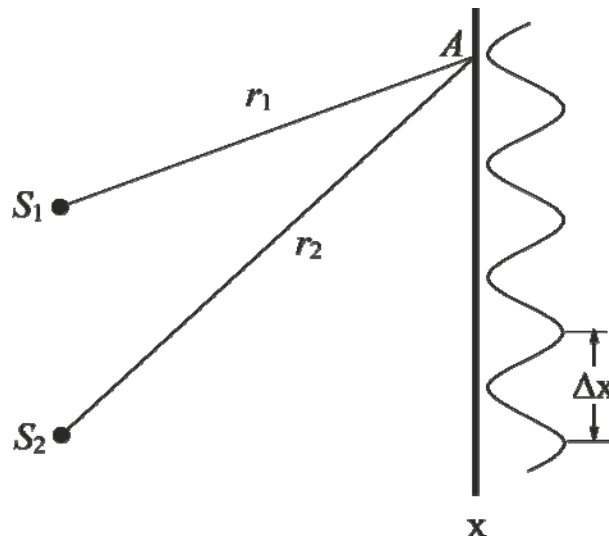


Рис. 1.5. Интерференция света

Определим интенсивность света в точке A экрана.

Электрические векторы волн в точке A соответственно равны

$$E_1 = E_{01} \cos(\omega t - kr'_1 + \alpha_1), \quad E_2 = E_{02} \cos(\omega t - kr'_2 + \alpha_2), \quad (1.1)$$

где $r'_1 = nr_1$ и $r'_2 = nr_2$ – оптические пути, пройденные волнами от источников S_1 и S_2 до точки A в среде с абсолютным показателем преломления n ;

$k = \frac{2\pi}{\lambda_0}$ – волновое число; λ_0 – длина волны в вакууме; E_{01} и E_{02} – амплитуды напряженностей электромагнитных волн в точке A ; α_1 и α_2 – начальные фазы.

Вводя обозначения

$$\varphi_1 = -kr'_1 + \alpha_1 \quad \text{и} \quad \varphi_2 = -kr'_2 + \alpha_2, \quad (1.2)$$

перепишем уравнения (1.1) в виде

$$E_1 = E_{01} \cos(\omega t + \varphi_1), \quad E_2 = E_{02} \cos(\omega t + \varphi_2). \quad (1.3)$$

Амплитуду результирующего колебания \vec{E}_0 легко найти с помощью векторной диаграммы, изображенной на рис. 1.6.

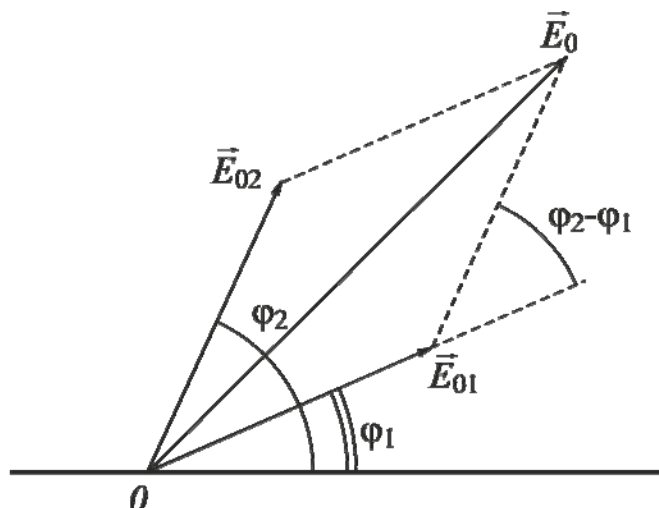


Рис. 1.6. Векторная диаграмма для определения амплитуды результирующего колебания

По теореме косинусов

$$E_0^2 = E_{01}^2 + E_{02}^2 + 2E_{01}E_{02} \cos(\varphi_2 - \varphi_1). \quad (1.4)$$

Учитывая, что интенсивности волн пропорциональны квадратам их амплитуд, выразим интенсивность результирующего колебания по формуле

$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos(\varphi_2 - \varphi_1). \quad (1.5)$$

Так как в реальных некогерентных источниках излучателями являются отдельные атомы, не связанные друг с другом, то разность фаз $(\varphi_2 - \varphi_1)$ непрерывно изменяется, принимая с равной вероятностью любые значения, так что среднее по времени значение $\cos(\varphi_2 - \varphi_1)$ равно нулю. В этом случае интенсивность волны во всех точках экрана I_{cp} равна сумме интенсивностей складываемых волн:

$$I_{\text{cp}} = I_1 + I_2. \quad (1.6)$$

Интенсивность света во всех точках экрана просто равна сумме интенсивностей, что соответствует закону сохранения энергии. Поэтому при сложении некогерентных волн интерференция не возникает.

Если же разность фаз возбуждаемых волнами колебаний равна нулю или остается постоянной во времени, то волны являются *когерентными*.

Источники таких волн также когерентны. В этом случае $\cos(\varphi_2 - \varphi_1)$ имеет постоянное во времени, но свое для каждой точки экрана значение, в результате чего в одних местах возникают максимумы интенсивности, а в других – минимумы, т.е. наблюдается интерференционная картина.

Рассмотрим случай сложения когерентных колебаний от двух *синфазных* источников ($\alpha_1 = \alpha_2$).

При $\cos(\varphi_2 - \varphi_1) = 1$, т.е. при $\varphi_2 - \varphi_1 = 2\pi m$ (где целое число $m = 0, 1, 2, \dots$, называемое порядком интерференционного максимума), интенсивность результирующего колебания будет максимальна и равна

$$I_{\max} = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2}. \quad (1.7)$$

При $\cos(\varphi_2 - \varphi_1) = -1$, т.е. при $\varphi_2 - \varphi_1 = (2m + 1)\pi$, интенсивность результирующего колебания будет минимальной:

$$I_{\min} = I_1 + I_2 - 2\sqrt{I_1 I_2}. \quad (1.8)$$

Принимая во внимание обозначения (1.2), можно выразить разность фаз ($\varphi_2 - \varphi_1$) по формуле

$$\varphi_2 - \varphi_1 = \frac{2\pi}{\lambda_0} n(r_2 - r_1), \quad (1.9)$$

где $nr_2 - nr_1 = \Delta$ – оптическая разность хода волн.

С учетом формулы (1.9), условия возникновения максимумов и минимумов интенсивности результирующей волны можно записать в виде:

$$I = I_{\max}, \text{ если } \Delta = m\lambda, \quad (1.10)$$

$$I = I_{\min}, \text{ если } \Delta = (2m + 1)\frac{\lambda}{2}. \quad (1.11)$$

Интерференционные максимумы наблюдаются в точках пространства, для которых *оптическая разность хода интерферирующих волн равна целому числу длин волн*.

Интерференционные минимумы наблюдаются в точках пространства, для которых *оптическая разность хода интерферирующих волн равна нечётному числу полуволн*.

Таким образом, суммарная интенсивность зависит от положения точки наблюдения. На экране будут наблюдаться светлые и тёмные интерференционные полосы. Интенсивность I периодически изменяется вдоль оси X от I_{\min} до I_{\max} . Пространственный период изменения интенсивности ΔX называется шириной интерференционной полосы (см. рис.1.5).

Применение интерференции

Явление интерференции света находит широкое применение в современной технике. Например, интерференция света в тонких плёнках используется для просветления оптики.

Просветление оптики – это уменьшение отражения света от поверхности линзы в результате нанесения на неё специальной плёнки.

Отполированная поверхность стекла отражает примерно 4 % падающего на неё света. Современные оптические приборы состоят из большого числа деталей, изготовленных из стекла. Проходя через каждую из этих деталей, свет ослабляется на 4 %. Общие потери света в объективе фотоаппарата составляют примерно 25 %, в призмённом бинокле и микроскопе – 50 %.

Для уменьшения световых потерь в оптических приборах все стеклянные детали, через которые проходит свет, покрывают тонкой плёнкой, толщина и показатель преломления n которой выбираются с таким расчётом, чтобы в отражённом свете возник интерференционный минимум. В результате в проходящем свете возникает интерференционный максимум, т.е. через линзу пройдёт больше света, чем при отсутствии плёнки. Таким образом, оптика просветляется.

Чаще всего для просветления оптики используют прозрачный материал MgF_2 с показателем преломления $n=1,38$, меньшим, чем показатель преломления стекла ($n_c = 1,5$).

При отражении света от границ раздела воздух–плёнка и плёнка–стекло возникает интерференция когерентных лучей 1' и 2' (рис. 1.7). Чтобы эти лучи гасили друг друга, их амплитуды должны быть равны, а в оптической разности хода Δ должна укладываться полуволна

$$\Delta = \frac{\lambda}{2}. \quad (1.12)$$

С другой стороны, при падении луча перпендикулярно плёнке,

$$\Delta = 2d, \quad (1.13)$$

где d – толщина пленки.

Из уравнений (1.12) и (1.13) следует, что минимальная толщина просветляющей плёнки составляет четверть длины волны

$$d = \frac{\lambda}{4}. \quad (1.14)$$

Интерференция света широко используется при спектральном анализе для точного измерения расстояний и углов.



Рис.1.7. Просветляющее покрытие

С помощью интерферометров – приборов, в которых явление интерференции используется для прецизионных (весьма точных измерений), можно измерить коэффициенты линейного расширения твёрдых тел, а также измерить весьма малое изменение размеров ферромагнетиков в магнитном поле или сегнетоэлектриков в электрическом поле (магнито-стрикционный и электрострикционный эффекты).

С помощью интерференционных методов измеряют коэффициенты преломления веществ, в частности газов; определяют весьма малые концентрации примесей в жидкостях и газах; проверяют качество шлифовки поверхностей. Если на исследуемой поверхности имеется царапина или вмятина, то это приводит к искривлению интерференционных полос. По характеру искривления полос можно судить о глубине царапины.

2. ОПИСАНИЕ ИНТЕРФЕРОМЕТРА И МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЯ

Оптические измерительные приборы, действие которых основано на использовании явления интерференции света, называют интерферометрами.

Для получения двух когерентных световых пучков в интерферометрах используют светоделитель, выполненный либо в виде полупрозрачного зеркала, либо в виде призмы-куба с полупрозрачной гипотенузой. Светоделитель расщепляет световую волну на две части – отражённую и прошедшую через него. Полученные таким образом когерентные волны проходят различные оптические пути, отражаются от специальных зеркал и с помощью того же светоделителя направляются в объектив микроскопа или зрительной трубы, с помощью которых и наблюдают интерференционную картину.

На рис. 1.8 показана оптическая схема интерферометра Линника. В качестве светоделителя в интерферометре используется призма-куб с полупрозрачной гипотенузой. Роль одного из зеркал выполняет изучаемая поверхность.

Параллельный пучок света от источника направляется на светоделитель и разделяется им на два пучка 1 и 2. Первый пучок, отразившись от зеркала и от полупрозрачной гипотенузы светоделителя, попадает в объектив микроскопа. Второй пучок, отразившись от исследуемой поверхности и пройдя сквозь посеребренную гипотенузу куба, также

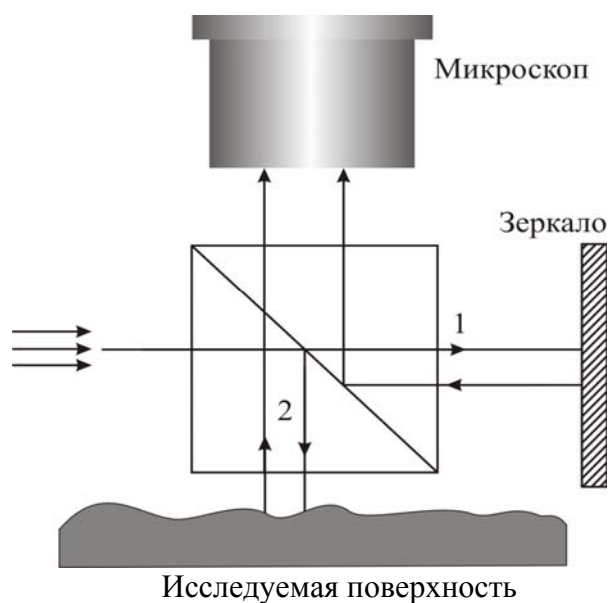


Рис. 1.8. Оптическая схема интерферометра Линника

поступает в микроскоп. Эти лучи когерентны и интерферируют. В микроскопе наблюдается интерференционная картина. Её характер определяется разностью хода, возникающей при прохождении пучков лучей 1 и 2 от полупрозрачной гипотенузы куба до соответствующих зеркал и обратно. Если исследуемая поверхность – идеально плоское зеркало, установленное перпендикулярно основному зеркалу, то все поле зрения микроскопа будет ровно освещено, т.к. все лучи 1 и 2 пучков будут иметь одну и ту же разность хода. Степень освещенности поля микроскопа будет зависеть от того, чему равна эта разность хода. Если $\Delta = m\lambda$, то освещение максимально, а если $\Delta = (2m + 1)\frac{\lambda}{2}$, то поле тёмное.

Если одно из зеркал повернуть на небольшой угол, то разность хода лучей будет линейно изменяться по поверхности зеркал, и в микроскопе будет наблюдаться интерференционная картина в виде чередующихся светлых и темных полос. Если исследуемая поверхность имеет дефекты, то в местах выступов или впадин интерференционные полосы искривляются. Искривление полос вызывается изменением длины пути, проходимого теми лучами светового пучка 2, которые отражаются от впадин или выступов. Величина искривления полос тем больше, чем больше высота неровности или глубина царапины (рис. 1.9).

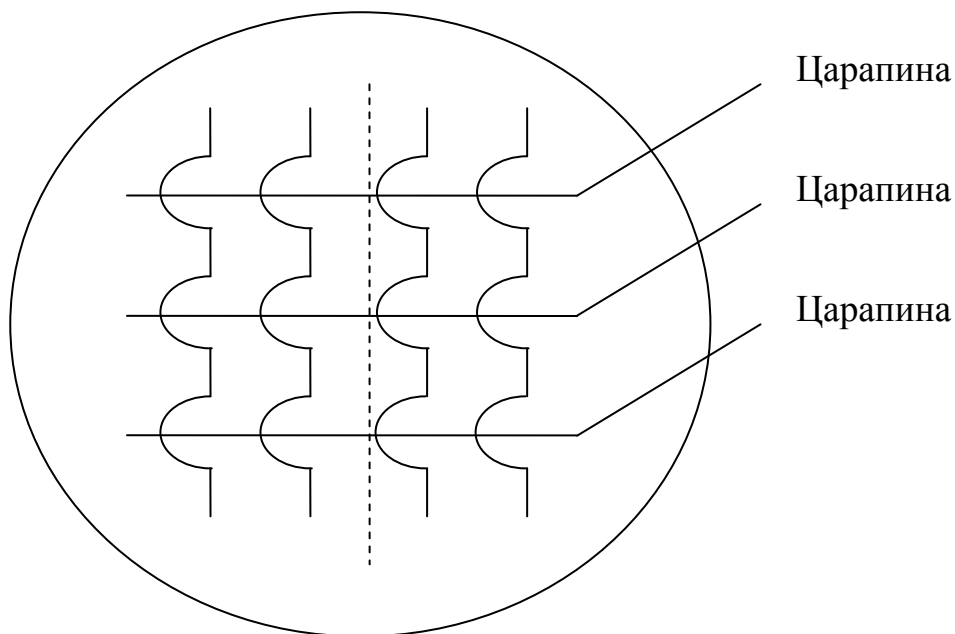


Рис. 1.9. Искривление интерференционных полос

В данной работе используется микроинтерферометр Линника МИИ-4, предназначенный для визуальной оценки, а также измерений и фотографирования высоты неровностей обработанных поверхностей.

В поле зрения микроинтерферометра МИИ-4 видны одновременно исследуемая поверхность и интерференционные полосы (при использовании ахроматического света это цветные линии).

Измерение величины искривления и расстояния между полосами (интервала или периода интерференционной картины) осуществляется винтовым окулярным микрометром МОВ-1-15, который прилагается к интерферометру.

Прибор МИИ-4 позволяет измерять высоты неровностей в пределах от 1 до 0,03 мкм, что соответствует чистоте обработки поверхности с 10-го по 14-й класс включительно по ГОСТ 2789–73* (всего, в зависимости от качества обработки, поверхности оцениваются по ГОСТ 2789–73* по 14 классам шероховатости).

3. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ НА МИКРОИНТЕРФЕРОМЕТРЕ

Настройка микроинтерферометра

1. Включите лампу 12 и положите испытуемую деталь 11 на столик прибора исследуемой поверхностью вниз (к объективу) (рис. 1.10). Для настройки правильного освещения необходимо обратиться к лаборанту.

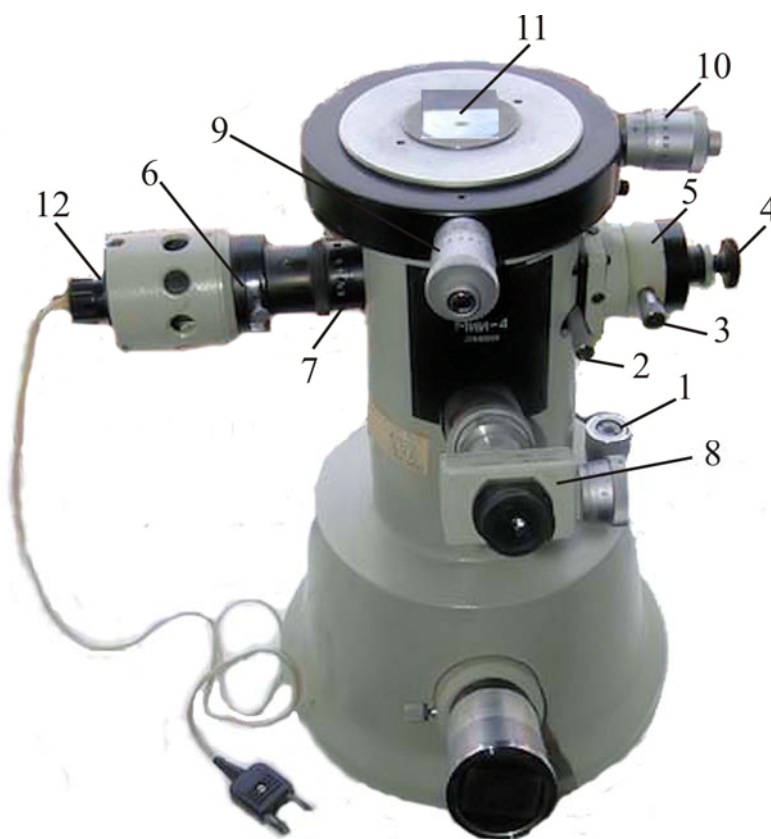


Рис. 1.10. Микроинтерферометр Линника

2. Поверните рукоятку 2 так, чтобы отгравированная на ней стрелка расположилась вертикально, и с помощью микрометрического винта 4 сфокусируйте интерферометр на исследуемую поверхность (получите ее резкое изображение).

3. Поворотом рукоятки 2 включите головку объектива 5 (стрелка на рукоятке должна расположиться горизонтально); при этом в поле зрения должны быть видны интерференционные полосы (аналогичные изображенным на рис. 1.9).

4. С помощью микрометрического винта 1 добейтесь наиболее резкого изображения полос и такого положения, при котором в поле зрения будут видны одновременно изображение контролируемой поверхности и интерференционная картина.

5. Для получения бóльшей контрастности полос рекомендуется поворотом кольца 7 несколько уменьшить отверстие апертурной диафрагмы.

6. Необходимый для работы интервал между полосами интерференционной картины установите вращением головки винта 3 вокруг собственной оси.

7. Поворотом винта 3 вокруг оси головки объектива 5 установите интерференционные полосы перпендикулярно штриху (исследуемой царапине) на испытываемой поверхности.

8. Для работы с монохроматическим светом включите один из светофильтров, сдвинув пластину 6 до упора.

Измерение с помощью винтового окулярного микрометра и обработка результатов

Оценка качества полированной поверхности производится по результатам ряда измерений, выполняемых с помощью окулярного микрометра. Перед началом измерений следует, поворачивая окулярный микрометр 8 вокруг своей оси, выставить его так, чтобы подвижный индекс, состоящий из двух рисок, совпал с направлением интерференционных полос (в неискривленной их части) (рис. 1.11).

Затем для определения высоты или глубины одной из находящихся в поле зрения микроинтерферометра неровностей выполните следующие операции:

- а) измерьте интервал между интерференционными полосами d ;
- б) измерьте высоту изгиба полосы ΔN ;
- в) вычислите глубину или высоту неровности h по формуле

$$h = 0,5\lambda \Delta N/d, \quad (1.15)$$

где λ – среднее значение длины волны используемого освещения: для белого света (в отсутствии светофильтра) принимается $\lambda = 0,54$ мкм, в случае

желтого светофильтра – $\lambda = 0,59$ мкм, а в случае зеленого светофильтра – $\lambda = 0,55$ мкм.

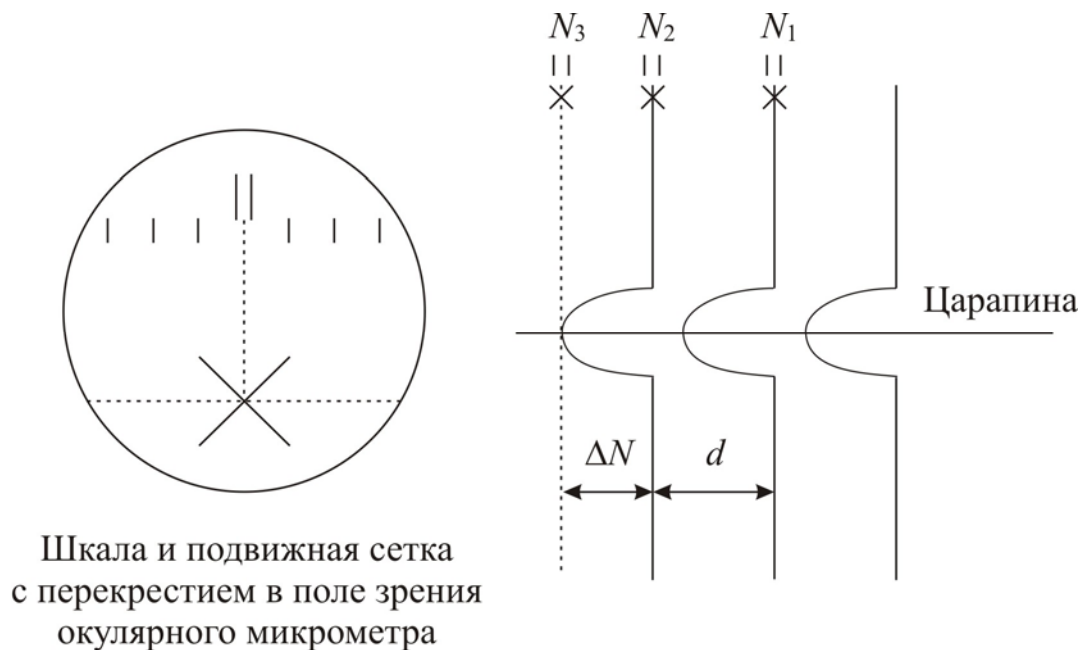


Рис. 1.11. Измерение величин d и ΔN с помощью винтового окулярного микрометра

Для определения интервала между интерференционными полосами и высоты их изгиба перекрестие в поле зрения окулярного микрометра совместите с серединой одной из тёмных полос, а затем по неподвижной шкале в поле зрения и по барабану микрометрического винта произведите отсчет величины N_1 . Полные миллиметры отсчитываются по шкале, десятые и сотые доли миллиметра – по барабану винта. Вращая барабан микрометрического винта, совместите перекрестие с серединой соседней тёмной полосы и произведите отсчет величины N_2 , а затем наведите перекрестие на вершину изгиба этой полосы и произведите отсчет величины N_3 . По формулам

$$d = |N_1 - N_2|, \quad (1.16)$$

$$\Delta N = |N_2 - N_3| \quad (1.17)$$

вычислите интервал между интерференционными полосами и высоту изгиба. Локальную глубину неровности h определите по формуле (1.15).

Пункты «а», «б» и «в» для одной и той же царапины следует повторить еще два раза, выбирая в качестве начальной каждый раз другую интер-

ференционную линию. Среднее значение глубины выбранной неровности найдите путём усреднения

$$\langle h \rangle_k = \frac{1}{I} \sum_{i=1}^I h_i, \quad (1.18)$$

где I – число измерений, выполненных для k -й царапины.

Все измеренные и вычисленные величины занесите в табл. 1.1.

Т а б л и ц а 1.1

| № царапины | № измерения | N_1 , мм | N_2 , мм | N_3 , мм | d_i , мм | ΔN_i , мм | h_i , мкм | $\langle h \rangle_k$, мкм | $\langle\langle h \rangle\rangle$, мкм |
|------------|-------------|------------|------------|------------|------------|-------------------|-------------|-----------------------------|---|
| 1 | 1 | | | | | | | | |
| | 2 | | | | | | | | |
| | 3 | | | | | | | | |
| 2 | 1 | | | | | | | | |
| | 2 | | | | | | | | |
| | 3 | | | | | | | | |
| 3 | 1 | | | | | | | | |
| | 2 | | | | | | | | |
| | 3 | | | | | | | | |

Перемещая столик с образцом винтами 9 и 10 (см. рис. 1.11), в поле зрения окулярного микрометра введите другую неровность и для неё произведите описанные выше измерения и расчёты.

Для получения усредненного значения неровности по всей исследуемой поверхности

$$\langle\langle h \rangle\rangle = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K \langle h \rangle_k \quad (1.19)$$

необходимо найти среднюю высоту или глубину как минимум трех неровностей на этой поверхности. В формуле (1.19) K – число исследованных царапин.

Получив значение $\langle\langle h \rangle\rangle$, определите класс шероховатости поверхности по табл. 1.2, в которой приведены предельные значения $\langle\langle h \rangle\rangle$ для пяти классов шероховатости поверхности по ГОСТ 2789–73.

Т а б л и ц а 1.2

| Класс шероховатости | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 |
|---|---------|----------|-----------|-----------|---------|
| $\langle\langle h \rangle\rangle$, мкм | 0,5–0,8 | 0,25–0,5 | 0,12–0,25 | 0,06–0,12 | до 0,06 |

Примечание. Если царапина имеет глубину h за пределами классов 10–14, то прибор МИИ-4 измерения не выполнит.

4. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ НА КОМПЬЮТЕРНОЙ МОДЕЛИ

1. На экране монитора в меню «Физическая лаборатория», подведя курсор и щёлкнув левой кнопкой мыши, откройте раздел «Оптика и квантовая физика». Затем этой же кнопкой выберите лабораторную работу «Исследование качества полированной поверхности с помощью микроинтерферометра Линника» и, подведя курсор, активируйте клавишу «Выполнить». При этом откроется окно с изображением и описанием имитируемого прибора. Ознакомившись с прибором, активируйте левой кнопкой мыши клавишу «Выполнить» и войдите в окно с изображением поля зрения окулярного микрометра, вспомогательного рисунка и таблицы, в которую компьютерная программа будет заносить результаты измерений.

2. Выберите в поле зрения окулярного микрометра одну из царапин.

3. Совместите перекрестие окулярного микрометра с центральной линией любой тёмной интерференционной полосы этой царапины (в пределах неискривленного участка линии, т.е. выше или ниже изгиба). Управляйте перекрестием с помощью стрелок клавиатуры.

4. Нажав кнопку «Записать», занесите значение N_1 в экранную таблицу.

5. Переместите перекрестие на соседнюю центральную линию и, нажав кнопку «Записать», занесите значение N_2 в экранную таблицу.

6. Перемещая перекрестие вверх или вниз, а затем вправо или влево, наведите его на вершину изгиба этой линии. Нажмите кнопку «Записать» и занесите значение N_3 в экранную таблицу.

7. Повторите п.п. 3-6 еще два раза, выбирая в качестве начальной линии каждый раз центральную линию другой тёмной интерференционной полосы. Результаты измерений перенесите с экранной таблицы в табл. 1.1 тетради.

8. Нажмите кнопку «Новый опыт» и, выбрав в поле зрения окулярного микрометра новую царапину, повторите п.п. 3-7 с тем, чтобы получить девять наборов параметров N_1 , N_2 и N_3 для трёх царапин.

9. Используя формулы (1.15)–(1.18), вычислите значения локального интервала между интерференционными полосами d_i , высоты изгиба ΔN_i , глубины царапины h_i , а также среднее значение глубины каждой из трех исследованных царапин $\langle h \rangle_i$.

10. По формуле (1.19) вычислите усредненное значение глубин царапин по всей исследуемой поверхности $\langle\langle h \rangle\rangle$, а результаты всех вычислений занесите в табл. 1.1.

11. Используя полученное значение $\langle\langle h \rangle\rangle$ и данные табл. 1.2, определите класс шероховатости исследуемой поверхности.

Контрольные вопросы

1. Какое явление называют интерференцией света? Что такое интерференционная картина?
2. Каковы условия, необходимые для получения интерференционной картины?
3. Какие волны называются когерентными?
4. Опишите методы получения когерентных световых пучков (опыт Юнга, зеркало Ллойда, зеркала Френеля, бипризма Френеля).
5. Что такое оптическая разность хода?
6. Запишите и сформулируйте условия интерференционных максимумов и минимумов для двух синхронно излучающих источников.
7. Что такое интерферометр? Каков принцип работы интерферометра?
8. Почему искривляются интерференционные полосы в интерферометре?
9. Приведите примеры применения интерференции.
10. Почему интерференция считается одним из основных доказательств волновой природы света?

Лабораторная работа №2
ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛООВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ
АБСОЛЮТНО ЧЁРНОГО ТЕЛА

Цель работы – исследование температурной зависимости энергетической светимости абсолютно чёрного тела.

Приборы и принадлежности – установка ФПК-11, включающая **объект исследования** – термоизолированную электропечь с отверстием в передней стенке, моделирующую абсолютно чёрное тело; **термостолбик** – приёмник теплового излучения; **термоэлектрический термометр**; измерительное устройство.

1. ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

Из всех видов излучения наиболее распространённым является температурное, или тепловое.

Тепловым излучением называется электромагнитное излучение, возникающее за счет внутренней энергии излучающего тела и зависящее только от температуры и оптических свойств этого тела.

Тепловое излучение свойственно всем телам при температуре выше абсолютного нуля. Оно имеет сплошной спектр, т.е. содержит электромагнитные волны всех длин от нуля до бесконечности.

Характерная особенность теплового излучения состоит в том, что в адиабатно замкнутой (теплоизолированной) системе устанавливается тепловое равновесие между тепловым излучением и излучающим телом.

Количественной мерой энергии, излучаемой телом в единицу времени, является **поток (мощность) излучения** Φ_e , численно равный отношению энергии δQ_e , переносимой излучением за малый промежуток времени dt , к величине этого промежутка

$$\Phi_e = \frac{\delta Q_e}{dt}. \quad (2.1)$$

Поток теплового излучения, испускаемый с единицы площади поверхности излучателя в телесный угол 2π во всем интервале длин волн, называется энергетической светимостью тела M_e

$$M_e = \frac{\delta \Phi_e}{dS}. \quad (2.2)$$

Для характеристики распределения излучения по длинам волн, т.е. для оценки энергетической светимости в единичном спектральном диапазоне, используют **спектральную плотность энергетической светимости** $M_{e,\lambda}$ – физическую величину, численно равную отношению энергетической

светимости δM_e в малом спектральном интервале (от λ до $\lambda + d\lambda$) к ширине этого интервала

$$M_{e,\lambda} = \frac{\delta M_e}{d\lambda}. \quad (2.3)$$

Тогда суммарное излучение тела, т.е. его энергетическую светимость, можно рассчитать по формуле

$$M_e = \int_0^{\infty} M_{e,\lambda} d\lambda. \quad (2.4)$$

При падении на тело поток излучения в общем случае разделяется на три части: одна часть пропускается телом, другая отражается, а третья поглощается и, увеличивая внутреннюю энергию тела, повышает его температуру.

С количественной стороны эти части характеризуются:

коэффициентом пропускания

$$\tau = \frac{\Phi_{\text{пр}}}{\Phi_{0e}}, \quad (2.5)$$

коэффициентом отражения

$$\rho = \frac{\Phi_{\text{отр}}}{\Phi_{0e}} \quad (2.6)$$

и коэффициентом поглощения

$$\alpha = \frac{\Phi_{\text{погл}}}{\Phi_{0e}}, \quad (2.7)$$

где Φ_{0e} – поток (мощность) падающего излучения; $\Phi_{\text{пр}}$ – поток прошедшего излучения; $\Phi_{\text{отр}}$ – поток отражённого излучения; $\Phi_{\text{погл}}$ – поток поглощённого излучения.

Коэффициенты τ , ρ и α зависят от свойств самого тела и длины волны падающего излучения. Спектральная зависимость, т.е. зависимость коэффициентов от длины волны, определяет цвет как прозрачных, так и непрозрачных ($\tau = 0$) тел.

Согласно закону сохранения энергии

$$\Phi_{\text{отр}} + \Phi_{\text{погл}} + \Phi_{\text{пр}} = \Phi_{0e}. \quad (2.8)$$

Разделив обе части равенства (2.8) на Φ_{0e} , получим:

$$\tau + \rho + \alpha = 1. \quad (2.9)$$

Тело, для которого $\rho = 0$, $\tau = 0$, $\alpha = 1$, называется **абсолютно чёрным**.

Абсолютно чёрное тело – это тело, которое при любой не разрушающей его температуре полностью поглощает всю энергию падающего на него излучения любой длины волны. Все реальные тела не являются абсолютно чёрными. Однако некоторые из них в определенных интервалах длин волн близки по своим свойствам к абсолютно чёрному телу. Например, в области длин волн видимого света коэффициенты поглощения сажи, платиновой черни и черного бархата мало отличаются от единицы.

Наиболее совершенной моделью абсолютно чёрного тела может служить малое отверстие в замкнутой полости сферической формы. Свет, попадающий через отверстие внутрь полости, будет многократно отражаться от стенок, прежде чем сможет выйти наружу. При каждом отражении свет, независимо от материала стенок, частично поглощается. В результате многократных отражений внутри полости излучение будет практически полностью поглощено, и отверстие снаружи кажется совершенно чёрным. Очевидно, что эта модель тем ближе по характеристикам к чёрному телу, чем больше отношение площади поверхности полости к площади отверстия (рис. 2.1).

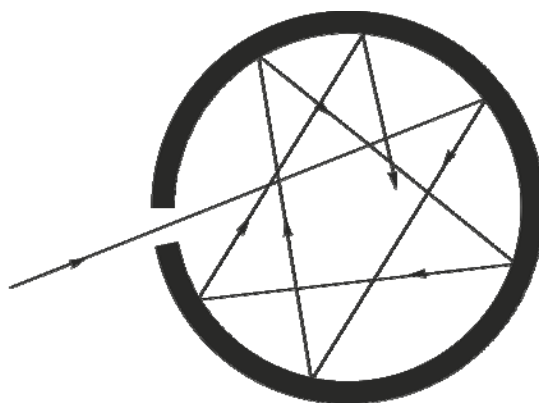


Рис. 2.1. Модель абсолютно чёрного тела

Каждое тело может не только испускать, но и поглощать тепловое излучение. Опыты показывают, что чем больше энергии тело излучает при некоторой постоянной температуре, тем сильнее оно поглощает излучение такого же спектрального состава при той же температуре.

Спектральной характеристикой поглощения электромагнитных волн телом является **спектральный коэффициент поглощения** α_λ – величина, определяемая отношением поглощённого телом потока излучения в малом спектральном интервале (от λ до $\lambda + d\lambda$) к потоку падающего на него излучения в том же спектральном интервале

$$\alpha_\lambda = \frac{\delta\Phi_{e\text{ погл}}}{\delta\Phi_{e\text{ пад}}} . \quad (2.10)$$

В 1859 г. немецкий физик **Густав Кирхгоф** (1824–1887 гг.) на основании второго начала термодинамики установил один из основных законов теплового излучения.

Закон Кирхгофа: *отношение спектральной плотности энергетической светимости равновесного излучения тела к его спектральному коэффициенту поглощения не зависит от природы тела; для всех тел оно является универсальной функцией длины волны излучения и температуры тела*

$$\frac{M_{e,\lambda}}{\alpha_\lambda} = f(\lambda, T). \quad (2.11)$$

Закон Кирхгофа был подтвержден опытным путём.

Для абсолютно чёрного тела $\alpha_\lambda = 1$. Поэтому из закона Кирхгофа следует, что

$$M_{e,\lambda}^0 = f(\lambda, T),$$

где $M_{e,\lambda}^0$ – спектральная плотность энергетической светимости абсолютно чёрного тела.

Таким образом, универсальная функция Кирхгофа $f(\lambda, T)$ представляет собой спектральную плотность энергетической светимости абсолютно чёрного тела. Поэтому выражение закона Кирхгофа (2.11) можно записать в виде

$$\frac{M_{e,\lambda}}{\alpha_\lambda} = M_{e,\lambda}^0. \quad (2.12)$$

Из формулы (2.12) следует, что:

1) для всех тел отношение спектральной плотности энергетической светимости к спектральному коэффициенту поглощения равно спектральной плотности энергетической светимости абсолютно чёрного тела при тех же значениях T и λ ;

2) спектральная плотность энергетической светимости любого тела в любой области спектра всегда меньше спектральной плотности энергетической светимости абсолютно чёрного тела (при одних и тех же значениях длины волны и температуры);

3) если тело при некоторой температуре не поглощает электромагнитные волны в интервале длин от λ до $\lambda + d\lambda$, то оно их в этом интервале длин при данной температуре и не излучает;

4) тело, которое при данной температуре сильнее поглощает, должно интенсивнее излучать. Например, при накаливании платиновой пластинки, часть которой покрыта платиновой чернью, её зачернённый конец светится значительно ярче, чем светлый.

Аналитический вид функции $f(\lambda, T)$ для абсолютно черного тела был установлен учеником Кирхгофа **Максом Планком** на основе *квантовых представлений о природе излучения*.

$$M_{e,\lambda}^0 = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5 \left(e^{\frac{hc}{kT\lambda}} - 1 \right)}, \quad (2.13)$$

где λ – длина волны излучения; T – температура излучающего тела; $c = 3 \cdot 10^8 \frac{\text{м}}{\text{с}}$ – скорость света в вакууме; $k = 1,38 \cdot 10^{-23} \frac{\text{Дж}}{\text{К}}$ – постоянная Больцмана; $h = 6,63 \cdot 10^{-34} \text{ Дж}\cdot\text{с}$ – постоянная Планка.

Спектр излучения абсолютно черного тела имеет характерный максимум (рис. 2.2), который при повышении температуры сдвигается в коротковолновую часть (рис. 2.3).

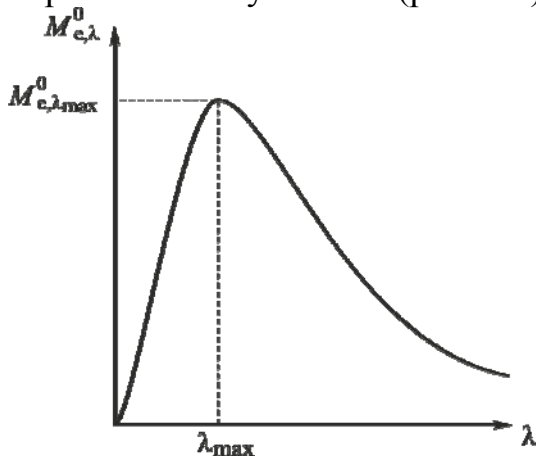


Рис. 2.2. Кривая распределения энергии в спектре абсолютно чёрного тела

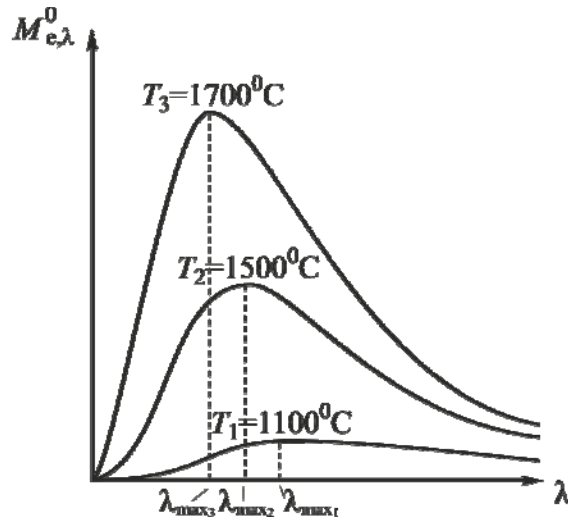


Рис. 2.3. Кривые спектральной плотности энергетической светимости при различной температуре излучающего тела

Положение максимума спектральной плотности энергетической светимости можно определить из выражения (2.13) обычным способом, приравняв к нулю первую производную:

$$\frac{dM_{e,\lambda}^0}{d\lambda} = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^6 \left(e^{\frac{hc}{kT\lambda}} - 1 \right)} \left(\left[\frac{\frac{hc}{kT\lambda} e^{\frac{hc}{kT\lambda}}}{e^{\frac{hc}{kT\lambda}} - 1} \right] - 5 \right) = 0. \quad (2.14)$$

Обозначив $\frac{hc}{kT\lambda_{\max}} = x$, получим:

$$xe^x - 5(e^x - 1) = 0. \quad (2.15)$$

Решение этого трансцендентного уравнения численным методом дает значение $x = 4,965$.

Следовательно,

$$\frac{hc}{kT\lambda_{\max}} = 4,965, \quad (2.16)$$

откуда

$$T\lambda_{\max} = \frac{hc}{4,965k} = b_1 = 2,898 \cdot 10^{-3} \text{ м} \cdot \text{К}, \quad (2.17)$$

$$\lambda_{\max} = \frac{b_1}{T}, \quad (2.18)$$

где b_1 – первая постоянная Вина.

Таким образом, функция $M_{e,\lambda}^0$ достигает максимума при длине волны, обратно пропорциональной термодинамической температуре абсолютно чёрного тела.

Эта зависимость была установлена в 1893 г. немецким физиком **Вильгельмом Вином** (1864–1928 гг.) на основе законов классической термодинамики и электромагнитной теории света. Её называют **законом смещения Вина**, подчёркивая тем самым, что с ростом температуры максимум спектральной плотности энергетической светимости сдвигается в сторону меньших длин волн (больших частот).

Из закона Вина следует, что при низких температурах излучаются преимущественно длинные (инфракрасные) электромагнитные волны. По мере же возрастания температуры увеличивается доля излучения, приходящаяся на видимую область спектра, и тело начинает светиться. С дальнейшим ростом температуры яркость свечения увеличивается, а цвет изменяется. Поэтому цвет излучения может служить характеристикой температуры излучения. Примерная зависимость цвета свечения тела от его температуры приведена в табл. 2.1.

Т а б л и ц а 2 . 1

| Цвет излучения | Красный, едва видимый | Тёмно-красный | Вишнёво-красный | Оранжевый | Белый |
|-----------------|-----------------------|---------------|-----------------|-----------|-------|
| Температура, °С | 550 | 700 | 900 | 1100 | 1400 |

Подставив формулу (2.18) в выражение (2.13), Вин показал, что *максимальное значение функции $M_{e,\lambda}^0$ пропорционально пятой степени термодинамической температуры тела*. Это утверждение носит название **второго закона Вина**. Он был получен в 1896 году.

Математическое выражение второго закона Вина имеет вид

$$M_{e,\lambda(\max)}^0 = b_2 T^5, \quad (2.19)$$

где b_2 – вторая постоянная Вина ($b_2 = 1,29 \cdot 10^5 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^3 \cdot \text{К}^5}$).

В 1911 г. Вильгельм Вин был удостоен Нобелевской премии по физике за работы по тепловому излучению.

Энергетическую светимость абсолютно чёрного тела можно найти из выражения (2.13) простым интегрированием по длине волны

$$M_e^0 = \int_0^\infty f(\lambda, T) d\lambda = \frac{\pi^2 k^4}{60c^2 \hbar^3} T^4, \quad (2.20)$$

где $\hbar = \frac{h}{2\pi}$ – приведённая постоянная Планка,

или

$$M_e^0 = \sigma T^4, \quad (2.21)$$

где $\sigma = \frac{\pi^2 k^4}{60c^2 \hbar^3}$.

Энергетическая светимость абсолютно чёрного тела пропорциональна четвёртой степени его термодинамической температуры.

Это положение носит название **закона Стефана – Больцмана**, по имени австрийских физиков **Йозефа Стефана** (1835–1893 гг.) и **Людвига Больцмана** (1844–1906 гг.).

Коэффициент пропорциональности $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}^4}$ называется постоянной Стефана – Больцмана.

Абсолютно чёрное тело является идеализацией реальных тел. Реальные тела испускают излучение, спектр которого не описывается формулой Планка. Их энергетическая светимость, кроме температуры, зависит от природы тела и состояния его поверхности. Эти факторы можно учесть, если в формулу (2.21) ввести коэффициент k_T , показывающий, во сколько раз энергетическая светимость абсолютно чёрного тела при данной температуре больше энергетической светимости реального тела при той же температуре

$$k_T = \frac{M_e}{M_e^0}, \quad (2.22)$$

откуда

$$M_e = k_T M_e^0,$$

или

$$M_e = k_T \delta T^4. \quad (2.23)$$

Для всех реальных тел $k_T < 1$ и зависит как от природы тела и состояния его поверхности, так и от температуры. В частности, для вольфрамовых нитей электроламп накаливания зависимость k_T от T имеет вид, представленный на рис. 2.4.

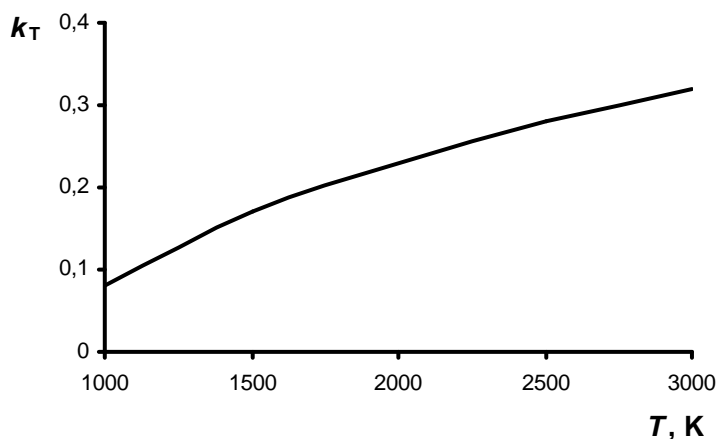


Рис. 2.4. Зависимость k_T от температуры T тела

2. МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЯ

Измерение энергии излучения и температуры электропечи основано на **эффекте Зеебека**, заключающемся в возникновении электродвижущей силы в электрической цепи, состоящей из нескольких разнородных проводников, контакты которых имеют различную температуру.

Два разнородных проводника образуют **термопару**, а последовательно соединенные термопары – **термостолбик**. Если контакты (обычно спаи) проводников находятся при различных температурах, то в замкнутой цепи, включающей термопары, возникает термоЭДС, величина которой однозначно определяется разностью температур горячих и холодных контактов, количеством последовательно соединенных термопар и природой материалов проводников.

Величина термоЭДС, возникающей в цепи за счет энергии падающего на спаи термостолбика излучения, измеряется милливольтметром, размещенным на передней панели измерительного устройства. Шкала этого прибора проградуирована в милливольтгах.

Температура абсолютно чёрного тела (печи) измеряется с помощью термоэлектрического термометра, состоящего из одной термопары. Её ЭДС измеряется милливольтметром, также расположенным на передней панели измерительного устройства и проградуированным в °С.

Примечание. Милливольтметр фиксирует разность температур горячего и холодного спаев термопары, поэтому для получения температуры печи необходимо к показанию прибора прибавить значение температуры в помещении.

В данной работе проводят измерение термоЭДС термостолбика, величина которой пропорциональна энергии, затраченной на нагревание одного из контактов каждой термопары столбика, и, следовательно, энергетической светимости (при равных интервалах времени между измерениями и неизменной площади излучателя):

$$M_e^0 = b \cdot \varepsilon, \quad (2.24)$$

где b – коэффициент пропорциональности.

Приравнивая правые части равенств (2.21) и (2.24), получаем, что

$$\sigma T^4 = b \cdot \varepsilon,$$

откуда
$$\frac{\varepsilon}{T^4} = \frac{\sigma}{b} = c,$$

где c – постоянная величина.

Одновременно с измерением термоЭДС термостолбика измеряют разность температур Δt горячего и холодного спаев термопары, помещенной в электропечь, и определяют температуру печи.

Используя экспериментально полученные значения температуры абсолютно черного тела (печи) и соответствующие им значения термоЭДС термостолбика, определяют значение коэффициента пропорциональности

$c \left(c = \frac{\varepsilon}{T^4} \right)$, которое во всех опытах должно быть одинаковым. Затем строят график зависимости $c = f(T)$, который должен иметь вид прямой, параллельной оси температур.

Таким образом, в лабораторной работе устанавливается характер зависимости энергетической светимости абсолютно черного тела от его температуры, т.е. проверяется закон Стефана – Больцмана.

3. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ И МЕТОДИКА ОБРАБОТКИ РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЕРИМЕНТА

1. Установите термостолбик так, чтобы его отверстие находилось напротив отверстия на передней панели печи на расстоянии 3 см от него.

2. Включите измерительное устройство и дайте ему прогреться в течение 5 мин. При этом на индикаторах термоЭДС приемника излучения и разности температур спаев термопары печи должны установиться значения не более 0,03 и 000 соответственно.

3. Включите печь, нажав синюю клавишу на передней панели печи (при этом выключатель вентилятора «ВЕНТ» должен быть в положении «ОТКЛЮЧЕНО»). По индикаторам измерительного устройства убедитесь в том, что температура печи увеличивается.

4. По мере нагрева печи, начиная с разности температур спаев от 100 °С до 700 °С, через каждые 50 °С записывайте в табл. 2.2 показания температуры печи Δt °С и соответствующие им показания индикатора термоЭДС ϵ . После этого выключатель «СЕТЬ» переведите в положение «ОТКЛЮЧЕНО» и включите вентилятор.

Т а б л и ц а 2.2

| Номер измерения i | $\Delta t_i,$ °С | $T_i,$ К | $\epsilon,$ мВ | $c_i,$ В/К ⁴ | $\Delta c_i,$ В/К ⁴ | $\delta c,$ % |
|------------------------|---------------------|-------------|-------------------|----------------------------|-----------------------------------|------------------|
| 1 | 100 | | | | | |
| ... | ... | | | | | |
| 13 | 700 | | | | | |
| | | | | $\langle c \rangle$ | $\langle \Delta c \rangle$ | |

5. После охлаждения печи до комнатной температуры отключите вентилятор и измерительное устройство.

6. Снимите показание настенного термометра лаборатории t_0 °С и для получения подлинных температур печи t °С к значениям температуры Δt_i °С прибавьте значение температуры в помещении ($t_i = t_0 + \Delta t_i$).

Выразите полученные температуры в Кельвинах ($T_i = t_i + 273$).

7. По формуле $c = \frac{\epsilon}{T^4}$ подсчитайте значение коэффициента c_i для каждого значения T_i и постройте график зависимости этого коэффициента от температуры печи $c = f(T)$.

8. Определите среднее значение $\langle c \rangle$ по всем измерениям и рассчитайте абсолютную Δc и относительную δc погрешности этой величины

$$\langle c \rangle = \frac{\sum_{i=1}^n c_i}{n}; \quad \langle \Delta c \rangle = \frac{\sum_{i=1}^n |\Delta c_i|}{n}; \quad \delta c = \frac{\langle \Delta c \rangle}{\langle c \rangle},$$

где $\Delta c_i = |c_i - \langle c \rangle|$; i – номер измерения; n – число измерений.

Контрольные вопросы

1. Что называется тепловым излучением? Какова физическая природа теплового излучения?

2. Является ли тепловое излучение равновесным? Почему?

3. Назовите величины, характеризующие тепловое излучение. Дайте определение каждой величины. Приведите формулы для расчёта характеристик теплового излучения.

4. Какое тело называется абсолютно чёрным? Опишите модель, близкую по своим свойствам к абсолютно чёрному телу.

5. Что такое спектральный коэффициент поглощения?

6. Сформулируйте закон Кирхгофа. В чём заключается физический смысл универсальной функции Кирхгофа?

7. Запишите формулу Планка. Каково её значение в теории теплового излучения?

8. Изобразите кривую распределения энергии в спектре излучения абсолютно чёрного тела.

9. Как изменяется кривая распределения энергии в спектре абсолютно чёрного тела с изменением температуры? Сформулируйте законы Вина.

10. Сформулируйте закон Стефана – Больцмана.

11. Каковы цель и порядок выполнения работы?

Лабораторная работа № 3 ОПРЕДЕЛЕНИЕ МАССЫ И ВРЕМЕНИ ЖИЗНИ К-МЕЗОНОВ

Цель работы – ознакомление с методами применения законов сохранения энергии, импульса, заряда и др. для идентификации элементарных частиц. Расчёт характеристик микрочастиц по фотографиям их треков.

Приборы и принадлежности: фотографии треков частиц, калька, транспортир, линейка с миллиметровой шкалой, графики зависимости длины пробега частиц от их кинетической энергии.

1. ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

Представления о том, что мир состоит из **элементарных частиц** (от лат. *elementarius* – первоначальный, простейший, основной), имеют долгую историю.

Впервые мысль о существовании мельчайших неделимых частиц вещества была высказана в IV веке до нашей эры греческим философом **Демокритом** (ок. 460 до н.э. – ок. 370 до н.э.). Он назвал эти частицы *атомами* (от греч. *atomos* – неразложимый).

Наука начала использовать представление об атомах только в начале XVIII в., так как к этому времени в работах французского химика **Антуана Лавуазье** (1743–1794 гг.), русского естествоиспытателя **Михаила Васильевича Ломоносова** (1711–1765 гг.), английского физика **Джона Дальтона** (1766–1844 гг.) была доказана реальность существования атомов. Однако в это время вопрос о внутреннем строении атомов даже не возникал, так как они по-прежнему считались неделимыми.

Во второй половине XIX в. в результате открытия явлений *ионизации атомов* **Майклом Фарадеем** и *радиоактивности* французским физиком **Антуаном Беккерелем** (1852–1908 гг.) ученые пришли к выводу, что в состав атомов входят электроны. Поскольку атом электронейтрален, то из этого следовало, что в нём должна быть положительно заряженная частица.

В 1911 г. существование такой частицы в атоме было доказано в опытах английского физика **Эрнеста Резерфорда** (1871–1937 гг.), а сама частица получила название *атомного ядра*. Опыт Резерфорда подтвердил, что *атомы не являются простейшими частицами, а имеют сложное строение*.

В 1919 г. Резерфорд обнаружил среди частиц, выбитых из атомных ядер, положительно заряженные *протоны*. В 1932 г. в опытах английского физика **Джеймса Чедвика** (1891–1974 гг.) по бомбардировке бериллия α -частицами был открыт *нейтрон*. Сразу же после открытия нейтрона российский физик-теоретик **Дмитрий Дмитриевич Иваненко** (1904–1994 гг.) и немецкий физик В. Гейзенберг выдвинули гипотезу о протонно-нейтронном строении атомных ядер, которая полностью подтвердилась последующими исследованиями.

Стало ясно, что атомы состоят из электронов и ядер, а ядра – из протонов и нейтронов (нуклонов).

Таким образом, первоначально элементарными частицами считали электрон, протон, нейтрон и фотон.

Однако в том же 1932 г. американский физик **Карл Андерсон** (1905–1991 гг.) экспериментально обнаружил в космическом излучении *позитроны*, существование которых в 1928 году было предсказано английским физиком **Полем Дираком** (1902–1984 гг.).

Позитрон – *положительно заряженная частица, имеющая ту же массу и тот же (по модулю) заряд, что и электрон.*

Её называют *античастицей* электрона.

В 1935 г. японский физик–теоретик **Хидэки Юкава** (1907–1981 гг.) предсказал существование частиц с массами около 200 электронных масс. И действительно, в 1936 г. американские физики **Карл Андерсон** (1905–1991 гг.) и **Сет Неддермейер** (1907–1988 гг.) обнаружили в космическом излучении частицы с массой в 207 электронных масс, названные μ -мезонами (**мюонами**).

В 1947–1950 гг. английский физик **Сесил Пауэлл** (1903–1969 гг.) открыл в космических лучах ядерно-активные частицы π -мезоны (**пионы**), которые, по современным представлениям, осуществляют взаимодействие между нуклонами в ядре. Масса заряженного пиона составляет 273 электронные массы, нейтрального пиона – 264 электронные массы.

В течение 10 лет, последовавших за открытием пиона, в космических лучах были зафиксированы K -мезоны (каоны) с массами, приблизительно равными 970 электронных масс, Λ -гипероны и Σ -гипероны, имеющие массу в пределах 2183–3273 электронных масс.

С 1950-х гг. началась новая эра в изучении микромира: были созданы ускорители заряженных частиц – циклотроны, фазотроны, синхрофазотроны и т.д., которые стали основным инструментом исследования элементарных частиц.

В 1955 г. при рассеянии протонов (ускоренных на крупнейшем в то время синхрофазотроне Калифорнийского университета) на нуклонах ядер мишени (мишенью служила медь) был открыт антипротон. Электрический заряд антипротона отрицателен. Годом позже (1956) на том же ускорителе удалось обнаружить антинейтрон. Антинейтрон отличается от нейтрона знаком магнитного момента и так называемого барионного заряда.

В 1960 г. был открыт анти- Σ -гиперон, в 1964 г. – самый тяжелый W -гиперон. В 1960-х гг. на ускорителях обнаружили большое число крайне неустойчивых частиц – резонансов. В 1962 г. выяснилось, что существуют два разных нейтрино: электронное и мюонное. В 1974 году обнаружены массивные (в 3–4 протонные массы) и в то же время относительно устойчивые (по сравнению с обычными резонансами) частицы, которые

оказались тесно связанными с новым семейством элементарных частиц – «очарованных» (их первые представители открыты в 1976 году).

В 1975 г. обнаружен тяжелый аналог электрона и мюона – τ -лептон, в 1977 г. – частицы с массой порядка десяти протонных масс, в 1981 – «красивые» частицы. В 1983 г. открыты самые тяжелые из известных элементарных частиц – бозоны (W^+ , W^- и Z^0).

Таким образом, за годы, прошедшие после открытия электрона, было выявлено огромное число разнообразных микрочастиц, общими характеристиками которых являются:

1. Масса покоя

Известно, что фотоны не имеют массы покоя. Самой лёгкой частицей с ненулевой массой покоя является электрон. Сверхтяжелые частицы – гипероны.

2. Электрический заряд

У нейтральных частиц он отсутствует. У заряженных – кратен заряду электрона.

3. Спин (собственный момент импульса частицы)

У бозонов спины целые – 0, 1, 2. У фермионов полуцелые – например 1/2.

4. Время жизни

В зависимости от времени жизни элементарные частицы делятся на *стабильные* и *нестабильные* (с временем жизни от 15 минут до триллионных и более малых долей секунды).

Стабильными частицами являются: электрон (время жизни не менее $4,6 \cdot 10^{26}$ лет), протон (более 10^{32} лет), фотон и нейтрино.

Остальные частицы нестабильны. Нестабильные частицы через определенные промежутки времени **самопроизвольно** превращаются в другие частицы. Наиболее долгоживущей из них является нейтрон. Время жизни нейтрона порядка 15 мин. Другие частицы «живут» гораздо меньшее время. Например, среднее время жизни μ -мезона равно $2,2 \cdot 10^{-6}$ с, нейтрального π -мезона – $0,87 \cdot 10^{-16}$ с. Многие массивные частицы – гипероны – имеют среднее время жизни порядка 10^{-10} с. Существует несколько десятков частиц со временем жизни, превосходящим 10^{-17} с. По масштабам микромира это значительное время. Такие частицы называют **относительно стабильными**. Большинство **короткоживущих** элементарных частиц имеют времена жизни порядка 10^{-22} – 10^{-23} с (они называются резонансами).

Начиная с 1932 года, было открыто более 400 элементарных частиц, и это число продолжает расти. В многообразии элементарных частиц, известных к настоящему времени, обнаруживается более или менее стройная система классификации.

В табл. 3.1 представлены некоторые сведения о свойствах элементарных частиц со временем жизни более 10^{-20} с.

Таблица 3.1

| Группа | Наименование частицы | Символ | | Масса (в электронных массах) | Электрический заряд | Спин | Время жизни, с | |
|----------------|----------------------|----------------|--------------------|---------------------------------|---------------------|-------|-----------------------|------------------------------|
| | | Частица | Античастица | | | | | |
| Фотоны | Фотон | γ | | 0 | 0 | 1 | Стабилен | |
| Лептоны | Нейтрино электронное | ν_e | $\tilde{\nu}_e$ | 0 | 0 | 1/2 | Стабильно | |
| | Нейтрино мюонное | ν_μ | $\tilde{\nu}_\mu$ | 0 | 0 | 1/2 | Стабильно | |
| | Тау-нейтрино | ν_τ | $\tilde{\nu}_\tau$ | 0 | 0 | 1/2 | Стабильно | |
| | Электрон | e^- | e^+ | 1 | -1 1 | 1/2 | Стабилен | |
| | Мю-мезон | μ^- | μ^+ | 206,8 | -1 1 | 1 / 2 | $2,2 \cdot 10^{-6}$ | |
| | Тау-лептон | τ^- | τ^+ | 3492 | -1 1 | 1 / 2 | $1,46 \cdot 10^{-12}$ | |
| Адроны | Мезоны | Пи-мезоны | π^0 | | 264,1 | 0 | 0 | $1,83 \cdot 10^{-16}$ |
| | | | π^+ | π^- | 273,1 | -1 1 | 0 | $2,6 \cdot 10^{-8}$ |
| | | К-мезоны | K^0 | | 974,1 | 0 | 0 | $\approx 10^{-10} - 10^{-8}$ |
| | | | K^+ | K^- | 966,4 | 1 -1 | 0 | $1,24 \cdot 10^{-8}$ |
| | Эта-нуль-мезон | η^0 | | 1074 | 0 | 0 | $\approx 10^{-18}$ | |
| | Барионы | Протон | p | \tilde{p} | 1836,1 | 1 -1 | 1 / 2 | Стабилен |
| | | Нейтрон | n | \tilde{n} | 1838,6 | 0 | 1 / 2 | 898 |
| | | Лямбда-гиперон | Λ^0 | $\tilde{\Lambda}^0$ | 2183,1 | 0 | 1 / 2 | $2,63 \cdot 10^{-10}$ |
| | | Сигма-гипероны | Σ^0 | $\tilde{\Sigma}^0$ | 2333,6 | 0 | 1 / 2 | $5,8 \cdot 10^{-20}$ |
| | | | Σ^+ | $\tilde{\Sigma}^+$ | 2327,6 | 1 -1 | 1 / 2 | $0,8 \cdot 10^{-10}$ |
| | | | Σ^- | $\tilde{\Sigma}^-$ | 2343,1 | -1 1 | 1 / 2 | $1,48 \cdot 10^{-10}$ |
| | | Кси-гипероны | Ξ^0 | $\tilde{\Xi}^0$ | 2572,8 | 0 | 1 / 2 | $2,9 \cdot 10^{-10}$ |
| | | | Ξ^- | $\tilde{\Xi}^-$ | 2585,6 | -1 1 | 1 / 2 | $1,64 \cdot 10^{-10}$ |
| | Омега-минус-гиперон | Ω^- | $\tilde{\Omega}^-$ | 3273 | -1 1 | 3 / 2 | $8,2 \cdot 10^{-11}$ | |

Частицы в ней расположены в порядке возрастания массы. Кроме массы (в электронных массах), в таблице указаны также электрический заряд (в единицах элементарного заряда), момент импульса (**спин**) в единицах постоянной Планка $\hbar = h / 2\pi$ и среднее время жизни частицы.

В соответствии с их свойствами частицы подразделяют на три группы: фотоны, лептоны и адроны.

К первой группе относится единственная частица – **фотон**, которая является носителем электромагнитного взаимодействия. Масса покоя фотона равна нулю, поэтому скорость электромагнитных волн в вакууме ($c = 3 \cdot 10^8$ м/с) представляет собой предельную скорость распространения физического взаимодействия и является одной из фундаментальных физических постоянных.

Вторая группа элементарных частиц – лептоны.

Лептоны – это элементарные частицы, не участвующие в сильном взаимодействии.

Название «лептон» происходит от греч. *leptos* – тонкий, лёгкий, т.е. лептоны – частицы с малой массой. В самом деле, масса электрона, μ -мезона (мюона), а также электронного и мюонного нейтрино меньше масс всех остальных частиц. Однако в 1975 г. в группу лептонов была включена ещё одна частица, тоже не участвующая в сильном взаимодействии – тау-лептон (таон), масса которой почти вдвое больше массы протона.

Лептоны разделяются на три дуплета (семейства): электрон e^- и электронное нейтрино ν_e ; мюон μ^- и мюонное нейтрино ν_μ ; таон τ^- и тау-нейтрино ν_τ .

Электрон является материальным носителем наименьшей массы в природе, равной $9,1 \cdot 10^{-31}$ кг и наименьшего отрицательного электрического заряда $e = -1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл.

Мюоны имеют отрицательный заряд, равный заряду электрона. По своим свойствам они похожи на электроны, но в 207 раз тяжелее. Мюоны «живут» лишь две миллионных доли секунды, распадаясь на электрон и два нейтрино.

Масса сверхтяжелого тау-лептона в 3500 больше массы электрона. Он открыт на электрон-позитронном коллайдере SLAC (Стэнфорд, США). Тау-лептон тоже имеет отрицательный заряд, равный заряду электрона.

Соответствующие этим частицам три типа нейтрино – электронное, мюонное и тау-нейтрино – представляют собой легкие (возможно, безмассовые) электрически нейтральные частицы.

Нейтрино являются самыми распространёнными частицами во Вселенной. Они подвержены действию только слабых сил. Взаимодействие нейтрино с веществом ничтожно, потому эта частица легко проходит сквозь планету, «не заметив» её. Ежесекундно каждый квадратный сантиметр

земной поверхности пронзают 300000 нейтрино, летящих из космического пространства.

У всех лептонов имеются соответствующие античастицы: позитрон e^+ и электронное антинейтрино $\tilde{\nu}_e$; плюс-мюон μ^+ и мюонное антинейтрино $\tilde{\nu}_\mu$; плюс-таон τ^+ и таонное антинейтрино $\tilde{\nu}_\tau$.

Таким образом, всего существует 12 лептонов (6 частиц и 6 античастиц).

Нейтральные лептоны участвуют только в слабом взаимодействии, заряженные – в слабом и электромагнитном.

Все лептоны имеют спин, равный 1/2, т.е. являются фермионами.

В настоящее время нет ни теоретических, ни экспериментальных данных, которые свидетельствовали бы о наличии какой-либо внутренней структуры у лептонов. Во всех возможных сейчас экспериментах, включая столкновения в ускорителях частиц с энергиями в десятки и сотни гигаэлектронвольт, лептоны всегда вступают в ядерные реакции как целые, неделимые объекты.

Всё это позволяет считать шестёрку лептонов (e^- и ν_e , μ^- и ν_μ , τ^- и ν_τ), а также их античастицы (e^+ и $\tilde{\nu}_e$, μ^+ и $\tilde{\nu}_\mu$, τ^+ и $\tilde{\nu}_\tau$) *истинно элементарными частицами.*

Самая многочисленная группа элементарных частиц – адроны (от греч. *hadros* – большой, сильный).

Адроны – это частицы, участвующие во всех фундаментальных взаимодействиях – гравитационном, электромагнитном, сильном и слабом.

В зависимости от значения спина адроны делятся на две подгруппы: *мезоны* с нулевым спином (бозоны) и *барионы* со спином 1/2 (фермионы). Только у омега-минус-гиперона спин равен 3/2.

Барионы, в свою очередь, делятся на нуклоны и гипероны. У каждой из частиц есть соответствующая ей античастица, только эта-нуль-мезон полностью совпадает со своей античастицей, т.е. эта частица является абсолютно нейтральной.

Наиболее легкие из мезонов – положительно и отрицательно заряженные, а также нейтральные π -мезоны, имеют массы порядка 250 электронных масс (см. табл. 3.1). Они являются квантами ядерного поля, подобно тому, как фотоны являются квантами электромагнитного поля.

Самыми легкими из барионов являются нуклоны – протоны и нейтроны. Масса протона в 1836 раз превышает массу электрона и составляет $1,67 \cdot 10^{-27}$ кг. Положительный заряд протона равен модулю заряда электрона. Нейтрон – электрически нейтральная частица, масса которой немного превышает массу протона. Из протонов и нейтронов построены все атомные ядра, *сильное взаимодействие* обуславливает связь этих частиц между собой. В сильном взаимодействии протон и нейтрон имеют

одинаковые свойства и рассматриваются как два квантовых состояния одной частицы – *нуклона*.

Самый тяжёлый барион, открытый в 1964 г. – омега-минус-гиперон. Его масса составляет 3273 электронных масс.

Гипероны получили название *странных частиц*, поскольку оказалось, что прямого отношения к образованию вещества эти частицы не имеют. Предполагается, что странные частицы существовали на самой ранней стадии эволюции Вселенной. В дальнейшем нестабильные гипероны в процессе самопроизвольного распада превратились в протоны и нейтроны.

Адронов сотни, хотя стабильных частиц среди них очень мало. Обилие открытых и вновь открываемых адронов навело учёных на мысль, что все они построены из каких-то других более фундаментальных частиц. В 1964 г. американским физиком **Мюрреем Гелл-Манном** была выдвинута гипотеза, что *все адроны состоят из небольшого числа фундаментальных (бесструктурных) частиц*, названных **кварками**.

Кварки имеют необычный дробный электрический заряд, кратный $-1/3$ и $+2/3$. Они существуют только внутри адронов и не наблюдаются в свободном состоянии. Все кварки обладают спином, равным $1/2$. В настоящее время известны 6 типов кварков, названия которых происходят от английских слов: *u* (*up* – вверх), *d* (*down* – вниз), *c* (*charm* – очарование), *s* (*strange* – странный), *t* (*truth* – истина) и *b* (*beauty* – красота).

Адроны строятся из кварков следующим образом: мезоны состоят из пары кварк–антикварк, барионы – из трёх кварков (антибарионы – из трёх антикварков). Например, пион π^+ имеет кварковую структуру $u\bar{d}$, пион π^- – $\bar{u}d$, каон K^+ – $d\bar{s}$, протон – uud , нейтрон – udd , Σ^+ -гиперон – uus и т. д.

Кварковая модель строения адронов подтвердилась в результате экспериментов, проведенных в конце 60-х – начале 70-х гг. XX в.

Кварки стали рассматриваться как новые истинно элементарные частицы для адронной формы материи.

Кварки участвуют в сильном взаимодействии. Сильное взаимодействие между кварками достигается за счёт обмена глюонами (от англ. *glue* – клей) – безмассовыми электрически нейтральными частицами со спином, равным 1.

Существуют теоретические и экспериментальные доводы в пользу того, что силы, действующие между кварками, не ослабевают с расстоянием, т.е. для отделения кварков друг от друга требуется бесконечно большая энергия или, иначе говоря, возникновение кварков в свободном состоянии невозможно. Возможно, что кварки выступают в качестве последней ступени дробления материи.

Бесструктурными элементарными частицами являются также **калибровочные бозоны** – *частицы, посредством обмена которыми осуществляются взаимодействия.*

К ним относятся:

- восемь **глюонов** – частиц, переносящих *сильное взаимодействие*;
- три **промежуточных векторных бозона** W^+ , W^- и Z^0 , переносящих *слабое взаимодействие*;
- фотон – калибровочный бозон *электромагнитного взаимодействия*;
- **гравитон** – гипотетическая частица, переносящая *гравитационное взаимодействие*.

Существование гравитонов пока не доказано экспериментально в связи с малой интенсивностью гравитационного взаимодействия.

Адроны и лептоны образуют вещество. Калибровочные бозоны – кванты разных видов излучения.

Малые размеры и массы элементарных частиц обуславливают квантовую специфику их поведения.

Важным свойством всех элементарных частиц является *способность их к взаимным превращениям*. Элементарные частицы способны рождаться и уничтожаться (испускаться и поглощаться). Это относится также и к стабильным частицам, только с той разницей, что превращения их происходят не самопроизвольно, а при взаимодействии с другими частицами.

На рис. 3.1 показан известный случай образования двух нейтральных частиц (K^0 -мезона и Λ^0 -гиперона) в результате взаимодействия π^- -мезона с покоящимся протоном $\pi^- + p \rightarrow K^0 + \Lambda^0$, а затем распад каждой из образовавшихся частиц на две с зарядами разных знаков. Очевидно, что продолжение линии полета нейтральной частицы (пунктирные линии на рисунке) должно проходить между следами продуктов их распада.

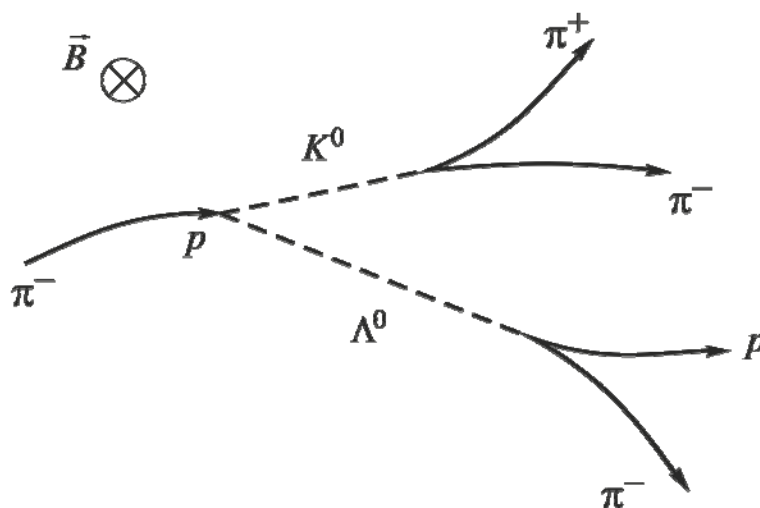
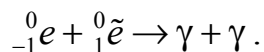


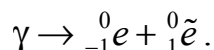
Рис. 3.1. Иллюстрация процессов взаимодействия и распада частиц

В 1933 г. французский физик **Фредерик Жолио Кюри** (1900–1958 гг.) экспериментально подтвердил предсказание Дирака, что *при столкновении*

частицы с античастицей они исчезают (**аннигилируют**, от лат. *nihil* – ничто), превращаясь в два (редко три) фотона. Примером может служить аннигиляция электрона и позитрона, сопровождающаяся рождением двух фотонов большой энергии:



В том же 1933 г. Фредерик и Ирэн Жолио Кюри обнаружили обратный процесс – **рождение электронно-позитронных пар при прохождении гамма-кванта большой энергии вблизи атомного ядра**:



Процессы распада и рождения новых частиц происходят в соответствии с законами сохранения заряда, массы, импульса, энергии, спина и др.

Например, **закон сохранения заряда** требует, чтобы заряд распадающейся частицы равнялся суммарному заряду продуктов распада.

Закон сохранения импульса утверждает, что вектор импульса распадающейся частицы равен векторной сумме импульсов продуктов распада.

Например, при распаде одной частицы на две (рис. 3.2) математическое выражение закона сохранения импульса имеет вид

$$\vec{p} = \vec{p}_1 + \vec{p}_2, \quad (3.1)$$

или, в проекциях на оси координат,

$$\begin{cases} ox: & p = p_1 \cdot \cos \varphi_1 + p_2 \cdot \cos \varphi_2 \\ oy: & 0 = p_1 \cdot \sin \varphi_1 + p_2 \cdot \sin \varphi_2, \end{cases} \quad (3.2)$$

где p – величина импульса распадающейся частицы; p_1 и p_2 – величины импульсов продуктов распада; φ_1 и φ_2 – углы их разлета (с учетом правила отсчета углов, т.е. $\varphi_1 > 0$, $\varphi_2 < 0$).

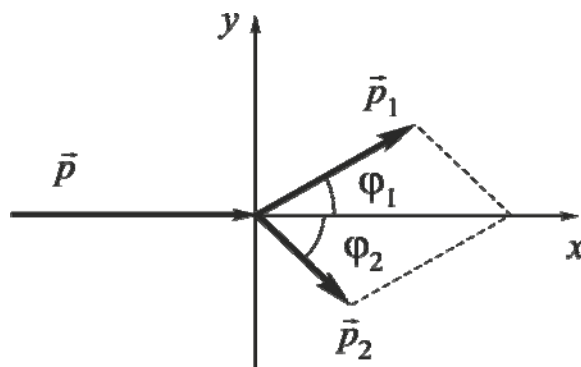


Рис. 3.2. Иллюстрация к закону сохранения импульса

Выражение закона сохранения энергии для такого распада записывают в виде

$$E = E_1 + E_2, \quad (3.3)$$

где E – полная энергия распадающейся частицы. Согласно теории относительности полная энергия частицы может быть выражена через энергию покоя $E_0 = m_0c^2$ и импульс частицы:

$$E = \sqrt{(m_0c^2)^2 + (pc)^2} \quad \text{или} \quad E = \sqrt{E_0^2 + (pc)^2}, \quad (3.4)$$

где c – скорость света в вакууме. Аналогично для продуктов распада:

$$E_1 = \sqrt{(m_{10}c^2)^2 + (p_1c)^2} \quad \text{или} \quad E_1 = \sqrt{E_{10}^2 + (p_1c)^2}, \quad (3.5)$$

$$E_2 = \sqrt{(m_{20}c^2)^2 + (p_2c)^2} \quad \text{или} \quad E_2 = \sqrt{E_{20}^2 + (p_2c)^2}. \quad (3.6)$$

Используя эти и другие законы сохранения при исследовании траекторий частиц и продуктов их распада, можно рассчитать характеристики частиц (среднее время жизни, массу, заряд и др.).

Если трековый прибор, т.е. *устройство, которое тем или иным способом фиксирует траекторию движения частицы*, поместить в магнитное поле, то кривизне траектории (трека) частицы можно определить знак её заряда. Известно, что искривление траектории заряженной частицы в магнитном поле обусловлено действием на неё силы Лоренца, направление которой зависит от знака заряда частицы. Нейтральная частица в магнитном поле движется прямолинейно.

Действующие в мире элементарных частиц законы сохранения не допускают возможности возникновения одиночных частиц. Во всех экспериментах с античастицами их возникновение наблюдается только в парах с частицами.

В данной лабораторной работе изучается распад K^+ -мезона.

Мезоны – нестабильные элементарные частицы с нулевым или целым спином, принадлежащие к классу адронов и не имеющие барионного заряда. К ним относятся π -мезоны, K -мезоны и многие резонансы.

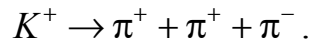
π -мезоны (пионы) – группа из трёх нестабильных элементарных частиц: двух заряженных (π^+ и π^-) и одной нейтральной (π^0). Они были обнаружены в составе космического излучения в 1947 г. английским физиком С. Пауэллом.

K -мезоны (каоны) – группа нестабильных элементарных частиц, открытых в 1949 г., включающая заряженные частицы (K^+ - и K^- -мезоны), а также нейтральные K^0 и \bar{K}^0 (анти K -мезон).

Массы покоя K -мезонов составляют около $1000m_e$ (m_e – масса покоя электрона). Средние времена жизни заряженных K^\pm -мезонов одинаковы и равны $(1,229 \pm 0,008) \cdot 10^{-8}$ с. Нейтральные K^0 - и \bar{K}^0 -мезоны ведут себя как отдельные частицы только в момент рождения. При свободном движении они являются смесью двух других нейтральных частиц K_1^0 и K_2^0 , обладающих близкими массами, но различными временами жизни:

$$\tau_{K_1^0} = (0,92 \pm 0,02) \cdot 10^{-10} \text{ с}, \quad \tau_{K_2^0} = (5,62 \pm 0,08) \cdot 10^{-8} \text{ с}.$$

Распад K^+ -мезона сопровождается рождением π -мезонов (пионов)



Пример распада K^+ -мезона по этой схеме приведен на рис. 3.3.

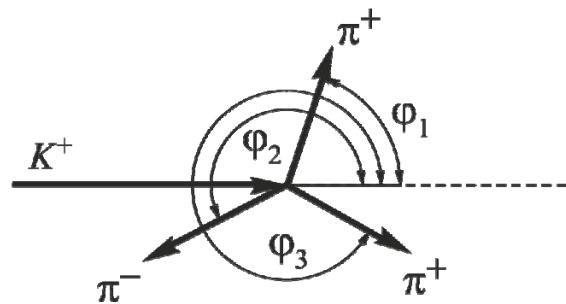


Рис. 3.3. Распад K^+ – мезона

При распаде на три частицы в формулы (3.1)–(3.3) необходимо добавить по одному слагаемому (углы φ_1 , φ_2 и φ_3 , см. на рис. 3.3):

$$\begin{cases} ox: & p = p_1 \cdot \cos \varphi_1 + p_2 \cdot \cos \varphi_2 + p_3 \cdot \cos \varphi_3, \\ oy: & 0 = p_1 \cdot \sin \varphi_1 + p_2 \cdot \sin \varphi_2 + p_3 \cdot \sin \varphi_3, \end{cases} \quad (3.7)$$

$$E = E_1 + E_2 + E_3. \quad (3.8)$$

2. МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА

Материалом для выполнения работы служат снимки треков частиц, полученные в пузырьковой камере, в рабочем объеме которой находится перегретая жидкость (т.е. при температуре выше температуры кипения). Такое состояние достигается кратковременным (на доли секунды) снижением температуры кипения жидкости путем уменьшения ее давления.

Заряженная частица, попавшая в пузырьковую камеру, образует на своем пути ионы жидкости, которые становятся центрами интенсивного парообразования. Вдоль траектории заряженной частицы появляются пузырьки пара, последовательность которых образует след частицы – трек. Образовавшиеся треки фотографируют и исследуют. Нейтральные частицы очень слабо взаимодействуют с молекулами среды, поэтому практиче-

ски не образуют треков. Об их траекториях (которые всегда прямолинейны) судят по точкам рождения и распада.

Определение собственного времени жизни частицы с помощью трековых приборов основано на измерении длины её пробега, т.е. расстояния, пройденного частицей от момента образования до распада.

Импульс нейтральной частицы ввиду отсутствия потерь на взаимодействие с молекулами среды не меняется во время полета и пропорционален длине пробега l .

Действительно, поскольку

$$p = m\upsilon,$$

где масса частицы m связана с массой покоя m_0 уравнением

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{\upsilon^2}{c^2}}},$$

а скорость частицы υ определяется длиной пробега l и временем её жизни в лабораторной системе отсчета $\tau_{\text{лаб}}$

$$\upsilon = \frac{l}{\tau_{\text{лаб}}},$$

то с учетом релятивистского соотношения между временем жизни в лабораторной системе отсчета $\tau_{\text{лаб}}$ и собственным временем жизни τ_0 в системе отсчета, в которой частица покоится (т.е. в системе отсчета, движущейся вместе с частицей)

$$\tau_{\text{лаб}} = \frac{\tau_0}{\sqrt{1 - \frac{\upsilon^2}{c^2}}}$$

можно получить значение собственного времени жизни частицы

$$\tau_0 = \frac{l}{\upsilon} \cdot \frac{m_0}{m} = \frac{l \cdot m_0}{p}, \text{ или } \tau_0 = l \cdot \frac{E_0}{p \cdot c^2}. \quad (3.9)$$

Импульс p распадающейся частицы можно рассчитать как сумму импульсов продуктов распада (формулы (3.1) и (3.2)). Поскольку продуктами распада в исследуемых случаях являются заряженные частицы, то их импульсы изменяются во время полета в результате потерь энергии на ионизацию окружающих атомов и молекул. Между этими потерями и длиной пробега заряженных частиц до остановки имеется определенная взаимосвязь.

Зависимости начальной кинетической энергии π^\pm -мезонов от длины пробега l этих частиц известны и представлены в виде графика в прил. 2 к

данной работе. Определив по графику значение начальной кинетической энергии частицы и воспользовавшись известной формулой специальной теории относительности

$$p = \frac{1}{c} \sqrt{T(2m_0c^2 + T)} = \frac{1}{c} \sqrt{T(2E_0 + T)}, \quad (3.10)$$

можно рассчитать значение импульса частицы.

При использовании графика для расчетов необходимо учитывать, что в экспериментальной ядерной физике энергию частиц измеряют в МэВ, импульс в $\frac{\text{МэВ}}{c}$, а массу в $\frac{\text{МэВ}}{c^2}$. Здесь c – размерность внесистемной единицы скорости ($1 c = 3 \cdot 10^8$ м/с); МэВ (мегаэлектрон-вольт) – размерность внесистемной единицы энергии ($1 \text{ МэВ} = 1,6 \cdot 10^{-13}$ Дж).

Выбранные единицы измерения энергии, импульса и массы удобны для выполнения расчётов в данной работе. Например, при подстановке значений импульсов с такой размерностью в формулы (3.4)–(3.6) сразу получается значение произведения pc в МэВ.

Массу покоя распадающейся частицы можно рассчитать, решая систему уравнений (3.8) и (3.4)–(3.6).

$$m_0c^2 = \sqrt{\left(\sum_{i=1}^N \sqrt{E_{i0}^2 + (p_i c)^2} \right)^2 - (p \cdot c)^2}, \quad (3.11)$$

где N – число частиц-продуктов распада. Энергия покоя продуктов распада (π^+ -мезона и π^- -мезона) одинакова и составляет 139,6 МэВ.

3. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. На фотографии треков (прил. 1) найдите распад K^+ -мезона ($K^+ \rightarrow \pi^+ + \pi^+ + \pi^-$) и перерисуйте треки частиц на кальку. Измерьте длину двух (наибольших) из трех треков пионов, учитывая масштаб, указанный на фотографии. Измерьте углы вылета всех трех пионов (см. рис. 3.3). Данные занесите в табл. 3.2.

2. По графику зависимости длины пробега заряженных частиц от начальной кинетической энергии (прил. 2) определите начальные кинетические энергии пионов и по формуле (3.10) рассчитайте их начальные импульсы. Результаты занесите в табл. 3.2.

3. Переписав закон сохранения импульса (3.7) в виде системы линейных уравнений со свободными членами

$$\begin{cases} a = p - p_3 \cdot \cos(\varphi_3) \\ b = 0 - p_3 \cdot \sin(\varphi_3), \end{cases} \quad (3.12)$$

где $a = p_1 \cdot \cos(\varphi_1) + p_2 \cdot \cos(\varphi_2)$; $b = p_1 \cdot \sin(\varphi_1) + p_2 \cdot \sin(\varphi_2)$, решите её относительно неизвестных p и p_3 .

Замечание. В случае получения небольшого отрицательного значения величины проекции импульса K^+ -мезона принять, что в пределах ошибки измерения его импульс равен нулю, т.е. перед распадом K^+ -мезон практически остановился.

4. По формуле (3.11), используя приведенное выше значение энергии покоя пиона, определите массу K^+ -мезона в $\text{МэВ}/c^2$ и в электронных массах m_{0e} .

5. По формуле (3.9) рассчитайте время жизни K^+ -мезона. Результаты расчётов занесите в табл. 3.2.

Т а б л и ц а 3.2

| Угол вылета пиона | Длина пробега пиона, см | Кинетическая энергия пиона, МэВ | Импульс пиона, МэВ/с | Импульс K^+ -мезона, МэВ/с | Масса K^+ -мезона, МэВ/с ² | Масса K^+ -мезона (m_{0e}) | Время жизни K^+ -мезона, с |
|-------------------|-------------------------|---------------------------------|----------------------|------------------------------|---|----------------------------------|------------------------------|
| $\varphi_1 =$ | $l_1 =$ | $T_1 =$ | $p_1 =$ | | | | |
| $\varphi_2 =$ | $l_2 =$ | $T_2 =$ | $p_2 =$ | $p =$ | $M_{0K} =$ | $M_{0K} =$ | $\tau_0 =$ |
| $\varphi_3 =$ | | | $p_3 =$ | | | | |

Контрольные вопросы

1. Какие частицы называются элементарными?
2. Расскажите об истории открытия элементарных частиц.
3. Назовите общие характеристики элементарных частиц.
4. Чем античастицы отличаются от частиц?
5. В чём заключается явление аннигиляции пары «частица – античастица»?
6. При каких условиях рождается пара «частица – античастица»?
7. Какие взаимодействия называются фундаментальными? Охарактеризуйте их.
8. Приведите классификацию элементарных частиц по видам взаимодействий.
9. Какие частицы называются лептонами? Перечислите их дуплетами.
10. Какие частицы называются адронами? Чем отличаются мезоны от барионов?
11. Что такое кварки? Как из кварков строятся мезоны? Барионы?

12. Перечислите и охарактеризуйте частицы-переносчики фундаментальных взаимодействий.

13. Что такое трек элементарной частицы? Почему одни элементарные частицы образуют треки, а другие нет?

14. Какова форма треков частиц, если на них действует магнитное поле?

15. Опишите устройство и принцип работы пузырьковой камеры.

16. Каковы основные условия протекания реакции взаимопревращения элементарных частиц?

17. Каково соотношение между импульсами продуктов реакции, если остановившаяся частица распалась на две частицы?

18. Как по известной кинетической энергии можно определить импульс частицы в релятивистском и нерелятивистском случаях?

19. В чем отличие собственной системы отсчета от лабораторной системы отсчета?

20. Чему равна длина пробега частицы в собственной системе отсчета?

21. В какой системе отсчета время жизни частицы минимально?

22. Какие единицы измерения энергии, импульса и массы используются в ядерной физике?

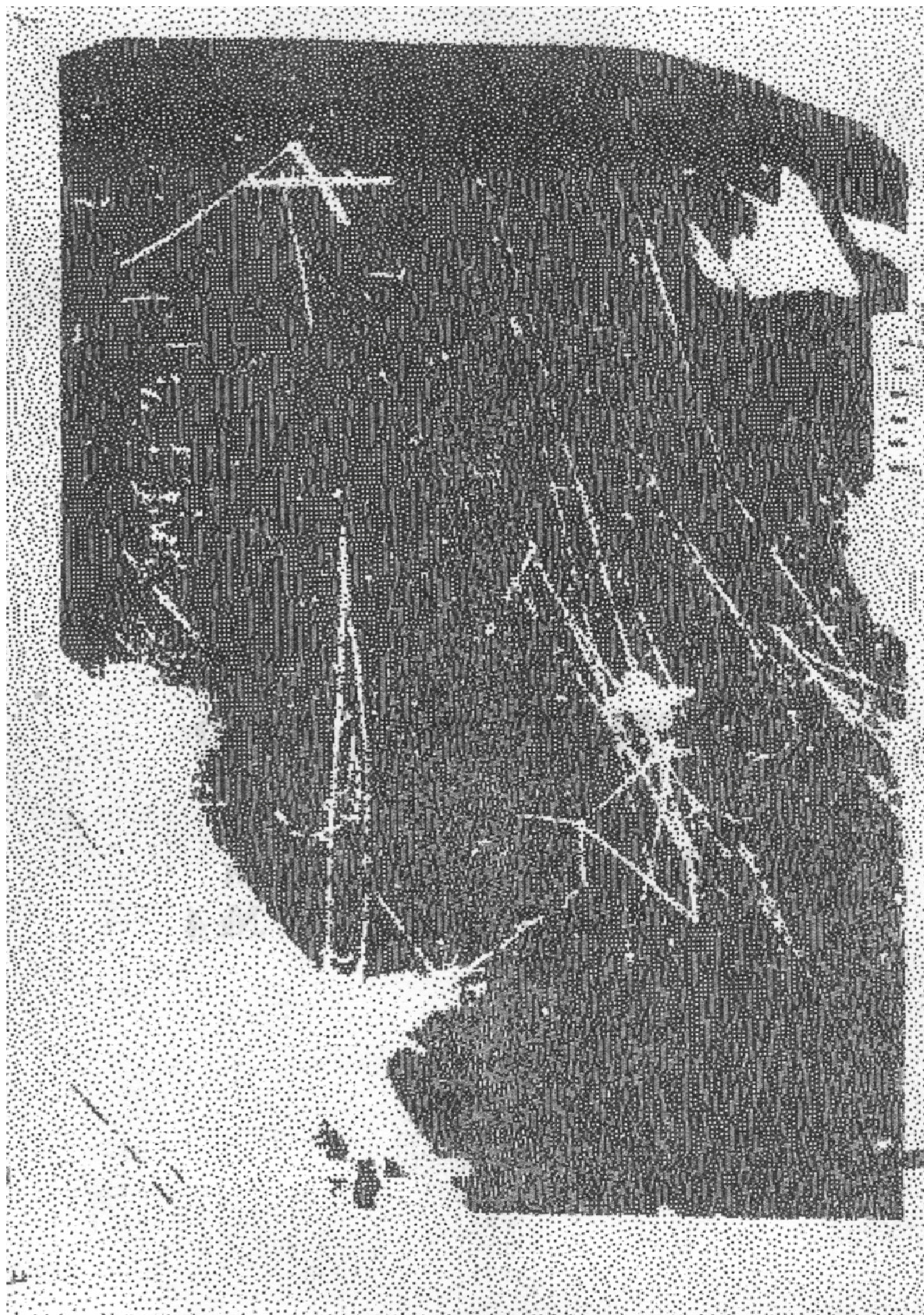
23. Определите полную энергию (в МэВ) и импульс (в МэВ/с) электрона, ускоренного до кинетической энергии, равной 2,53 МэВ.

24. При какой скорости кинетическая энергия частицы равна её энергии покоя?

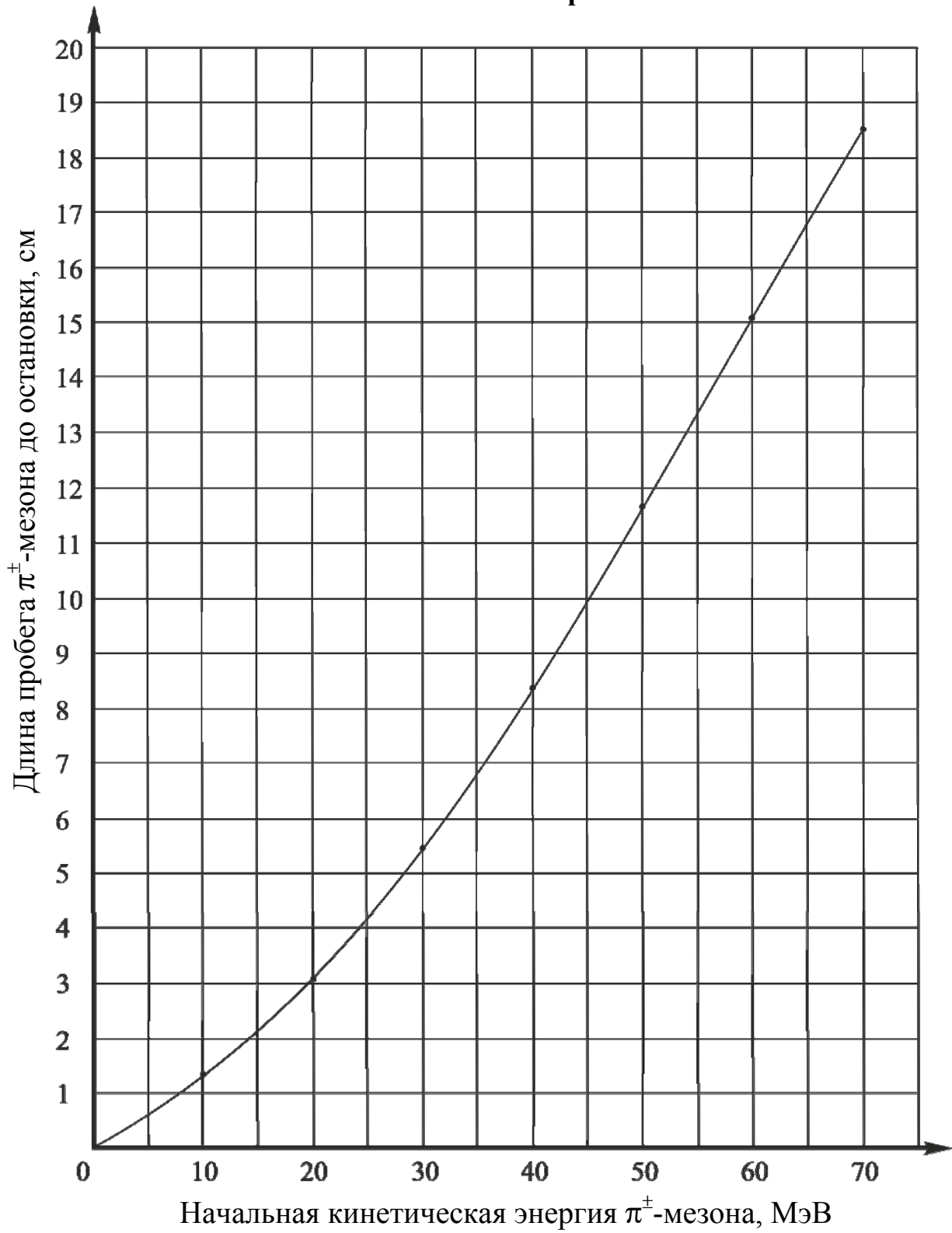
25. При какой скорости кинетическая энергия релятивистской частицы с массой покоя m равна $\frac{mc^2}{2}$?

26. Энергия покоя электрона 0,511 МэВ. Найдите кинетическую энергию и импульс электрона, движущегося со скоростью $v = 0,8c$.

Приложение 1
Фотография треков частиц (масштаб 5:1)



Зависимость длины пробега заряженных частиц от начальной кинетической энергии



ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Природа как объект изучения естествознания сложна и многообразна в своих проявлениях. Она непрерывно изменяется и находится в постоянном движении. Круг знаний о природе становится всё шире.

Изучением наиболее простых объектов окружающего мира и наиболее простых форм их движения и взаимодействия занимается физика. Здесь можно получить простые и ясные модели, включающие небольшое число свойств и в то же время не слишком упрощающие реальность и поддающиеся опытной проверке.

Объекты, изучаемые, например, экономикой или социологией, несравненно более сложны и многосторонни и часто не допускают описания с помощью простых абстрактных моделей. Поэтому они труднее поддаются исследованию.

Тем не менее, любые самые сложные явления состоят из простых элементарных процессов, а объекты – из простых элементов. Физические явления, как самые простые, входят в состав любых других процессов и явлений, начиная от сравнительно простых химических и до весьма сложных биологических, психологических, космологических. В этом смысле физические процессы и объекты являются фундаментальными, а физика составляет основу естествознания.

На основе успехов фундаментальных физических исследований идёт непрерывный поиск практических приложений новых открытий, возникают современные наукоёмкие технологии производства разнообразной продукции, в том числе и товаров повседневного спроса. Созданы новые системы связи и транспорта, начато освоение космического пространства, осуществлено искусственное воспроизведение биологических особей. Физические методы исследования заняли доминирующее положение в биофизике, молекулярной биологии, квантовой химии, медицине, геологии.

Естественнонаучные знания вместе с современными технологиями формируют новый образ жизни. Высокообразованный человек не может дистанцироваться от них, не рискуя оказаться беспомощным в профессиональной деятельности. Он должен знать, как создаются продукты производства, каковы перспективы развития современных технологий, тесно связанных с экономическими, социальными и политическими проблемами. Знание физики как одной из естественных наук способствует выработке адекватного отношения к окружающему миру. Любому человеку важно знать, что мир познаваем, причём познаваем рационально; что им управляют объективные законы, которые нельзя отменить или обойти и которые необходимо знать.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Михайлов, Л.А. Концепции современного естествознания [Текст] / Л.А. Михайлов. – СПб.: Питер, 2012. – 336 с.
2. Исаков, А.Я. Основы современного естествознания. [Текст] / А.Я. Исаков. – Петропавловск-Камчатский: КамчатГТУ, 2012. – 274 с.
3. Карпенков, С.Х. Концепции современного естествознания [Текст] / С.Х. Карпенков. – М.: Директ-Медиа, 2014. – 447 с.
4. Разумов, В.А. Концепции современного естествознания [Текст] / В.А. Разумов. – М.: НИЦ ИНФРА-М, 2015. – 352 с.
5. Лавриненко, В.Н. Концепции современного естествознания [Текст] / В.Н. Лавриненко, В.П. Ратников. – М.: ЮНИТИ-ДАНА, 2012. – 319 с.
6. Тулинов, В.Ф. Концепции современного естествознания [Текст] / В.Ф. Тулинов, К.В. Тулинов. – М.: Издательско-торговая корпорация «Дашков и К», 2014. – 484 с.
7. Гусейханов, М.К. Концепции современного естествознания [Текст]. / М.К. Гусейханов. – М.: Юрайт, 2011. – 608 с.
8. Рузавин, Г.И. Концепции современного естествознания [Текст] / Г.И. Рузавин. – М.: Проспект, 2015. – 245 с.
9. Брызгалина, Е. В. Концепции современного естествознания [Текст] / Е. В. Брызгалина. – М.: Проспект, – 2015. – 496 с.
10. Романов, Л.А. Концепции современного естествознания. Практикум [Текст] / Л.А. Романов. – М.: Вузовский учебник: НИЦ ИНФРА-М, 2015. – 128 с.
11. Трофимова, Т.И. Курс физики [Текст] / Т.И. Трофимова. – М.: Академия, 2010. – 560 с.
12. Стрельник, О.Н. Концепции современного естествознания [Текст] / О.Н. Стрельник. – М.: Юрайт, 2011. – 223 с.

ОГЛАВЛЕНИЕ

| | |
|--|-----|
| ПРЕДИСЛОВИЕ | 3 |
| ВВЕДЕНИЕ..... | 4 |
| 1. МЕХАНИЧЕСКАЯ КАРТИНА МИРА..... | 7 |
| 1.1. Формирование механической картины мира (МКМ) | 7 |
| 1.1.1. Формирование физических представлений в античную эпоху (VI в. до н.э. – V в. н.э.)..... | 7 |
| 1.1.2. Формирование физических представлений в период Средневековья (V – начало XIV вв.) | 11 |
| 1.1.3. Развитие механики в эпоху Возрождения (вторая половина XV–XVI вв.) | 13 |
| 1.1.4. Возникновение классической механики (начало XVII в. – XIX в.) | 15 |
| 1.2. Основные принципы механической картины мира | 21 |
| 1.3. Основные положения МКМ | 23 |
| 1.4. Ограниченность МКМ | 25 |
| Контрольные вопросы..... | 26 |
| ЛАБОРАТОРНЫЕ РАБОТЫ | 28 |
| Лабораторная работа № 1 ЭКСПЕРИМЕНТ КАК МЕТОД НАУЧНОГО ПОЗНАНИЯ. ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ФИЗИЧЕСКОГО ЭКСПЕРИМЕНТА..... | 28 |
| Лабораторная работа №2 ИЗУЧЕНИЕ РАВНОУСКОРЕННОГО ДВИЖЕНИЯ НА МАШИНЕ АТВУДА И ЕЁ КОМПЬЮТЕРНОЙ МОДЕЛИ | 55 |
| Лабораторная работа № 3 ИЗУЧЕНИЕ АБСОЛЮТНО УПРУГОГО И НЕУПРУГОГО СОУДАРЕНИЙ ШАРОВ | 72 |
| 2. ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ КАРТИНА МИРА..... | 87 |
| 2.1. Основные экспериментальные законы электромагнетизма..... | 87 |
| 2.2. Теория электромагнитного поля Максвелла | 92 |
| 2.3. Электронная теория Лоренца | 96 |
| 2.4. Специальная теория относительности | 97 |
| 2.5. Основные идеи общей теории относительности..... | 101 |
| 2.6. Основные принципы ЭМКМ..... | 104 |
| 2.7. Общие положения ЭМКМ..... | 106 |
| 2.8. Ограниченность ЭМКМ..... | 107 |
| Контрольные вопросы..... | 107 |
| Лабораторные работы | 108 |
| Лабораторная работа №1 ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ..... | 108 |
| Лабораторная работа №2 ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЦЕПИ ПОСТОЯННОГО ТОКА..... | 121 |
| Лабораторная работа №3 ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГОРИЗОНТАЛЬНОЙ СОСТАВЛЯЮЩЕЙ ВЕКТОРА ИНДУКЦИИ МАГНИТНОГО ПОЛЯ ЗЕМЛИ..... | 136 |
| 3. КВАНТОВО-ПОЛЕВАЯ КАРТИНА МИРА..... | 148 |
| 3.1. Основные идеи и гипотезы квантово-полевой картины мира | 148 |
| 3.1.1. Формирование идеи квантования физических величин..... | 148 |

| | |
|---|-----|
| 3.1.2. Боровская модель атома и концепция квантования | 157 |
| 3.1.3. Корпускулярно-волновой дуализм микрообъектов | 160 |
| 3.2. Квантовая механика..... | 161 |
| 3.2.1. Соотношение неопределённостей..... | 161 |
| 3.2.2. Понятие состояния в квантовой механике. Волновая функция | 163 |
| 3.2.3. Основное уравнение квантовой механики | 164 |
| 3.2.4. Квантовая теория поля | 165 |
| 3.2.5. Основные принципы квантовой механики | 167 |
| 3.2.6. Основные положения КПКМ | 169 |
| 3.2.7. Приложения квантовой механики..... | 170 |
| 3.2.8. Цивилизационная значимость квантовой механики | 172 |
| 3.3. Ядра атомов. Ядерная энергия | 176 |
| 3.4. Кристаллы, полупроводники, микро- и нанoeлектроника..... | 178 |
| 3.5. Квантовые генераторы (лазеры)..... | 179 |
| Контрольные вопросы..... | 183 |
| ЛАБОРАТОРНЫЕ РАБОТЫ..... | 185 |
| Лабораторная работа №1 ИССЛЕДОВАНИЕ КАЧЕСТВА ПОЛИРОВАННОЙ ПОВЕРХНОСТИ С ПОМОЩЬЮ МИКРОИНТЕРФЕРОМЕТРА ЛИННИКА | 185 |
| Лабораторная работа №2 ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛООВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ АБСОЛЮТНО ЧЁРНОГО ТЕЛА..... | 201 |
| Лабораторная работа № 3 ОПРЕДЕЛЕНИЕ МАССЫ И ВРЕМЕНИ ЖИЗНИ К-МЕЗОНОВ | 212 |
| ЗАКЛЮЧЕНИЕ | 229 |
| БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК..... | 230 |

Учебное издание

Очкина Наталья Александровна

**КОНЦЕПЦИИ СОВРЕМЕННОГО ЕСТЕСТВОЗНАНИЯ.
ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ЕСТЕСТВОЗНАНИЯ**

Учебное пособие

Под общ. ред. д-ра техн. наук, проф. Г.И. Грейсуха

Р е д а к т о р Н.Ю. Шалимова
В е р с т к а Н.А. Сазонова

Подписано в печать 17.03.2015. Формат 60×84/16.
Бумага офисная «Снегурочка». Печать на ризографе.
Усл. печ. л. 13,485. Уч.-изд. л. 14,5. Тираж 80 экз.
Заказ № 123.



Издательство ПГУАС.
440028, г.Пенза, ул. Германа Титова, 28.